

POLITECNICO DI TORINO
Collegio di Ingegneria Gestionale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

**Pianificazione dell'inventario con tempo di
approvvigionamento dipendete dalla quantità ordinata**



**Politecnico
di Torino**

Relatrici

Arianna Alfieri

Erica Pastore

Candidata

Iole Valenti

Ottobre 2024

Indice

1. Introduzione.....	1
1.2 Metodologie e strumenti di ricerca.....	2
2. Classificazione dei tipi di scorte.....	5
2.1 Classificazione in base allo stato di trasformazione.....	5
2.2 Classificazione funzionale.....	5
3. Modelli gestione scorte	11
3.1 Modelli con domanda costante e deterministica	11
3.1.1 Il lotto economico di riordino - EOQ	11
3.1.2 Il lotto economico di riordino EPQ	12
3.2 Modelli con domanda non costante e deterministica	13
3.2.1 Algoritmo di Wagner-Whitin	13
3.2.2 Metodi euristici.....	14
3.3 Modelli con domanda probabilistica	14
3.3.1 Continuous Review	14
3.3.2 Periodic Review	16
4. Lead time.....	19
4.1 Definizione del concetto di Lead time.....	19
4.2 Approvvigionamento.....	20
4.3 Categorie di Lead time	23
4.3.1 Lead time deterministico	23
4.3.2 Lead time variabile.....	25
4.3.3 Lead time dipendente dalla quantità ordinata:.....	33
5. Analisi della variabilità del Lead Time nel settore manifatturiero	39
5.1 MRP	39
5.2 Industria alimentare.....	43
5.3 Settore microprocessori.....	46
5.3.1 La crisi dei semiconduttori: dinamiche globali e risposte strategiche.....	47
5.4 Settore della moda.....	48
5.5 Settore metallurgico	50
5.6 Additive manufacturing.....	52
5.6.1 Tipologie di stampa 3D	52
5.6.2 Supplychain e additive manufacturing	55

Gestione delle scorte	58
5.6.3 L'Importanza di un approccio contestualizzato nella valutazione della manifattura additiva	59
5.6.4 Approvvigionamento materie prime nell'additive manufacturing	61
6. Conclusioni.....	67
7. Bibliografia.....	69

1. Introduzione

Questa tesi affronta in maniera approfondita la gestione delle scorte, il processo di approvvigionamento delle materie prime e il ruolo cruciale del lead time nelle aziende manifatturiere. Tra gli aspetti centrali dell'analisi, viene dato particolare risalto al procurement lead time, ovvero il tempo che intercorre tra l'emissione dell'ordine e la consegna delle materie prime. L'obiettivo è capire come la variabilità di questo parametro, spesso influenzato da fattori esterni come eventi geopolitici e interruzioni della supply chain, possa compromettere l'efficienza operativa delle aziende e portare a inefficienze significative. Le motivazioni alla base dell'enfasi sulla gestione delle scorte derivano dall'evidenza dell'impatto sempre più significativo che gli eventi geopolitici esercitano sulle supply chain globali, come ben noto nel settore manifatturiero e non solo, le crisi improvvise e inaspettate possano destabilizzare anche le catene di approvvigionamento più resilienti, con conseguenze significative sull'efficienza operativa delle aziende. Eventi recenti come la crisi del Mar Rosso del 2024, che ha provocato ritardi significativi lungo una delle rotte commerciali più importanti, e la pandemia di Covid-19, che ha evidenziato la fragilità delle supply chain globali, hanno complicato notevolmente la gestione delle scorte e allungato i tempi di consegna. La carenza di microchip ha ulteriormente dimostrato l'importanza di pianificare accuratamente il procurement lead time, poiché le improvvise fluttuazioni della domanda e le interruzioni produttive possono avere impatti duraturi a livello globale. Episodi come questi, insieme ad altri eventi geopolitici e sanitari che hanno segnato gli ultimi anni, hanno reso evidente la fragilità delle supply chain globali, dimostrando come anche piccole interruzioni possano avere conseguenze significative, amplificando la necessità di una gestione ottimale delle scorte e di una pianificazione efficace del lead time di approvvigionamento per evitare inefficienze e ritardi critici.

A tal proposito, il concetto di Quantity Dependent Lead Time (QDL), fenomeno secondo cui il lead time varia in funzione della quantità ordinata ed esplorato nel dettaglio nella tesi, rappresenta una chiave di lettura fondamentale per capire come le aziende possano ottimizzare il proprio approvvigionamento in situazioni di crisi e mantenere competitività,

riducendo al minimo i rischi legati ai tempi di consegna e all'approvvigionamento delle materie prime.

Un altro aspetto fondamentale analizzato in questa tesi è il ruolo crescente dell'additive manufacturing (AM) nella supply chain moderna. La stampa 3D, o produzione additiva, sta guadagnando terreno come metodo di produzione innovativo, permettendo alle aziende di ridurre i costi di stoccaggio e di accedere a una produzione flessibile e su misura. Tuttavia, l'introduzione dell'AM nella supply chain non è priva di sfide: la dipendenza da fornitori specializzati di materie prime e macchinari, unita alla complessità delle operazioni di post-produzione, rappresenta solo una parte degli ostacoli che le aziende devono affrontare. Per superare tali difficoltà, è necessario rivedere, personalizzare e ottimizzare i processi a monte, come la gestione delle materie prime e il processo di inbound. Un'efficace gestione a monte è cruciale per evitare ripercussioni lungo la catena di fornitura, riducendo così il rischio di inefficienze nei processi a valle (bullwhip effect).

1.2 Metodologie e strumenti di ricerca

La metodologia adottata per questa tesi combina un approccio analitico e qualitativo. La ricerca si articola in due principali fasi: una revisione teorica della letteratura esistente e un'analisi empirica basata su casi studio specifici.

La prima fase della ricerca si concentra sulla raccolta e analisi della letteratura scientifica inerente ai principali temi trattati, ovvero la classificazione e gestione delle scorte e le categorie di lead time. Per questo scopo, sono stati utilizzati motori di ricerca accademici come Google Scholar e ResearchGate. Questa fase ha permesso di delineare le basi teoriche e concettuali del lavoro, identificando le principali variabili in gioco e i modelli di gestione delle scorte più utilizzati in letteratura. Per approfondire i modelli teorici, sono stati consultati libri di testo universitari, che hanno fornito una solida base concettuale su cui sviluppare l'analisi successiva. La revisione della letteratura ha anche incluso articoli scientifici che esaminano il fenomeno del Quantity Dependent Lead Time (QDL) e il suo impatto sulle strategie di approvvigionamento.

La seconda fase della ricerca si è concentrata sull'analisi di casi studio di aziende manifatturiere, mettendo in luce come esse gestiscono le sfide legate alle scorte e al lead time a seconda del settore e delle materie prime acquistate. Per raccogliere dati empirici, sono stati utilizzati principalmente articoli di giornale, report di settore e specifiche sezioni di libri.

Per la sezione dedicata alla crisi del Mar Rosso, essendo un evento recente e in evoluzione, è stata svolta una ricerca mirata attraverso articoli di giornale e fonti di attualità, integrando tali

informazioni con l'esperienza diretta maturata lavorando nel team di logistica materie prime di un'azienda automotive.

La selezione delle fonti è avvenuta in base alla loro rilevanza e affidabilità, privilegiando documenti che fornissero una visione dettagliata delle strategie di approvvigionamento e gestione delle scorte.

2. Classificazione dei tipi di scorte

2.1 Classificazione in base allo stato di trasformazione

Nella gestione delle scorte, un ruolo fondamentale è svolto dalla loro classificazione. Tra i vari criteri utilizzati, uno dei più importanti è quello basato sullo stato di trasformazione, che permette di suddividere le merci in categorie omogenee per caratteristiche e finalità d'uso. All'interno del sistema produttivo, i materiali appena acquisiti dall'esterno assumono la veste di materie prime e vengono generalmente stoccati nel magazzino materie prime. La funzione primaria di queste scorte è quella di disaccoppiare le fasi di approvvigionamento e produzione, ossia consentire che i processi a monte e a valle del magazzino non debbano necessariamente essere sincronizzati perfettamente.

Quando una materia prima viene sottoposta a lavorazione, subendo la prima di una serie di trasformazioni che la porteranno allo stato di prodotto finito, assume lo status di semilavorato. Anche i semilavorati possono essere stoccati tra una lavorazione e l'altra. Fisicamente, possono essere ubicati nello stesso magazzino delle materie prime, in un magazzino separato o addirittura in spazi dedicati e adiacenti alle macchine che li hanno lavorati o che li lavoreranno. La funzione principale delle scorte di semilavorati è quella di disaccoppiare le fasi di lavorazione a monte e a valle del magazzino stesso.

Una volta completata la sua ultima lavorazione, il semilavorato si trasforma in prodotto finito. Anche i prodotti finiti possono essere stoccati. La funzione principale delle scorte di prodotti finiti è quella di disaccoppiare il processo di soddisfacimento della domanda da quello di produzione. [1]

2.2 Classificazione funzionale

Un altro modo di classificare le scorte è in base alla funzione che le scorte stesse vanno ad assumere nel sistema di produzione. De Groote (1994) discute cinque motivi per detenere scorte, ovvero per avere la linea di afflusso diversa dalla linea di deflusso:

- **Tempo di attraversamento del processo:** il tempo che un'unità di flusso impiega a passare attraverso il processo.
- **Domanda stagionale:** la domanda che varia a seconda della stagionalità del prodotto venduto.

- **Economie di scala:** il risparmio sui costi che si ottiene acquistando o producendo in grandi quantità.
- **Separazione delle fasi in un processo:** la suddivisione del processo in fasi distinte.
- **Domanda stocastica:** la domanda variabile e imprevedibile.

Scorte di processo

Le scorte di trasporto (pipeline inventory) sono la quantità di materiale che si trova all'interno di un processo in un dato momento. Esse sono inevitabili in quanto ogni unità di flusso necessita di tempo per essere trasformata dal processo (ad esempio da materia prima a prodotto finito). La legge di Little ci aiuta a calcolare la scorta di trasporto conoscendo il tempo di attraversamento e la velocità del flusso. Ridurre la scorta di trasporto è possibile solo diminuendo il tempo di attraversamento del processo. [2]

La scorta media (L) rappresenta la quantità media di unità di flusso presenti nel sistema in un dato momento.

La legge di Little si esprime nella seguente formula:

$$L = \lambda * T$$

- Velocità del flusso (λ): Il tasso medio di arrivo di nuove unità di flusso nel sistema.
- Tempo di attraversamento (T): Il tempo medio che un'unità di flusso impiega per attraversare il sistema.

Questa legge viene utilizzata per determinare il numero ottimale di scorte in WIP che garantiscono un flusso di produzione efficiente senza sovraccaricare il sistema produttivo.

Scorte stagionali

Le scorte stagionali rappresentano una strategia di gestione del magazzino adottata da aziende che sono costrette a fronteggiare fluttuazioni stagionali della domanda o della disponibilità stagionale delle materie prime. In entrambi i casi, è necessario adottare strategie mirate per ottimizzare i livelli di scorta, minimizzare i costi e massimizzare i profitti. Per far fronte alle fluttuazioni stagionali della domanda, le scorte sono accumulate durante i periodi di bassa domanda per soddisfare la domanda attesa durante i periodi di picco. Questa strategia mira a smussare la produzione rispetto alle vendite, evitando i costi elevati di un rapido adeguamento della capacità produttiva e garantendo una fornitura costante ai clienti. Risulta quindi di fondamentale importanza il tema della disponibilità delle materie prime. Il

problema principale in tale caso è il disallineamento tra la domanda costante e la disponibilità limitata di alcune categorie merceologiche (es. settore agro alimentare) in determinati periodi dell'anno. Mantenere scorte eccessive rischia infatti di provocare inefficienza nei processi di approvvigionamento aziendale (e in alcuni casi anche il deterioramento delle scorte). Dall'altro lato, scorte insufficienti possono portare a carenze e mancati guadagni [3].

Scorte ciclo o scorte di disaccoppiamento

Le scorte di ciclo servono a disaccoppiare due processi (l'approvvigionamento a monte e la domanda a valle). Disaccoppiare questi due processi significa permettere che approvvigionamento e domanda non debbano essere perfettamente sincronizzati. La figura 1 esplicita tale concetto.

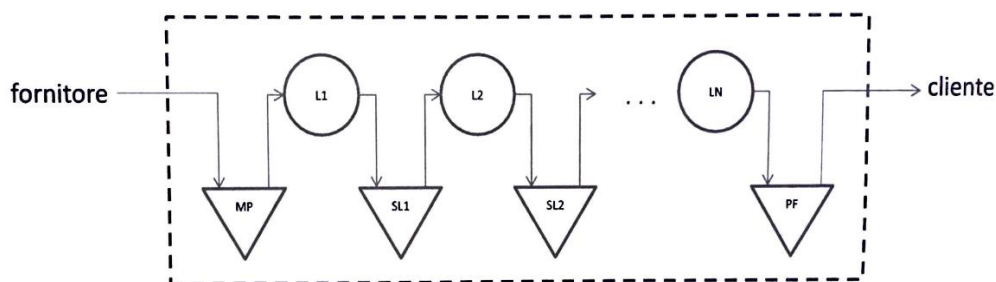


Figura 1 Schema semplificato di un sistema di produzione [1]

- La lavorazione L1 richiede unità, ma si ordinano lotti più grandi al fornitore per ridurre i costi di trasporto. Ciò è reso possibile grazie al magazzino di materie prime (MP).
- La lavorazione L(i+1) richiede un pezzo alla volta, ma la lavorazione a monte L(i) produce lotti per ridurre i tempi di setup dei macchinari. Ciò è reso possibile grazie al magazzino SL(i).
- Il cliente finale richiede quantità unitarie, ma la produzione L(N) avviene a lotti per ottimizzare la produzione. Ciò è reso possibile grazie al magazzino di prodotto finito (PF).

Da notare che le scorte ciclo non sono scorte che vengono create per far fronte all'incertezza della domanda e dei tempi di approvvigionamento. Infatti, tali scorte esistono anche in caso di domanda deterministica e tempi di approvvigionamento nulli.

Ad esempio, la figura 2 mostra l'andamento delle giacenze di un magazzino nel caso in cui la domanda sia deterministica e costante nel tempo ed il tempo di approvvigionamento sia nullo: quando non ci sono più pezzi in magazzino, la giacenza viene ripristinata tramite l'approvvigionamento istantaneo di un lotto di pezzi di grandezza Q . Le giacenze di magazzino seguono un andamento tipico a denti di sega, dove l'area sottesa alla curva rappresenta proprio le scorte di ciclo. Questo fenomeno non è dovuto a una domanda incerta o a tempi di approvvigionamento variabili (che in questo caso sono ipotizzati deterministici e nulli), ma piuttosto alla dinamica di approvvigionamento a lotti in contrasto con un consumo uniforme nel tempo.

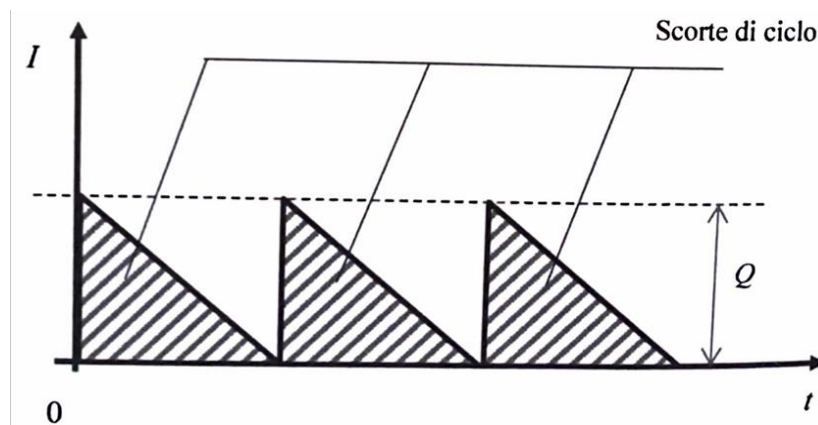


Figura 2 Scorte ciclo in caso di domanda deterministica e costante [1]

Scorte di sicurezza

Nelle dinamiche complesse della supply chain, l'incertezza rappresenta un fattore intrinseco in grado di generare diversi rischi, tra cui situazioni di stock-out, fluttuazioni della domanda e ritardi nei rifornimenti. Questi eventi possono avere un impatto negativo sulla continuità operativa delle aziende e sulla soddisfazione dei clienti. Le scorte di sicurezza rappresentano una strategia efficace per mitigare tali rischi e garantire una maggiore resilienza della supply chain. Queste consistono in scorte aggiuntive di prodotti detenute in magazzino al fine di far fronte a discrepanze tra la domanda effettiva e quella prevista. Rappresenta dunque un cuscinetto protettivo che consente di assorbire le variabilità e gli imprevisti che caratterizzano l'ambiente di business. [4]

Nella realtà difatti la domanda è un processo aleatorio a tutti i livelli del sistema di produzione ed eventuali picchi di domanda possono portare a stock out. Ecco che quindi può essere

necessario predisporre delle scorte per far fronte a questa incertezza. La figura 3 mostra l'effetto "cuscinetto" di tali tipologie di scorte al di sotto delle scorte ciclo.

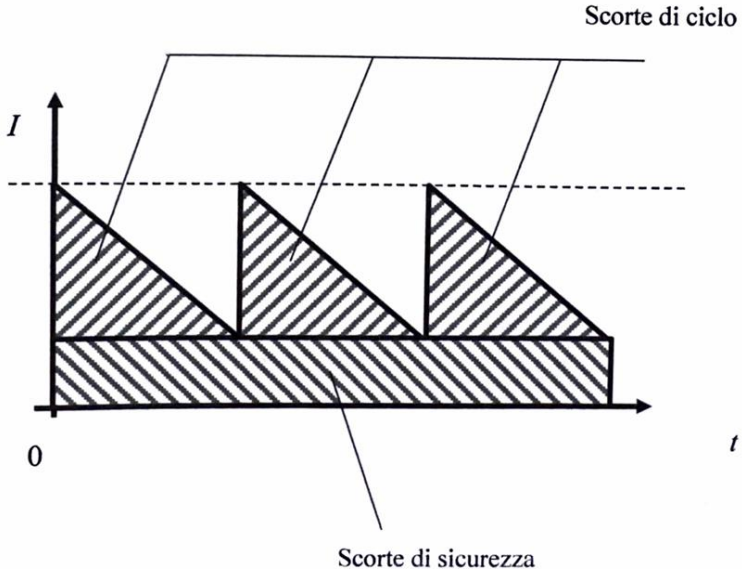


Figura 3 Scorte di sicurezza [1]

3. Modelli gestione scorte

3.1 Modelli con domanda costante e deterministica

La domanda di un bene si considera costante e deterministica quando è nota e non è variabile nel tempo. In questo contesto, l'adozione di modelli di gestione delle scorte adeguati è fondamentale per garantire un'efficiente pianificazione degli approvvigionamenti e minimizzare i rischi di stock-out o eccessi di scorte.

Questo capitolo si propone di sintetizzare i modelli di gestione delle scorte maggiormente utilizzati nel caso di domanda con variabilità trascurabile. Verranno analizzati i principi teorici alla base di tali modelli, le loro caratteristiche principali e le condizioni di applicabilità. Come illustrato nel primo capitolo, l'inventario rappresenta la scorta di beni destinati all'utilizzo futuro in un'azienda. Nel settore manifatturiero, l'inventario gioca un ruolo fondamentale per garantire la continuità e l'efficienza del processo produttivo. La gestione dell'inventario si occupa di trovare il giusto equilibrio tra la disponibilità di materiali e la minimizzazione dei costi di stoccaggio. [5]

3.1.1 Il lotto economico di riordino - EOQ

Il modello EOQ (Economic Order Quantity) è uno dei modelli di gestione delle scorte più utilizzati e rappresenta un punto di riferimento fondamentale per ottimizzare le politiche di approvvigionamento. L'obiettivo principale del modello EOQ è quello di determinare la quantità ottimale da ordinare (Q) al fine di minimizzare i costi totali relativi alla gestione delle scorte. Il modello mira, infatti, a determinare il trade off ottimale tra i costi di riempimento (costi collegati al lancio di un nuovo ordine) e i costi di mantenimento a scorta (costi da sostenere per mantenere item in magazzino).

L'EOQ (quantità di riordino ottimale) si può infatti interpretare come il numero di unità di un prodotto da ordinare in ciascun ciclo di rifornimento, che minimizza i costi complessivi. [5]

Sia la domanda dell'item scelto che il lead time di approvvigionamento, sono considerati deterministici e costanti.

Di seguito la formula utilizzata per trovare il valore dell'EOQ

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DA}{vr}}$$

Notazione:

D= domanda nel periodo di tempo scelto (Es. domanda annuale)

A=costo fisso di riempimento/riordino (Es [€/riempimento])

v=costo variabile unitario del materiale ordinato (Es. [€/unità])

r=tasso di mantenimento scorte

Il modello EOQ rimane invariato se cambiamo l'ipotesi sul Lead time di riempimento. Il modello rimarrà valido sia nel caso di lead time nulli sia nel caso di lead time maggiori di zero (ma sempre con l'ipotesi di lead time deterministici).

L'unico cambiamento che dovrà essere considerato consiste nel momento in cui viene lanciato l'ordine. Mentre nel caso di lead time nullo possiamo considerare che il materiale sarà immediatamente immesso nel magazzino dopo il lancio dell'ordine, nel caso di lead time maggiore di zero l'ordine dovrà essere rilasciato in anticipo. L'arrivo della merce dovrà avvenire nel momento in cui i livelli di scorta raggiungano lo zero, evitando così stock-out o eccessi di scorta (overstock).

3.1.2 Il lotto economico di riordino EPQ

Il modello di riordino EPQ (Economic Production Quantity) riprende in gran parte la teoria alla base dell'EOQ.

Viene però eliminata l'ipotesi del riempimento istantaneo. Infatti, nell'EOQ si assumeva che i prodotti ordinati arrivassero nello stesso istante all'interno del magazzino. Al contrario, nell'EPQ si assume che il prodotto sia immesso in magazzino con una cadenza pari ad m prodotti per unità di tempo (come avviene per esempio quando un macchinario, a seguito di un ordine, inizia a produrre e di conseguenza a versare nel magazzino a valle, con una cadenza definita dalla capacità del macchinario stesso). Il riempimento di magazzino in questo caso non è quindi istantaneo ma avviene con una cadenza pari alla differenza tra la cadenza di alimentazione del magazzino e la cadenza di prelievo del magazzino D .

$$EPQ = EOQ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{D}{m}}} = \sqrt{\frac{2DA}{vr\left(\frac{1}{1 - D/m}\right)}}$$

3.2 Modelli con domanda non costante e deterministica

Dopo aver discusso di modelli di gestione delle scorte basati sull'ipotesi di domanda deterministica e costante, verranno discussi brevemente i metodi più conosciuti per gestire una domanda deterministica ma variabile nel tempo.

3.2.1 Algoritmo di Wagner-Whitin

A tal proposito, uno dei metodi più famosi è quello studiato da Wagner e Whitin. L'algoritmo di Wagner-Whitin è una tecnica di programmazione dinamica utilizzata per risolvere il problema delle dimensioni ottimali degli ordini in un sistema di gestione delle scorte. Questo modello generalizza il più noto modello di quantità economica di ordinazione (EOQ), tenendo conto della variazione della domanda nel tempo. Fu introdotto da Harvey M. Wagner e Thomson M. Whitin.

Questo si basa sulle seguenti ipotesi di base:

- Riempimento solo quando l'inventario è nullo: L'algoritmo stabilisce che gli ordini dovrebbero essere effettuati solo quando l'inventario raggiunge lo zero. In altre parole, si ordina solo quando è necessario riempire l'inventario per evitare la carenza di prodotti.
- Limite superiore al numero di periodi di anticipo dell'ordine: L'algoritmo considera un limite massimo per il numero di periodi di anticipo dell'ordine rispetto al periodo in cui viene richiesto il prodotto. Questo limite è basato su considerazioni economiche. Infatti, mantenere troppo a lungo un inventario a scorta può comportare costi elevati, mentre ordinare troppo frequentemente può aumentare i costi di setup o di gestione dell'ordine.

Queste ipotesi sono state formulate dai due studiosi al fine di ridurre lo sforzo computazionale che risulta spesso notevole nei problemi di programmazione dinamica.

In questo caso invece, si riesce a determinare la soluzione di ottimo con uno sforzo computazionale relativamente basso.

Anche per questa metodologia, è necessario considerare i lead time di riempimento magazzino come deterministici e costanti, in modo tale che le consegne possano essere pianificate per arrivare all'inizio del periodo richiesto.

Lo scopo dell'algoritmo di Wagner-Whitin sarà quindi quello di determinare la sequenza

ottimale di ordini nel tempo, minimizzando i costi totali (trovando quindi il trade-off ottimale tra costi di mantenimento a scorta e costi di riordino/costi di set-up).

3.2.2 Metodi euristici

Esistono poi altri modelli, detti euristiche, che riescono a calcolare una buona soluzione senza però riuscire ad ottenere la soluzione ottimale (come avviene Wagner-Whitin). Il vantaggio di queste metodologie risiede nel fatto che richiedono uno sforzo computazionale nettamente inferiore rispetto agli algoritmi che generano la soluzione ottimale.

Alcune delle euristiche più conosciute sono le seguenti:

- **Silver-Meal:** raggiunge la soluzione puntando a minimizzare il costo totale nell'unità di tempo.
- **Least unit cost:** raggiunge la soluzione puntando a minimizzare il costo totale per unità ordinate.
- **Part period balancing (PPB):** raggiunge la soluzione cercando di bilanciare il più possibile i costi di riempimento e i costi di mantenimento a scorta (in trade-off tra loro).

3.3 Modelli con domanda probabilistica

A differenza di quanto ipotizzato nei metodi di gestione a scorta precedentemente menzionati, nella realtà la domanda di un bene non sarà, nella maggior parte dei casi, né nota né costante. Di conseguenza, in letteratura, sono stati sviluppati metodi di gestione delle scorte che considerano la domanda come una funzione probabilistica.

In questi modelli andrà quindi considerata la possibilità di stock-out, cosa invece impossibile nei modelli con domanda deterministica.

Nei modelli che verranno trattati di seguito, le decisioni relative al riordino sarà legata sia ai costi relativi al riempimento e al mantenimento a scorta, sia al livello di servizio che si vuole mantenere (probabilità di andare in stock-out).

3.3.1 Continuous Review

Questo modello si basa su un controllo continuo dell'inventario ed è noto anche come politica a punto di riordino.

Col passare del tempo, la disponibilità di magazzino diminuirà e, una volta raggiunto il punto fisso di riordino (prestabilito tramite le formulazioni teoriche del modello), verrà rilasciato un ordine per una quantità definita (sempre tramite il modello).

I due parametri fondamentali di questa politica sono quindi:

- **Punto di riordino:** valore di disponibilità di magazzino minima raggiunta la quale è necessario rilasciare un nuovo ordine.
- **Quantità di riordino:** quantità richiesta per ogni ordine di riempimento (che rimarrà costante per ogni riempimento).

L'intervallo di tempo che intercorre tra un ciclo di riempimento e quello successivo è variabile nel tempo da ciclo a ciclo. Questo dipenderà dalla domanda che si verifica durante ogni ciclo (che abbiamo ipotizzato essere variabile).

Essendo la domanda variabile, le aziende che adottano questo modello per la gestione delle scorte, dovranno cautelarsi da possibili variazioni della domanda durante il lead time. Infatti il lead time rappresenta il periodo che intercorre tra l'emissione dell'ordine e il suo ricevimento.

Esso è un parametro fondamentale in quanto rappresenta il periodo di incertezza. Una volta emesso l'ordine, l'azienda dovrà far fronte alla domanda solamente con la quantità di merce pari al punto di riordino. Minore sarà il Lead time, minore sarà il periodo nel quale l'azienda può essere impattata da possibili aumenti imprevisti della domanda. L'altra grandezza di fondamentale importanza sarà la domanda durante il lead time, definita nel modello con una funzione densità di probabilità con relativo valore medio e deviazione standard.

Il più grande punto di forza di questo modello è sicuramente la minimizzazione delle scorte di sicurezza e di conseguenza dei costi di mantenimento a scorta (reso possibile dal monitoraggio continuo dei livelli di scorta).

Tutto ciò comporta però delle complicazioni a livello operativo. Per riuscire ad implementare un controllo continuo del magazzino efficace, è necessario investire in tecnologie all'avanguardia (come un sistema informativo che comunica in tempo reale con gli strumenti utilizzati per carico e scarico della merce in magazzino).

Un altro possibile punto debole di questa politica è la variabilità relativa al tempo che passa tra un ordine e il successivo (che, come detto, dipende dalla domanda che si verifica ad ogni ciclo). Ciò non permette al fornitore di avere informazioni precise relative alla data del prossimo ordine. Non avendo un tempo di preavviso adeguato, il fornitore difficilmente riuscirà ad organizzare una spedizione veloce ed efficiente.

Inoltre, sempre a causa della variabilità del tempo tra un ordine e il suo successivo, non sarà

possibile per il fornitore organizzare spedizioni con trasporti in comune tra più item (cosa che porterebbe a una riduzione dei costi di trasporto).

3.3.2 Periodic Review

La politica di riordini Periodi Review, anche detta politica a periodo fisso di riordino, non prevede più il monitoraggio continuo dei livelli di scorta, come succedeva per la politica precedente.

Infatti, la disponibilità dell'item viene controllata solamente in istanti di tempo ben definiti. Questi istanti di tempo sono sempre separati da un intervallo di tempo ben preciso che prende il nome di periodo di riordino.

Durante questi istanti, viene osservata la quantità di materiale rimasto a scorta e, dopodiché, si emette un ordine di una certa quantità tale che la disponibilità di materiale raggiunga la “disponibilità obiettivo”.

Le due grandezze fondamentali di questa politica sono quindi:

- **Periodo di riordino (R):** definisce ogni quanto tempo si osserva il livello di scorta del magazzino e si emette l'ordine al fornitore
- **Disponibilità obiettivo (S):** il valore di disponibile al quale deve ritornare la disponibilità dell'item in seguito all'emissione dell'ordine

In questo caso, la quantità di materiale che viene richiesta ad ogni ordine risulterà variabile in quanto sarà variabile alla quantità presente in magazzino al momento dell'ordine. A differenza della politica Continuous review, qui l'intervallo di incertezza risulta più esteso. Infatti, la disponibilità obiettivo (S) dovrà coprire la domanda del periodo che dura $R + L$ (ossia dal lancio dell'ordine fino a lancio del nuovo ordine più il lead time che l'ordine impiega per arrivare in magazzino).

Il periodo di incertezza sarà uguale al periodo di riordino più il Lead time e rappresenta una grandezza fondamentale di questa politica.

L'altra grandezza caratteristica è la domanda durante il periodo di incertezza definita come una variabile aleatoria.

Come punto di forza bisogna menzionare i minori costi di implementazioni rispetto alla politica precedente. Infatti, non essendo necessario monitorare l'inventario in tempo reale ma solo in determinati momenti, non è necessario investire in tecnologie avanzate da implementare nel

magazzino.

Il fatto che gli ordini vengono emessi con cadenza regolare, fa sì che il fornitore riesce ad organizzare in anticipo le spedizioni efficientando il processo (lead time più brevi e minori costi di lancio dell'ordine).

Inoltre, nell'eventualità che il fornitore sia responsabile della spedizione di più materiali diversi, basterà scegliere un periodo di riordino in comune tra più articoli per riuscire ad aggregare questi nello stesso ordine. Ciò permette di diminuire i costi di trasporto. Al contrario di quello che succede nella politica Continuous Review, la debolezza più grande sta nel lungo periodo di incertezza che costringe l'azienda a mantenere a magazzino livelli di scorte di sicurezza elevati (e di conseguenza, costi di mantenimento a scorta elevati).

4. Lead time

4.1 Definizione del concetto di Lead time

In linea generale, il lead time può essere definito come il periodo di tempo che va dall'inizio di un'attività fino al suo completamento.

Entrando nel dettaglio e focalizzandosi nel settore manifatturiero, le principali tipologie di lead time sono le seguenti:

- **Lead time di approvvigionamento:** tempo necessario per reperire le materie prime e i componenti essenziali per la realizzazione del prodotto. Tanto più il lead time di approvvigionamento sarà ridotto, tanto più l'azienda risulterà snella ed efficiente.
- **Lead time di produzione interna:** tempo impiegato per trasformare le materie prime in prodotto finito. Ottimizzare questo processo significa ridurre gli sprechi e aumentare la produttività.
- **Lead time di collaudo:** tempo dedicato al testing e alla verifica del prodotto al fine di garantirne la qualità e la conformità agli standard. Maggiore sarà l'accuratezza del collaudo, minore sarà il numero di difetti sul prodotto finito.

Focalizzandosi invece sulla catena che lega i fornitori e i clienti, il lead time è inteso come periodo che intercorre tra l'emissione di un ordine d'acquisto e il suo arrivo nel luogo prestabilito. Nello specifico esso è costituito da:

- **Lead time di ordine:** tempo impiegato per elaborare un ordine ricevuto da un cliente (dalla ricezione dell'ordine fino alla conferma della sua evasione).
- **Lead time di trasporto:** tempo impiegato per spedire le merci dal magazzino del fornitore al magazzino del cliente.
- **Lead time di dogana:** tempo necessario per le procedure doganali e i controlli di import-export.

Infine, all'interno del project management, il lead time rappresenta il tempo che intercorre tra l'avvio di un'attività e il suo completamento. Esso fornisce quindi una misura concreta dell'efficienza e della produttività del team di progetto e si dirama in:

- **Lead time di pianificazione:** tempo impiegato per definire il piano del progetto, con obiettivi, attività, tempi e risorse ben definiti.
- **Lead time di esecuzione:** tempo impiegato per completare le attività previste nel piano del progetto.
- **Lead time di collaudo e accettazione:** tempo necessario per testare il progetto e verificarne il completamento con successo.

I fattori che influenzano il lead time di pianificazione includono anzitutto la complessità del progetto: progetti più complessi richiedono un tempo di pianificazione maggiore per definire tutti i dettagli e le interdipendenze tra le attività. Altri aspetti fondamentali sono la disponibilità delle informazioni e l'esperienza del team.

Al fine di coordinare tutti i processi aziendali e i relativi lead time, il Supply Chain Management (SCM) rappresenta una funzione strategica di primaria importanza.

In generale, il Supply Chain Management (SCM) è un processo strategico che gestisce il flusso di materiali, informazioni e risorse finanziarie all'interno di una rete di aziende interconnesse. L'obiettivo del SCM è quello di ottimizzare l'intera catena di approvvigionamento, dalla ricerca e sviluppo delle materie prime alla consegna del prodotto finito al cliente finale. [6]

4.2 Approvvigionamento

La funzione di approvvigionamento non è una novità nel mondo degli affari. Le sue origini risalgono a migliaia di anni fa, come dimostra una recente scoperta in Siria. Una tavoletta di argilla rossa risalente al periodo compreso tra il 2.400 e il 2.800 a.C. riporta il più antico ordine di acquisto mai rinvenuto. [7]. Un'altra testimonianza storica di pratiche di approvvigionamento è l'accordo commerciale tra Cina e Grecia dell'800 a.C. per il commercio della seta. Tuttavia, a quei tempi non esistevano figure professionali dedicate all'approvvigionamento. La fornitura di beni e servizi per il governo era affidata ad agenti di commissione, che non acquistavano direttamente, ma agivano per conto del governo e venivano compensati con una percentuale sugli acquisti che effettuavano. [8].

Nel corso dei secoli, la funzione di approvvigionamento ha compiuto un'evoluzione radicale, trasformandosi da un'attività meramente operativa ad un pilastro strategico per le aziende, soprattutto nel settore manifatturiero. La nascita di dipartimenti acquisti dedicati ha permesso di strutturare e organizzare in modo più efficiente questo processo fondamentale, ottimizzando i costi e massimizzando il valore per l'impresa. Ad oggi, tale attività costituisce spesso oltre il 60% del costo dei prodotti finiti e rappresenta uno degli aspetti più critici nella catena di fornitura del settore manifatturiero [9]. Inoltre, l'impatto finanziario

dell'approvvigionamento influenza la stabilità del budget e il profitto di tutti i partner commerciali coinvolti [10].

Per il processo di alimentazione della catena produttiva le aziende tendono sempre più a esternalizzare le forniture (outsourcing).

Le ragioni dietro a questa scelta possono essere molteplici. Una delle più impattanti è sicuramente la possibilità di ridurre i costi aziendali. L'esternalizzazione di attività come la produzione di componenti o la logistica consente di ridurre i costi fissi e variabili, beneficiando dell'impiego di manodopera a basso costo o di competenze specialistiche esterne. Inoltre, l'outsourcing offre un incremento della flessibilità aziendale, consentendo di adattare la capacità produttiva e la struttura organizzativa alle variazioni della domanda o ai cambiamenti del mercato.

Aumentando le attività in outsourcing, l'azienda sarà libera di focalizzarsi sul suo core business e concentrarsi sulle attività strategiche migliorando la propria efficienza e competitività.

Infine, spesso gestire attività attraverso l'outsourcing, dà accesso a competenze specialistiche che potrebbero non essere disponibili all'interno dell'azienda. Tuttavia, tra le conseguenze dell'outsourcing, troviamo anche potenziali svantaggi.

Tra questi, la perdita di controllo. L'esternalizzazione di alcune attività può comportare una perdita di controllo sulla qualità, sui tempi di consegna e sulla gestione dei processi.

Ciò può portare anche al rischio di dipendere dai fornitori. Un eccessivo ricorso all'esternalizzazione può creare una forte dipendenza dai fornitori esterni, con conseguenti rischi per la continuità operativa e la competitività dell'azienda.

Infine, avere attività esternalizzate comporta difficoltà di comunicazione e coordinamento con l'ente esterno. La collaborazione con i fornitori, infatti, può generare difficoltà di comunicazione, coordinamento e integrazione dei processi.

Nonostante la notevole importanza della fase d'approvvigionamento e nonostante l'ampia letteratura pubblicata sugli acquisti nel settore privato [11], i reparti acquisti spesso rimangono ancorati a un modello tradizionale, più simile a un ufficio ordini che a una moderna unità di gestione degli approvvigionamenti. Di conseguenza, il potenziale di ottimizzare il sistema di acquisti e migliorare i margini di profitto viene spesso trascurato. [6]

A tal proposito, uno studio condotto su una fonderia di alluminio in Indonesia ha come obiettivo la massimizzazione dei propri profitti attraverso una maggiore efficienza operativa. Ottimizzando il SCM tramite il lavoro condotto dal reparto acquisti, si mira a ridurre i tempi di

consegna e quindi a velocizzare l'incasso dei crediti, portando quindi a un miglioramento dei flussi di cassa.

Al fine di identificare i problemi principali nel processo di approvvigionamento e definire soluzioni efficaci e applicabili a svariati settori aziendali, si possono sfruttare le seguenti metodologie.

Analisi Ishikawa (diagramma a spina di pesce) rappresenta un metodo prezioso per individuare le potenziali cause di un problema complesso, come, ad esempio, il lead time eccessivamente prolungato nel processo di approvvigionamento. Attraverso una discussione con esperti del settore, è possibile scomporre il problema in cause primarie e secondarie, facilitando la comprensione e l'individuazione di soluzioni mirate.

Dopo aver identificato le potenziali cause del problema, la tecnica dell'analisi dell'albero dei guasti viene spesso utilizzata per approfondire le relazioni tra le diverse cause e per individuare i punti critici del processo. Attraverso questo metodo, è possibile identificare le politiche specifiche che necessitano di miglioramento per ottimizzare il lead time del processo di acquisto.

L'analisi dell'albero dei guasti si basa su due elementi chiave. Il primo è il benchmarking che consiste nel confrontarsi con le pratiche di altre aziende del settore al fine di individuare le migliori strategie e di trarre ispirazione da esperienze già validate.

Il secondo è il giudizio di esperti. Infatti, l'opinione e la conoscenza di esperti del settore, offrono una prospettiva preziosa per l'analisi del problema e l'identificazione di soluzioni efficaci. [6]

L'applicazione combinata di queste due metodologie consente di ottenere una visione completa e strutturata dei problemi nel processo di approvvigionamento, facilitando l'individuazione di soluzioni efficaci.

Identificando le criticità e i relativi punti di miglioramento, è possibile implementare un approvvigionamento strategico efficace.

L'approvvigionamento strategico non si limita a un semplice processo di acquisto gestito dal reparto acquisti o sourcing, ma rappresenta un approccio organizzativo complessivo che coinvolge tutte le aree funzionali e i dipartimenti aziendali. Si tratta di definire strategie a lungo termine per garantire un approvvigionamento tempestivo di beni e servizi essenziali per il raggiungimento degli obiettivi di business dell'organizzazione. [12]

Le principali fasi dell'approvvigionamento strategico sono le seguenti:

- Benchmarking e valutazione dei bisogni: l'approvvigionamento strategico inizia con la valutazione delle prestazioni correnti e l'identificazione dei bisogni e degli obiettivi dell'organizzazione. Ciò comporta l'analisi dei costi, delle risorse e delle previsioni di crescita.
- Valutazione del mercato dei fornitori: il team acquisti valuta il mercato dei fornitori e raccoglie informazioni sui potenziali fornitori per i beni o servizi richiesti.
- Formulazione e implementazione della strategia: tenendo conto degli obiettivi organizzativi, l'organizzazione formula e implementa una strategia di approvvigionamento selezionando e sviluppando potenziali fornitori.
- Negoziazione e transizione: che prevede la negoziazione e l'implementazione di un piano di transizione con il/i fornitore/i scelto/i.

4.3 Categorie di Lead time

In generale, il primario impatto sulle prestazioni produttive di un'azienda dipende in gran parte dalle performance sui tempi di consegna in fase di approvvigionamento (procurement lead-time).

Esistono tre categorie principali di lead time che verranno discusse nel dettaglio nei paragrafi seguenti:

- Lead time deterministico
- Lead time variabile
- Lead time dipendente dalla quantità ordinata

4.3.1 Lead time deterministico

In questo caso, il lead time ha un valore fisso e predefinito, a prescindere dalle fluttuazioni della domanda o dalle dimensioni dell'ordine. Ciò significa che il tempo necessario per ricevere i beni o i servizi è sempre lo stesso, indipendentemente da quanto viene ordinato. Questo tipo di lead time è tipico per prodotti standardizzati o processi produttivi altamente automatizzati. Un lead time di consegna può essere considerato deterministico quando è prevedibile con elevata precisione e non soggetto a variazioni significative. In questo caso, è possibile pianificare con certezza le attività a valle, come la produzione o la distribuzione, senza dover tenere conto di possibili ritardi o anticipi.

Caratteristiche principali

- **Elevata prevedibilità:** la tempistica di consegna è stimabile con elevata accuratezza, minimizzando l'incertezza e consentendo una pianificazione precisa delle attività a valle.
- **Scarsa variabilità:** le fluttuazioni del lead time sono minime, evitando interruzioni nei flussi di lavoro e garantendo una maggiore stabilità nella supply chain.
- **Fattori controllati:** le variabili che influenzano il lead time sono per lo più sotto il controllo dell'azienda, come la capacità produttiva interna, la disponibilità di fornitori affidabili o l'utilizzo di mezzi di trasporto dedicati.
- **Processi standardizzati:** le procedure di approvvigionamento, produzione e consegna sono ben definite e standardizzate, riducendo al minimo la possibilità di errori o ritardi imprevisti.
- **Tecnologia affidabile:** vengono impiegati sistemi e tecnologie avanzate per la gestione degli ordini, il monitoraggio delle spedizioni e la comunicazione con i fornitori, garantendo un flusso informativo preciso e tempestivo.

Numerose ricerche dimostrano che la riduzione del lead time e l'implementazione di politiche di gestione dell'inventario volte a minimizzare i rischi, contribuiscono ad un significativo miglioramento dell'efficienza in questo ambito.

Vantaggi principali

- **Riduzione delle scorte di sicurezza:** ciò è possibile grazie alla certezza sui tempi di approvvigionamento.
- **Miglior livello di servizio clienti:** consente di rispondere alle fluttuazioni della domanda in modo più rapido ed efficace, minimizzando i tempi di attesa e aumentando la soddisfazione dei clienti.
- **Riduzione dei costi di inventario:** un minor livello di scorte di sicurezza si traduce in una diminuzione dei costi associati allo stoccaggio, come quelli di magazzino, assicurazione e obsolescenza.
- **Maggiore flessibilità e capacità di adattamento:** un lead-time più breve permette di reagire più tempestivamente a cambiamenti imprevisti nella domanda o nell'offerta, migliorando la flessibilità e la capacità di adattamento dell'azienda.

- **Migliore coordinamento della supply chain:** un lead-time ridotto facilita la sincronizzazione tra le diverse fasi della supply chain, ottimizzando i flussi di materiali e riducendo i tempi di consegna complessivi.

Svantaggi principali

Sebbene la riduzione del lead time offra numerosi vantaggi, è importante sottolineare che non è priva di rischi e costi aggiuntivi [13]

- **Aumento dei costi di acquisto:** un lead-time più breve può comportare ordini più frequenti e di dimensioni inferiori, con conseguenti costi di trasporto e acquisto più elevati per unità di prodotto. Inoltre, i fornitori potrebbero applicare un sovrapprezzo per ordini urgenti o a breve termine, sfruttando la necessità dell'azienda di approvvigionarsi rapidamente.
- **Problemi di disponibilità delle forniture:** un lead-time ridotto potrebbe esporre l'azienda a potenziali problemi di disponibilità delle forniture, soprattutto se la domanda supera la capacità produttiva del fornitore nel breve periodo. Ciò può causare stock-out e ritardi nella produzione, con conseguenti perdite di vendite e insoddisfazione dei clienti.

Tuttavia, è importante sottolineare che non esiste un lead time completamente deterministico. Fattori esterni, come eventi meteorologici estremi, scioperi dei trasporti o fluttuazioni della domanda, possono sempre causare ritardi imprevisti.

4.3.2 Lead time variabile

La maggior parte dei modelli di gestione delle scorte tiene conto della variabilità della domanda, ma molti meno considerano la variabilità dei tempi di consegna, in particolare nelle reti di supply chain multi-echelon. Una supply chain multi-echelon, spesso chiamata anche supply chain a più livelli, è una rete di strutture distribuite in cui i materiali e i prodotti vengono stoccati e trasportati tra diversi livelli o scaglioni.

In una supply chain tradizionale a singolo echelon, i beni vengono tipicamente spostati da un fornitore direttamente al cliente finale. Al contrario, una supply chain multiechelon include diversi livelli di intermediari, come magazzini regionali, centri di distribuzione e persino

negozi al dettaglio. [14]

Nella realtà aziendale il lead time di consegna raramente si configura come un valore fisso e deterministico. Al contrario, esso è spesso soggetto a variabilità, influenzato da una molteplicità di fattori interni ed esterni. Tale variabilità introduce un elemento di incertezza nella supply chain, con ripercussioni significative sulla pianificazione, l'approvvigionamento e la gestione delle scorte [15].

Caratteristiche principali

- **Imprevedibilità:** il tempo di approvvigionamento varia in modo casuale e, di conseguenza, spesso non può essere previsto con precisione.
- **Dipendenza da Fattori Esterni:** può essere influenzato da una vasta gamma di fattori esterni come ritardi nei trasporti, problemi di produzione, variazioni nella domanda o anche problemi geopolitici.

Svantaggi principali

- **Incerteza:** difficoltà nella pianificazione e nel controllo dei livelli di scorta a causa della mancanza di prevedibilità.
- **Rischio di Rotture di Stock:** maggiore rischio di stock-out dovuto all'incertezza del lead time e della relativa domanda durante il lead time.
- **Aumento dei costi di acquisto:** avere lead time variabile comporterà un maggior numero di situazioni di rischio stock-out e di conseguenza un maggior numero di richieste di spedizioni urgenti. Come detto in precedenza, questo potrebbe portare a un sovrapprezzo richiesto da parte dei fornitori.

Uno studio condotto tra il 1979 e il 1980 sull'Air Force Logistics Command (AFLC), l'ente responsabile della gestione delle scorte e del supporto logistico per l'aeronautica militare statunitense, evidenzia l'importanza della variabilità del lead time nella gestione delle scorte [16]. L'AFLC, con migliaia di dipendenti e un budget di miliardi di dollari, operava un'articolata rete di magazzini, officine e centri di distribuzione a livello globale. La sua funzione principale consisteva nell'acquistare, immagazzinare e distribuire beni e servizi alle varie unità dell'aeronautica in tutto il mondo, rispettando le tempistiche necessarie. Questa gestione complessa comportava la necessità di affrontare numerose sfide, tra cui la variabilità del tempo

di consegna, che poteva influire significativamente sull'efficacia operativa e sulla disponibilità delle risorse. Per svolgere il suo lavoro, l'AFLC doveva affrontare numerose sfide, tra cui

- Prevedere la domanda di beni e servizi da parte dell'aeronautica;
- Gestire le scorte in modo da evitare stock-out o eccessi di magazzino;
- Trasportare beni e servizi in modo efficiente e sicuro;
- Mantenere le attrezzature e i sistemi in funzione con il minimo di tempi di fermo;
- Smaltire i beni e i servizi non più necessari in modo ecocompatibile.

L'Air Force Logistics Command impiegava un modello "random-walk" per stimare il lead time, fondato sull'ultimo tempo di consegna rilevato per ogni articolo. Tuttavia, questo approccio risultava inadeguato nel cogliere la complessità della variabilità del lead time, poiché non era in grado di adattarsi ai cambiamenti, come le fluttuazioni della domanda o le modifiche nei processi di approvvigionamento. Lo studio ha quindi proposto l'adozione di distribuzioni di probabilità come la gamma, la log-normale, la normale o la Weibull per rappresentare il lead time in maniera più accurata. Queste distribuzioni permettono di modellare meglio la variabilità e di ottenere previsioni più affidabili.

In generale, nei contesti in cui la variabilità del lead time è particolarmente vincolante, la spedizione accelerata può emergere come una strategia utile per mitigare gli effetti negativi della variabilità dei tempi di consegna, permettendo al rivenditore di ricevere l'ordine in un periodo di tempo garantito più breve. A tal proposito Kouvelis e Tang [17] studiano come la variabilità dei tempi di consegna influenzi la decisione di un rivenditore di richiedere una spedizione accelerata.

Gli autori sviluppano un modello per determinare la politica di accelerazione ottimale. Lo studio dimostra che tempi di consegna più variabili porterebbero a un uso più ampio della spedizione accelerata. Infatti, dopo aver osservato la durata effettiva della prima fase di rifornimento, il rivenditore può decidere di chiedere al fornitore di accelerare l'ordine per riceverlo in un periodo garantito inferiore al valore atteso della seconda fase.

Generalmente, i lead time possono variare per molteplici ragioni, come la complessità dell'ambiente aziendale, e queste fluttuazioni causano svantaggi per tutti i partecipanti della SC. La riduzione dell'incertezza sui tempi di consegna può diminuire i costi di inventario a valle. Sulla base della definizione di lead time, molte aziende hanno utilizzato strategie di controllo dei tempi di consegna per creare un vantaggio competitivo, riducendo al contempo il livello di scorta di sicurezza e i casi di stock out [18].

Nella letteratura, i principali modelli di gestione delle scorte più utilizzati per lead time variabile sono:

- **Modello a Punto di Riordino con Lead Time Variabile (S-ROP):** questo modello estende il modello a Punto di Riordino (ROP) classico incorporando la variabilità del lead time nel calcolo del livello di riordino.
- **Modello a Periodi Fissi con Lead Time Variabile:** in questo modello, gli ordini di acquisto vengono effettuati ad intervalli di tempo regolari, ma la dimensione dell'ordine viene adattata in base alla domanda prevista e al lead time stimato.
- **Modelli basati su simulazione:** i modelli di simulazione possono essere utilizzati per valutare l'impatto di diverse strategie di gestione delle scorte su un sistema con lead time variabile.

Diversi studi hanno inoltre analizzato l'impatto dei lead time variabili sulle decisioni operative della SC e hanno proposto modelli più avanzati e utilizzabili dipendentemente dal contesto per ottimizzare le politiche di rifornimento e coordinare i membri della SC:

- Modelli basati su costi di setup ridotti per ridurre i tempi di preparazione e migliorare la risposta della SC in ambienti con lead time variabili [19].
- Modelli che considerano sconti sui prezzi e riduzioni dei lead time concessi dal fornitore in cambio dell'accettazione, da parte dell'acquirente, di ordini arretrati (backorder) in caso di indisponibilità temporanea del prodotto. [20].
- Modelli che studiano l'effetto della riduzione dei lead time e dei costi di ordinazione aumentando i costi di mantenimento delle scorte [21].

La maggior parte dei modelli della supply chain suggerisce che le prestazioni e l'affidabilità sul lead time nei processi a monte siano più importanti di quelle a valle, perché influenzano più profondamente l'efficienza della SC [22].

Per capire a pieno come ogni anello che compone la catena di approvvigionamento sia influenzabile dagli anelli precedenti, e influenzi a sua volta quelli successivi, è possibile immaginare la catena di approvvigionamento come una staffetta. In questa staffetta, il testimone (la domanda) viene passato da un magazzino all'altro, dal negozio di alimentari al fornitore all'ingrosso, fino al produttore.

Questo effetto a catena, noto come effetto frusta (Bullwhip effect), è particolarmente accentuato in situazioni di forte correlazione delle fasi.

I due fattori principali che contribuiscono all'effetto frusta sono la domanda casuale e i tempi di consegna casuali. [23].

Se domanda e lead time sono entrambi variabili aleatorie, prevedere e quantificare l'effetto frusta risulta fondamentale per piazzare gli ordini in maniera strategica. In uno studio condotto nel 2019 [23] i ricercatori dimostrano che la previsione del lead time è un fattore determinante dell'effetto Bullwhip, soprattutto quando la domanda è autocorrelata. Dunque, è fondamentale raccogliere informazioni non distorte per le previsioni, basandosi solo sui lead time realizzati.

Impatto degli eventi geopolitici sulla variabilità del Lead Time: Il caso della crisi del Mar Rosso

Come anticipato, uno dei fattori che può rendere estremamente variabile il lead time è l'instabilità geopolitica. Conflitti regionali o tensioni internazionali, possono alterare significativamente le rotte commerciali e rallentare la catena di approvvigionamento di qualsiasi azienda manifatturiera, indipendentemente dal settore in cui essa operi. Il più recente esempio concreto di tale impatto è la crisi geopolitica nella regione del Mar Rosso iniziata a dicembre 2023. [24]



Figura 4 Mar Rosso [24]

Il Mar Rosso ed in particolare lo stretto di Bab el-Mandeb e il Canale di Suez sono collegamenti vitali lungo la principale rotta marittima del mondo tra Asia ed Europa.

L'Organizzazione Marittima Internazionale (IMO) stima che fino a un quarto del traffico marittimo mondiale passi lungo questa tratta, si parla di diversi miliardi di tonnellate di merci ogni anno, questo include circa 4,5 milioni di barili di petrolio al giorno che provengono dai paesi del Golfo Persico e dell'Asia. A partire da dicembre 2023, gli attacchi Houthi sulle principali rotte marittime della regione ha causato un aumento del rischio percepito per le operazioni di trasporto e logistica, rendendo il lead time di consegna sempre più variabile e incerto, difatti, anche se inizialmente gli attacchi erano mirati alle esclusivamente alle navi in transito da e verso Israele, numerose altre navi commerciali, senza evidenti legami con lo stato israeliano, sono state attaccate. A causa dell'aumento dei rischi, le compagnie marittime sono state costrette a deviare le rotte verso percorsi più sicuri, in particolare circumnavigando l'Africa attorno al Capo di Buona Speranza, il che ha esteso il lead time di circa 20-30 giorni. I principali impatti sul lead time e sulla supply chain:

- **Aumento dei costi di trasporto:** le deviazioni hanno influito significativamente sui costi operativi. Il costo medio per container da 40 piedi è passato da una fascia compresa tra \$1,900 e \$2,400 a picchi di \$10,000. Questo aumento ha determinato non solo un lead time più lungo, ma anche una maggiore incertezza nelle previsioni di consegna.
- **Assicurazioni e rischi maggiorati:** a causa dei maggiori rischi associati all'area, i premi assicurativi sono aumentati esponenzialmente, costringendo le aziende a considerare alternative più costose, come il trasporto aereo, per mantenere il livello di servizio.
- **Effetti ambientali:** la necessità di percorrere rotte più lunghe ha comportato un incremento nel consumo di carburante e nelle emissioni di carbonio, accentuando l'impatto negativo sul clima, e mettendo in discussione gli sforzi globali verso la sostenibilità.
- **Ritorno a politiche di onshoring:** a causa del protrarsi del periodo di tale crisi una conseguenza di lungo termine è il ritorno alle politiche di onshoring, ovvero il processo attraverso il quale un'azienda o un governo decide di riportare all'interno del proprio paese (o in un'area geografica più vicina) attività produttive o servizi che erano precedentemente delocalizzati all'estero, spesso in paesi con costi di manodopera più bassi. L'obiettivo principale dell'onshoring è ridurre la dipendenza da fornitori esteri e

aumentare la sicurezza e la resilienza delle catene di approvvigionamento. [25]

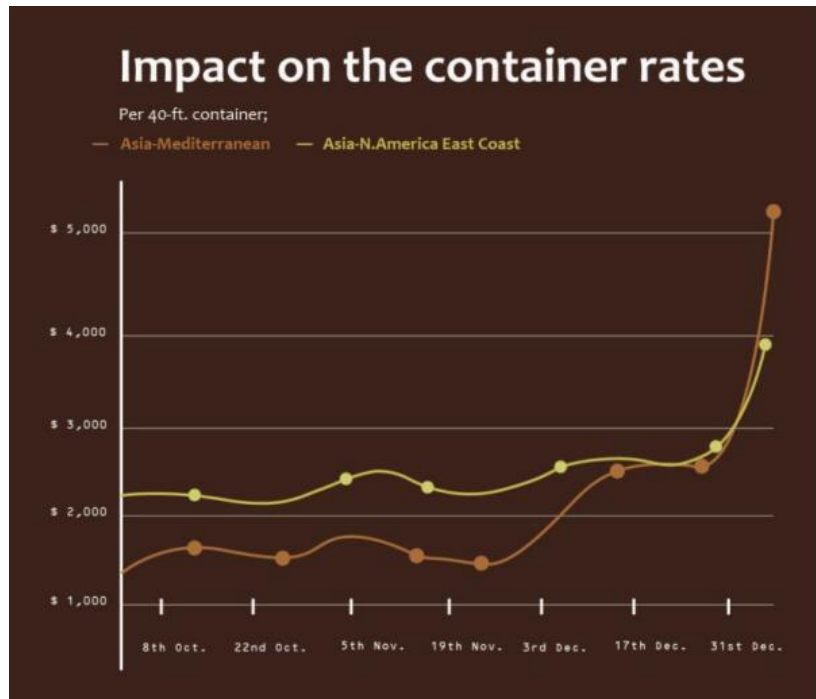


Figura 5 Andamento costo unitario per container [26]

Oltre alla crisi del Mar Rosso, tra i principali eventi geopolitici che hanno provocato periodi di forte discontinuità nelle catene di approvvigionamento nell'ultima decade abbiamo [26]:

1. Blocco del Canale di Suez (2021)

Evento avvenuto nel marzo 2021, quando la nave portacontainer *Ever Given* si incagliò, bloccando completamente il traffico per sei giorni. Come anticipato, il Canale di Suez è una delle rotte commerciali più trafficate al mondo, e l'evento ha causato ritardi significativi per migliaia di navi che trasportavano merci essenziali, inclusi petrolio e materie prime.

L'interruzione ha aumentato i tempi di consegna e i costi di spedizione a livello globale, facendo emergere la vulnerabilità delle supply chain mondiali a singoli eventi imprevedibili.

2. Guerra Commerciale USA-Cina (2018-2020)

La guerra commerciale tra Stati Uniti e Cina, iniziata nel 2018 sotto l'amministrazione Trump, ha portato a tariffe più alte su una vasta gamma di beni importati, rallentando il flusso delle merci tra le due potenze economiche. Molte aziende manifatturiere che dipendevano dalle forniture cinesi si sono trovate ad affrontare ritardi nelle consegne a causa delle incertezze doganali e dell'aumento dei costi di trasporto. Questo ha costretto molte imprese a rivedere le loro strategie di approvvigionamento, cercando fornitori alternativi in altre regioni.

3. Brexit (2020-2021)

La Brexit ha introdotto cambiamenti significativi nelle relazioni commerciali tra il Regno Unito e l'Unione Europea. L'introduzione di nuovi controlli doganali, norme e regolamentazioni ha portato a ritardi nelle spedizioni, in particolare per le aziende che operavano con catene di approvvigionamento just-in-time. Alcuni settori, come quello automobilistico e farmaceutico, sono stati gravemente colpiti dai ritardi doganali.

4. Pandemia di COVID-19 (2020-presente)

La pandemia ha avuto un impatto devastante sulle supply chain globali. Le restrizioni ai trasporti, le chiusure delle frontiere e i lockdown imposti in tutto il mondo hanno causato un notevole rallentamento della produzione e delle consegne di merci. Molte aziende hanno subito ritardi prolungati nel ricevere materie prime e componenti critici, il che ha aumentato il lead time. Inoltre, la carenza di container e il sovraccarico dei porti hanno ulteriormente aggravato la situazione.

5. Conflitto Russia-Ucraina (2022-presente)

L'invasione russa dell'Ucraina ha avuto un impatto significativo sulle catene di approvvigionamento globali, specialmente nel settore energetico e agricolo. L'Ucraina è un importante produttore di grano e fertilizzanti, mentre la Russia è uno dei principali esportatori di petrolio e gas. Le sanzioni contro la Russia e la chiusura di importanti rotte di trasporto hanno provocato ritardi nelle consegne di materie prime essenziali e un incremento esponenziale dei prezzi dell'energia, aggravando ulteriormente la variabilità del lead time.

Da questi eventi geopolitici emerge che ogni azienda dovrebbe considerare i "cigni neri" come eventi che, sebbene rari, possono ripetersi ciclicamente. Pertanto, è essenziale essere preparati a adottare approcci specifici per mitigare le conseguenze di tali eventi sulle loro supply chain. La gestione efficace di questi rischi richiede una combinazione di strategie e tecnologie innovative. Innanzitutto, è fondamentale diversificare i fornitori, collaborando con partner in diverse regioni per ridurre la dipendenza da una singola area geografica esposta agli eventi geopolitici. Inoltre, semplificare la complessità della supply chain permette di aumentare la flessibilità e ridurre il rischio di interruzioni. Un altro approccio chiave consiste nell'implementare soluzioni tecnologiche avanzate, come sistemi di monitoraggio in tempo reale e intelligenza artificiale. Sempre più aziende adottano questi strumenti per garantire una tracciabilità continua delle materie prime, consentendo loro di prevedere e rispondere rapidamente a eventuali interruzioni. Infine, è necessario sviluppare piani di contingenza e

gestione del rischio, mantenendo scorte di sicurezza e stabilendo accordi logistici alternativi per garantire la continuità operativa anche in situazioni impreviste.

4.3.3 Lead time dipendente dalla quantità ordinata:

In alcuni contesti, il lead time di consegna ordini non è fisso ma dipende dalla quantità ordinata. Questo fenomeno, noto come lead time dipendente dalla quantità ordinata (QDL), complica la gestione delle scorte e richiede strategie di approvvigionamento specifiche. Per varie ragioni il lead time può variare in base alla quantità ordinata:

- **Economie di scala:** I fornitori spesso applicano sconti per ordini più grandi, incentivando l'acquisto di quantità elevate. Tuttavia, la produzione o l'approvvigionamento di grandi lotti richiede tempi maggiori.
- **Capacità di produzione limitata:** I fornitori con una capacità produttiva limitata potrebbero dare priorità agli ordini più grandi, allungando i tempi di consegna per quelli più piccoli.
- **Logistica e trasporto:** Spedire grandi quantità di merci può richiedere tempi di carico, trasporto e sdoganamento più lunghi rispetto a spedizioni più piccole ma al contempo potrebbe permettere di trovare soluzioni di trasporto con costo unitario più basso.

Nelle ultime due decadi, diversi autori hanno esaminato casi studio reali in cui il lead time risultava essere dipendente dalla quantità ordinata. Il lavoro degli esperti ha avuto il fine di estrapolare i principi chiave di tale correlazione, formalizzarli in un quadro teorico e sviluppare modelli applicabili a un'ampia gamma di contesti produttivi. Nel 1998, per la prima volta, uno studio valuta la possibilità che il lead time possa cambiare in base alla quantità ordinata, questa modifica è interpretata come tentativo di “cambiare i dati di base” (chiamati anche "givens"), cioè i parametri che in genere si assumono fissi. [27].

Un altro studio, svolto anch'esso nell'ultima decade del XX secolo, enfatizzando l'importanza del procurement lead time e lo pone come un tema centrale negli studi sulla gestione delle scorte, discute inoltre di come nei modelli di inventario studiati fino a quegli anni il lead time sia stato considerato sempre come un parametro fisso, sia che venga considerato deterministico o probabilistico. Tale studio sventra tale teoria e dimostra che esso è controllabile, nel senso che può essere ridotto a fronte di un costo aggiuntivo o modificando la quantità del lotto ordinato. Questo miglioramento può portare a un aumento del livello di servizio al cliente, a una riduzione degli stock di sicurezza necessari per coprire la domanda inattesa durante il lead

time e a una maggiore flessibilità nei cambi di programma.

La metodologia proposta da tale studio prevede di considerare variabile la grandezza del lotto d'ordine e la possibilità, da parte dell'azienda, di pagare un extra costo per avere un'accelerazione nelle tempistiche di consegna delle materie prime / componenti necessari alla produzione: il principali driver delle tempistiche di consegna da parte del fornitore sono i tempi di attesa non produttivi, piuttosto che al vero tempo di produzione, per tale ragione, lato fornitore, offrire tale servizio extra non rende necessario un aumento di capacità produttiva (investimenti CAPEX e immobilizzazione di capitale). Il procurement lead time può essere dunque ridotto se il compratore è disposto a pagare di più per velocizzare la priorità del proprio ordine e se esso è disposto a ordinare lotti di materie prime che siano in linea con i lotti di produzione del fornitore al fine di assorbire costi di setup più elevati. Inoltre, il fornitore potrebbe dover aumentare i propri livelli di inventario di materie prime e prodotti finiti per rispondere a richieste di lead time ridotto, trasferendo questi costi aggiuntivi al compratore. Se ne deduce dunque che il lead time può essere un parametro negoziabile in cui le riduzioni vengono addebitate a un tasso prestabilito. Entrambi i soggetti, fornitori e acquirenti, possono trarre vantaggio da questa negoziazione: i fornitori possono utilizzare il lead time come variabile competitiva, mentre gli acquirenti possono beneficiare di lead time ridotti per evitare fermi produzione.

Il costo totale che l'acquirente dovrà pagare al fornitore diventa dunque dipendente da :

- Costi di mantenimento dell'inventario: costi legati al fatto che il fornitore dovrà avere un livello di magazzino superiore, i costi di magazzinaggio e gestione.
- Costi di crashing: Si riferiscono ai costi aggiuntivi sostenuti per ridurre il lead time. Se l'acquirente richiede un lead time più breve, deve pagare un prezzo aggiuntivo al fornitore per accelerare le operazioni di produzione o spedizione. Questi costi includono il tempo di lavorazione più rapido, costi di trasporto più elevati o costi amministrativi per ridurre i tempi di attesa.

$$ETRC(L) = h \left(\frac{Q}{2} + \frac{k\sigma L}{Q} \right) + \sum_{i=1}^n c_i(\theta_i - L_i)$$

ETRC(L)= costo totale rilevante o Expected Total Relevant Cost

Dove:

- h è il costo di mantenimento per unità all'anno.

- k è il fattore di sicurezza.
- σ è la deviazione standard della domanda giornaliera.
- L è il lead time.
- ci è il costo di crashing della componente i del lead time.
- Q è la quantità del lotto riordinato.

Gli effetti dell'aumento della quantità del lotto Q saranno quindi:

1. Riduzione del costo di mantenimento medio per ciclo: Il termine $\frac{Q}{2}$ rappresenta l'inventario medio disponibile durante un ciclo di approvvigionamento. Aumentando Q , questo termine aumenta, il che significa che per mantenere un inventario medio più elevato il costo di mantenimento totale aumenta.
2. Riduzione del costo dello stock di sicurezza: il termine $\frac{k\sigma L}{Q}$ riflette l'importo dello stock di sicurezza richiesto per coprire le fluttuazioni della domanda durante il lead time, se aumenta Q , il termine complessivo diminuisce poiché si riduce la quantità di stock di sicurezza necessaria, Questo effetto può compensare in parte l'aumento del costo di mantenimento medio.
3. I costi di crashing (ultimo addendo della formula) non sono influenzati direttamente dalla dimensione del lotto riordinato Q , poiché sono collegati principalmente alla riduzione del lead time attraverso il pagamento di costi aggiuntivi per accelerare il processo di fornitura. Tuttavia, l'aumento del lotto può ridurre la frequenza dei riordini, e quindi i costi di crashing complessivi in termini di cicli di approvvigionamento potrebbero diminuire, poiché i cicli diventano meno frequenti.

Da considerare però che se il lotto ordinato aumentasse troppo, i maggiori costi di mantenimento potrebbero superare i benefici derivanti dalla riduzione dello stock di sicurezza e dalla minor frequenza di ordini. Pertanto, c'è un punto ottimale del lotto ordinato Q che minimizza il costo totale ETRC. [28]

Un altro studio, chiamato modello di Moon e Choi nasce come un'estensione del tradizionale modello di gestione dell'inventario con punto di riordino e quantità fissa [29]. In particolare, affronta il problema della gestione simultanea di tre variabili decisionali: la

dimensione del lotto ordinato (Q), il punto di riordino (r) e il lead time (L), riconoscendo che ciascuna di queste può essere ottimizzata per minimizzare i costi totali di gestione delle scorte.

Come lo studio precedente, uno dei contributi principali del modello di Moon e Choi è la considerazione del lead time come una variabile controllabile, piuttosto che un parametro fisso. Tale modello può essere considerato un'evoluzione rispetto al precedente perché integra i costi di stockout: valuta la possibilità che una frazione della domanda non sia soddisfatta durante il lead time ma che possa essere evasa in un secondo momento (backorder), mentre il resto viene perso (lost sales). Un'altra innovazione importante del modello è l'introduzione del costo della qualità difettosa. Gli autori riconoscono che nei processi produttivi reali esiste sempre una probabilità che vengano prodotte unità difettose. Il costo per sostituire queste unità difettose viene incluso nel modello, permettendo di ottimizzare anche la qualità del processo produttivo.

$$C(Q, r, L) = \frac{AD}{Q} + h \left(\frac{Q}{2} + r - DL + (1 - \alpha)E(X - r)^+ \right) + [\theta + \theta_0(1 - \alpha)] \frac{D}{Q} E(X - r)^+ + \frac{D}{Q} R(L)$$

Se si considera la qualità difettosa, la formula diventa:

$$M(Q, r, L) = C(Q, r, L) + \frac{sDQ\varepsilon}{2}$$

Analizzando i vari termini della funzione:

Costo di setup $\frac{AD}{Q}$

A è il costo fisso per ordine e D è la domanda annuale. Un aumento di Q riduce il numero di ordini effettuati durante l'anno, e quindi riduce i **costi di setup** complessivi. Questo è uno degli incentivi per ordinare lotti più grandi.

Costo di mantenimento $h \left(\frac{Q}{2} + r - DL \right)$:

Essi aumentano con la quantità del lotto Q, dunque più grande è il lotto ordinato, maggiore è l'inventario medio tenuto in magazzino, il che comporta un aumento dei costi di mantenimento.

Stockout cost (costo di mancato approvvigionamento):

$E(x-R)$ rappresenta il numero atteso di unità non disponibili durante un ciclo di

approvvigionamento. Quando Q aumenta, la frequenza degli ordini diminuisce, ma la quantità di stock di sicurezza potrebbe cambiare a seconda del valore del punto di riordino r , che a sua volta dipende dal lead time L . Il risultato è che con l'aumento di Q , c'è una riduzione dei cicli di approvvigionamento, e quindi una potenziale riduzione dei costi di stockout, a meno che non si presentino stockout più gravi.

Costo legato ai prodotti difettosi:

Lo studio ipotizza che all'aumentare della grandezza del lotto prodotto Q aumenti il numero di prodotti difettosi attesi.

Partendo da questi due studi, un'analisi condotta nel 2022 [30], include e migliora gli aspetti qualitativi del processo e gli investimenti per la riduzione dei costi di setup, rendendolo utile per contesti in cui la gestione integrata di lead time, qualità e costi di setup è fondamentale per ridurre i costi totali e migliorare l'efficienza operativa. Tale modello introduce una correlazione tra la qualità del processo produttivo e la dimensione del lotto. Nel modello originale di Moon e Choi, questo aspetto non era considerato. Per far ciò il modello utilizza una funzione di investimento logaritmica per modellare la teoria secondo cui maggiori investimenti portano a miglioramenti incrementali sempre minori. Questa funzione logaritmica rende più realistico il processo di ottimizzazione delle risorse.

Costi di crashing (costo riduzione del lead time):

Esso è dipendente dal lead time ($R(L)$) e, come per il precedente studio, non è influenzato da Q . Tuttavia, poiché se si aumenta Q si riduca la frequenza degli ordini allora i costi di crashing possono essere distribuiti su un numero maggiore di quantità ordinata e nel complessivo ridurre il costo di approvvigionamento.

Molti altri studi hanno dimostrato come la riduzione del lead time mediante extra costi riconosciuti al fornitore sia spesso una soluzione percorsa da molte aziende manifatturiere, così facendo le aziende possono basare le proprie decisioni di riapprovvigionamento su informazioni più aggiornate e precise riguardo alla domanda dei prodotti, ovvero, avendo un lead-time più breve, è possibile avere un quadro più chiaro della domanda effettiva al momento dell'ordine, evitando così di dover fare previsioni su un arco temporale più lungo e incerto [31] [32] [33].

Come anticipato, però, ridurre il lead-time non è privo di costi e rischi: difatti, una delle motivazioni principali per le quali i fornitori richiedono un extra costo risiede nell'impatto negativo che questi ordini hanno sulle loro operazioni: i fornitori potrebbero dover

riorganizzare la produzione o affrontare costi straordinari per soddisfare richieste urgenti, trasferendo questi costi aggiuntivi sui clienti [34].

5. Analisi della variabilità del Lead Time nel settore manifatturiero

5.1 MRP

L'MRP (Material Requirements Planning) è un sistema di pianificazione della produzione volto a determinare i materiali e componenti necessari per soddisfare una specifica domanda, nonché i tempi e le quantità richieste. Esso fornisce una precisa procedura di programmazione, una strategia per il controllo dei materiali e un meccanismo di riprogrammazione. Il sistema MRP richiede tre principali input:

- Il master production schedule (MPS): L'MPS definisce le quantità di prodotto finito da produrre e i relativi tempi di consegna, basandosi sulle previsioni di vendita e sugli ordini dei clienti.
- la distinta base (BOM): La BOM elenca i materiali e componenti necessari per produrre un'unità di prodotto finito, specificandone le quantità e la sequenza di assemblaggio
- livello delle scorte: stato delle scorte ovvero le quantità di prodotto finito e componenti disponibili in magazzino.

Nei processi di assemblaggio, la presenza di numerosi articoli rende interdipendenti le scorte, un ritardo o mancanza di un singolo articolo può posticipare l'assemblaggio del prodotto finito, generando costi di backlogging. Analogamente, ritardi nell'assemblaggio implicano una maggiore durata delle scorte, con un incremento dei costi di stoccaggio. In tale contesto L'MRP viene impiegato per pianificare l'approvvigionamento e la produzione lungo un determinato arco di tempo, calcolando i requisiti in intervalli successivi, la cui durata varia in base al settore e al sistema produttivo. [27]

Nelle aziende manifatture all'MRP utilizza il procurement lead time per determinare il momento ottimale in cui emettere gli ordini d'acquisto, con l'obiettivo di garantire che le materie prime arrivino esattamente al momento opportuno. Questo processo è fondamentale per evitare sia gli stockout che l'eccesso di scorte, ottimizzando così l'efficienza della supply chain. Come ben noto alle aziende manifatturiere, infatti, il valore

delle scorte ha un impatto diretto sull'EBIT (Earnings Before Interest and Taxes) perché mantenere grandi quantità di scorte genera costi significativi come stoccaggio, assicurazione, deterioramento e obsolescenza. Questi costi riducono il margine operativo, aumentando le spese senza incrementare direttamente i ricavi. Inoltre, scorte eccessive possono portare a inefficienze operative, ritardi nelle vendite e la necessità di liquidare beni a prezzi scontati, peggiorando ulteriormente la redditività. Un alto valore delle scorte ha impatto anche sul Net Working Capital, un alto valore di inventario rappresenta una porzione rilevante delle attività correnti, ma questa tipologia di attività rimane immobilizzate fino a quando i beni non vengono trasformati e venduti, se ne deduce che la liquidità disponibile per l'azienda sarà compromessa limitando la capacità di finanziare altre attività operative o investimenti a breve termine. La mancanza di liquidità può inoltre creare difficoltà nel soddisfare le passività correnti, come il pagamento dei fornitori o altre spese operative. Pertanto, un valore eccessivo di scorte riduce la flessibilità finanziaria e l'efficienza operativa.

Infine, quando il lead time è dipendente dalla quantità ordinata, la complessità della pianificazione con il sistema MRP aumenta. In questo caso, il lead time non è fisso, ma varia in base alla dimensione del lotto ordinato. L'azienda deve quindi gestire una relazione diretta tra la quantità ordinata e il tempo necessario al fornitore per produrre e spedire il materiale. Ad esempio, un lotto di grandi dimensioni potrebbe richiedere tempi di produzione e consegna più lunghi da parte del fornitore, mentre un lotto più piccolo potrebbe ridurre il lead time, ma aumentare i costi di setup e di gestione degli ordini.

Limiti dell'MRP

Seppur l'MRP è il sistema di pianificazione più utilizzato in assoluto grazie alla sua comprovata efficacia, esso presenta dei limiti: l'assunzione che la domanda finale dei clienti e i tempi di consegna delle materie prime/componenti da parte dei fornitori siano noti con certezza. Queste assunzioni sono da considerarsi certamente irrealistiche poiché entrambi gli aspetti presentano delle variabili aleatorie rilevanti. Il metodo MRP base, infatti, si basa sul calcolo deterministico: tutti gli ordini degli articoli vengono rilasciati il più tardi possibile, in modo che il costo totale sia automaticamente minimo. Ma nel caso in cui si volesse rendere il modello realistico occorre che i parametri dell'MRP siano impostati in modo tale da avere una probabilità di giacenza o di sovrastoccaggio. Maggiore è la probabilità di giacenza, maggiore è il costo medio di giacenza nel tempo. Ad oggi, seppur quasi la totalità delle aziende necessiti di considerare tempi di consegna soggetti a una componente aleatoria, la maggior

parte delle pubblicazioni tende a focalizzarsi alle incertezze della domanda dei clienti piuttosto che a quelle derivanti dai tempi di consegna. [2]

Quando si parla di “incertezza del lead time” si fa riferimento al solo procurement lead time, ovvero il tempo che intercorre tra l’emissione dell’ordine e l’arrivo in stabilimento.

Oltre a considerare la variabilità del lead time, è essenziale tenere conto della dipendenza che potrebbe esistere tra la dimensione del lotto e il lead time di consegna, specialmente nel settore manifatturiero [35]. In tale settore, sebbene sia intuitivo considerare che in molti casi grandi lotti possano portare a lead time più lunghi, in altri non sempre è così: infatti, nel caso in cui la dimensione del lotto sia stata incrementata a seguito di uno studio e una collaborazione sulla pianificazione della fornitura tra fornitore e cliente o magari a seguito di una fornitura basata sul Vendor-Managed Inventory (VMI), il lead time potrebbe risultare migliorato. Nel caso di VMI, in particolare, il fornitore gestisce l'inventario per il cliente, ottimizzando la dimensione dei lotti in base alle esigenze operative di entrambe le parti. Per proseguire attraverso una fornitura basata sul VMI sarà necessaria una condivisione dei dati da parte del cliente attraverso un accesso diretto ai suoi dati di inventario e, spesso, alle previsioni di domanda. A tale scopo intervengono le tecnologie come l'EDI (Electronic Data Interchange) o sistemi ERP integrati. In questo modo, il fornitore può monitorare in tempo reale i livelli di stock e anticipare i bisogni del cliente [36].

Pertanto, la dipendenza tra dimensione del lotto e lead time va analizzata caso per caso, tenendo conto della capacità produttiva del fornitore, della complessità degli ordini e delle dinamiche della supply chain. Al contempo, ordinare lotti più piccoli può ridurre i tempi di consegna, poiché i fornitori possono processare ordini di dimensioni ridotte più rapidamente. Tuttavia, questa strategia comporta un aumento dei costi di ordinazione frequente e inefficienze legate all'aumento della frequenza delle attività di inbound (ricevimento materie prime), immagazzinamento e gestione delle scorte [37]

Scelta del sistema di gestione delle scorte/politica di riordino per settore aziendale

Nel panorama industriale odierno, caratterizzato da rapidi progressi tecnologici, la concorrenza si intensifica inesorabilmente e, conseguentemente, risulta fondamentale. Al fine di ottenere questo risultato è utile, se non fondamentale, adattare strategie mirate a soddisfare le esigenze sempre più complesse dei consumatori.

Il fulcro di ogni strategia aziendale di successo è senza dubbio la soddisfazione del cliente, per perseguire tale scopo, le aziende devono concentrarsi sulla qualità dei prodotti, investire in ricerca e sviluppo, rivolgersi, in alcuni casi, ad aziende di consulenza esterne e creare

soluzioni innovative che rispondano pienamente alle aspettative dei consumatori.

A tal fine gestire l'inventario scorte materie prime è la base per raggiungere le performance sopra descritte in quanto garantendo un flusso costante di materie prime di qualità sarà possibile:

- soddisfare le esigenze produttive senza eccessivi investimenti in scorte.
- supervisionare il livello di inventario per evitare rotture di stock o sovraccumuli onerosi.
- ridurre i rischi associati a eventi imprevisti, come fluttuazioni della domanda o ritardi nelle consegne promesse fatte ai clienti rispettando le tempistiche di consegna concordate [38]

Inoltre, in qualsiasi processo di approvvigionamento il lead time non dovrà essere configurato come un valore statico, bensì come un'articolazione dinamica di diverse fasi, ognuna con le sue peculiarità e i suoi potenziali colli di bottiglia. Tra queste fasi troviamo:

- Lead time di approvvigionamento: il tempo impiegato dal fornitore per ricevere le materie prime dai propri fornitori.
- Lead time di produzione: il tempo necessario al fornitore per produrre le materie prime ordinate.
- Lead time di trasporto: il tempo impiegato per il trasporto delle materie prime dallo stabilimento del fornitore a quello dell'azienda manifatturiera.
- Lead time di sdoganamento e controlli: il tempo impiegato per le procedure doganali e i controlli di qualità all'ingresso delle materie prime nel paese di destinazione.

In questa tesi, ci concentreremo su come il **Lead Time** possa variare significativamente all'interno del settore manifatturiero ed in particolare del lead time di approvvigionamento. Come analizzeremo nel dettaglio, diverse variabili, concorrono a determinare la durata del procurement lead time, rendendolo un fattore non omogeneo tra le diverse aziende, uno tra questi è la categoria merceologica di cui l'azienda si rifornisce, difatti ogni tipo di prodotto richiede processi specifici di produzione, approvvigionamento e logistica. Prodotti complessi o che necessitano di materie prime rare, imballaggi speciali, o che sono soggetti a normative rigorose, tendono ad avere lead time più lunghi. Inoltre, la disponibilità di materiali e le dinamiche del mercato possono influenzare la rapidità della consegna, facendo variare i tempi in base alla complessità del prodotto e delle sue necessità logistiche.

Oltre alla categoria merceologica, diverse altre variabili possono influenzare il Lead Time, tra cui:

Dimensione dell'azienda: Le grandi aziende, con un maggiore potere contrattuale, possono spesso ottenere lead time più brevi rispetto alle piccole e medie imprese.

Ubicazione geografica: La distanza tra l'azienda e i fornitori può influire significativamente sul Lead Time, soprattutto per le aziende che si approvvigionano all'estero.

Condizioni economiche e politiche: Fattori esterni come crisi economiche o instabilità politica possono allungare i lead time a causa di ritardi nei trasporti o di interruzioni delle filiere produttive.

Politiche di approvvigionamento aziendali: Le strategie di approvvigionamento adottate dall'azienda, come la diversificazione dei fornitori o l'utilizzo di scorte di sicurezza, possono influenzare il lead time in modo variabile.

Data la complessità e i numerosi fattori che possono influenzare il lead time di approvvigionamento, analizzeremo il processo di inbound in diverse tipologie di aziende manifatturiere, con un focus particolare sull'additive manufacturing. Questo approccio ci permetterà di comprendere meglio come la gestione delle materie prime, la logistica e i processi produttivi interagiscano per influenzare i tempi di consegna e come l'additive manufacturing, con le sue specificità tecnologiche e logistiche, possa contribuire a ottimizzare il lead time e a ridurre le inefficienze nella supply chain.

5.2 Industria alimentare

L'industria alimentare si distingue per alcune caratteristiche peculiari che influenzano in modo significativo la gestione delle scorte all'interno delle aziende del settore.

- **Domanda variabile:** la domanda di prodotti alimentari è soggetta a forti fluttuazioni stagionali, promozionali e legate a trend di consumo. Le aziende devono quindi essere in grado di prevedere accuratamente la domanda e adattare di conseguenza i livelli di scorte per evitare rotture di stock o eccessi di magazzino. [39]
- la filiera produttiva alimentare comprende numerosi attori, tra cui fornitori di materie prime, produttori, distributori e rivenditori. In un sistema così articolato, solo una comunicazione e collaborazione efficaci tra tutti i partecipanti possono garantire un flusso costante e puntuale dei prodotti. È quindi fondamentale condividere informazioni riguardanti ordini, scorte, previsioni di domanda e altri aspetti critici per la

pianificazione e la gestione delle scorte, coordinare le attività e risolvere i problemi in maniera collaborativa.

Uno dei principali problemi che possono ostacolare l'efficienza della filiera alimentare è la deperibilità dei prodotti e conseguentemente l'alto rischio di scarto a causa di standard qualitativi non conformi, in tal caso una soluzione potrebbe essere fare affidamento al Rough-Cut Capacity Planning (RCCP), ovvero una tecnica di pianificazione strategica che verifica la fattibilità del Master Production Schedule (MPS), valutando se la capacità complessiva di risorse principali (macchinari e manodopera) è sufficiente ad utilizzare lo stock di materie prime prima che esse superino la loro scadenza. Per il dettaglio operativo, è invece possibile affidarsi al Capacity Requirements Planning (CRP), che calcola i fabbisogni di capacità per ogni centro di lavoro o fase di produzione, considerando tempi di setup, lavorazione e trasferimento. Il CRP assicura che ogni operazione produttiva possa essere gestita con le risorse disponibili, identificando colli di bottiglia e risorse sotto/sovra-utilizzate [40]. Un altro aspetto fondamentale nel settore alimentare che impatta senza dubbio i costi della distribuzione è la necessità, in molti casi, di particolari tipologie di trasporto (come sistemi di refrigerazione/congelamento). Infine, un altro fattore cruciale è la stagionalità, a causa di previsioni errate un'azienda alimentare può incorrere sia in stockout che in overstock. La tabella di seguito mostra un esempio di backlog (arretrato) ed eccesso di scorte in un'azienda produttrice di noodles. L'asse delle ascisse indica i 18 tipi di materie prime utilizzate dall'azienda, l'asse delle ordinate esprime invece la quantità di backlog o overstock espressa in unità di materie prime. I valori negativi rappresentano il backlog, ovvero i ritardi nella ricezione delle materie prime rispetto a quanto pianificato mentre i valori positivi rappresentano ed eccedenze di inventario. [41]

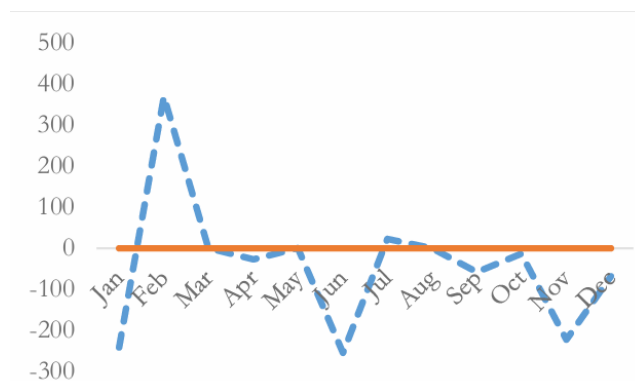


Figura 6 Backlog and overstock

Negli ultimi anni, per affrontare le criticità peculiari dell'industria alimentare sopra descritte, le supply chain dell'industria alimentare hanno adottato significative trasformazioni, in gran parte grazie all'introduzione di innovazioni tecnologiche volte a migliorare l'efficienza, la trasparenza e la sostenibilità. Tecnologie come la blockchain, l'Internet of Things (IoT), l'intelligenza artificiale (AI) e l'analisi dei big data stanno rivoluzionando le pratiche contabili tradizionali, offrendo soluzioni avanzate per ottimizzare ogni fase della catena di approvvigionamento alimentare [42].

La **blockchain** è una tecnologia di registrazione distribuita che consente di memorizzare dati in modo sicuro, trasparente e immutabile. Si tratta di una struttura digitale composta da blocchi di informazioni collegati tra loro in sequenza cronologica, formando una catena che garantisce che i dati non possano essere modificati o eliminati senza il consenso di tutti i partecipanti alla rete [43]. Tra i principali vantaggi della blockchain nella supply chain alimentare vi è la possibilità di garantire l'autenticità e l'integrità dei dati sui prodotti, riducendo il rischio di frodi e incidenti di sicurezza alimentare. In caso di contaminazioni o focolai di malattie, la blockchain permette di tracciare rapidamente la fonte del problema, facilitando richiami mirati e limitando i rischi per la salute pubblica [44].

Un esempio significativo è rappresentato da Walmart (azienda del settore alimentare statunitense nonché una delle più grandi catene di distribuzione al mondo) che ha adottato la tecnologia blockchain in collaborazione con IBM (multinazionale americana leader nel settore tecnologico, specializzata in hardware, software, servizi IT e ricerca scientifica avanzata) sviluppando la piattaforma TradeLens per monitorare il percorso dei prodotti freschi all'interno della propria supply chain [45].

Un'altra tecnologia rilevante per il monitoraggio e controllo in tempo reale delle condizioni di stoccaggio e trasporto dei prodotti alimentari è l'**Internet of Things (IoT)**. L'IoT si riferisce a una rete di dispositivi interconnessi dotati di sensori, software e altre tecnologie che permettono la raccolta e lo scambio di dati. Questi dispositivi vengono utilizzati lungo tutta la catena di approvvigionamento, dai campi agricoli e magazzini fino ai veicoli di trasporto e ai negozi al dettaglio, per monitorare parametri come temperatura, umidità e posizione [46].

Diverse analisi evidenziano l'efficacia dell'integrazione dell'IoT nella gestione della supply chain alimentare. Tra questi, l'esempio più pertinente agli argomenti trattati in questa tesi è rappresentato dalla Dole Food Company, uno dei principali produttori mondiali di frutta e verdura fresca. Tale azienda ha implementato sensori IoT nella sua flotta di trasporto per monitorare la temperatura e l'umidità durante il transito. Analizzando i dati raccolti, Dole è riuscita a identificare inefficienze nella propria catena di approvvigionamento e a ottimizzare

le rotte di trasporto e le pratiche di stoccaggio per ridurre le perdite [47].

Per quanto riguarda la gestione dell'inventario, l'**intelligenza artificiale (IA)** e il **machine learning** stanno rivoluzionando i processi, esse infatti prevedono la domanda nella supply chain alimentare permettendo ai sistemi informatici di simulare processi cognitivi umani e di apprendere dai dati per ottimizzare i livelli di scorte, ridurre le carenze e minimizzare i costi legati all'eccesso di inventario [48].

Infine, l'**analisi dei big data** riguarda l'elaborazione di grandi volumi di dati per individuare modelli nascosti, correlazioni e informazioni utili a supportare il processo decisionale [49].

Partendo da dataset eterogeni come quelli relativi alle vendite, alla produzione, alla logistica è possibile individuare inefficienze e prendere decisioni basate sui dati per migliorare le performance operative e la redditività. Tra le principali aziende che utilizzano l'analisi dei big data c'è sicuramente Amazon. Essa, partendo dall'output delle analisi, ottimizza le sue operazioni di supply chain, analizza dati provenienti da centri di distribuzione, magazzini e rotte di trasporto per migliorare i livelli di inventario, ridurre i costi di spedizione e migliorare i tempi di consegna [50].

5.3 Settore microprocessori

Il settore dei microprocessori è altamente tecnologico e caratterizzato da una notevole complessità dei prodotti, costituiti da milioni di transistor che richiedono standard qualitativi elevatissimi, poiché qualsiasi difetto di produzione può comportare costi rilevanti e danni alla reputazione del marchio. Inoltre, i cicli di vita dei prodotti sono brevi a causa dell'innovazione tecnologica continua, che rende rapidamente obsoleti i microprocessori. Infine, la gestione della supply chain risulta particolarmente complessa, poiché i componenti necessari provengono da diverse parti del mondo, creando catene di fornitura globali difficili da coordinare. In questo contesto, la gestione dell'inventario rappresenta una sfida cruciale in quanto i costi di inventario ammontano a circa al 60% dei costi totali di produzione, per tale ragione, l'utilizzo di modelli come l'**EOQ** per la pianificazione delle scorte sono i maggiormente utilizzati per determinare la quantità ottimale di ordine [51]. I costi di inventario elevati in questo settore derivano dall'ampia gamma di materiali impiegati, che spaziano dal silicio ultra-puro a sostanze chimiche specializzate e metalli pregiati. Questo comporta un costo unitario elevato per molte materie prime, il cui ciclo di vita è relativamente

breve. L'industria dei semiconduttori, infatti, è caratterizzata da una rapida evoluzione tecnologica che accelera l'obsolescenza dei prodotti e rende i prezzi soggetti a significative variazioni. Data la natura delle materie prime la gestione dell'inventario può essere guidata da una delle seguenti politiche di riordino:

- Punto di riordino fisso: viene stabilito un livello minimo di inventario al di sotto del quale viene emesso un ordine di acquisto.
- Periodo di riordino fisso: gli ordini vengono effettuati a intervalli regolari (ad esempio, ogni settimana o ogni mese).
- Sistema a quantità variabile: la quantità da ordinare viene calcolata in base alla domanda prevista e al livello di scorte attuale.

Un altro aspetto cruciale da evidenziare è la lunga catena di approvvigionamento che caratterizza l'industria dei semiconduttori. Questa complessità richiede alle aziende produttrici di adottare strategie mirate per garantire l'efficienza e la continuità delle operazioni. Tra le principali strategie utilizzate, vi sono la pianificazione della domanda, che prevede l'uso di modelli predittivi avanzati per anticipare le necessità future e ottimizzare i livelli di inventario. Un altro approccio comune è il Vendor Managed Inventory (VMI), che delega ai fornitori la gestione delle scorte, permettendo loro di monitorare e gestire i rifornimenti in base alla domanda del cliente. Le aziende si avvalgono inoltre di sistemi di pianificazione delle risorse aziendali ERP (Enterprise Resource Planning), che integrano tutti gli aspetti della supply chain, dalla produzione alla gestione dell'inventario. Contratti a lungo termine con i fornitori garantiscono la disponibilità di materiali critici e aiutano a mitigare i rischi legati alle oscillazioni dei prezzi. Infine, l'implementazione di tecnologie avanzate per il monitoraggio e la tracciabilità in tempo reale consente di ottimizzare la gestione dell'intera catena di approvvigionamento. [52].

5.3.1 La crisi dei semiconduttori: dinamiche globali e risposte strategiche

Attualmente, il settore dei semiconduttori sta attraversando una crisi globale profonda, innescata da molteplici fattori. La carenza di semiconduttori, iniziata ben prima del conflitto in Ucraina, è stata accelerata dall'aumento della domanda dovuto alla pandemia, che ha stimolato una forte digitalizzazione e incrementato la richiesta di dispositivi elettronici. Questo ha messo sotto pressione le catene di approvvigionamento globali. Le tensioni geopolitiche hanno ulteriormente peggiorato la situazione: la guerra in Ucraina ha accentuato

la scarsità di materie prime fondamentali, come il gas neon, indispensabile per la produzione di chip. Inoltre, la limitata capacità produttiva dell'industria dei semiconduttori, concentrata in poche aree del mondo, non è stata in grado di far fronte alla crescente domanda. Le conseguenze di questa crisi sono state rilevanti, con un rallentamento della produzione industriale in settori chiave come l'automotive, l'energia e l'elettronica di consumo, che sono stati duramente colpiti dalla carenza di chip. Per affrontare questa crisi, governi e istituzioni internazionali hanno adottato diverse strategie. Paesi come Stati Uniti, Cina, Unione Europea hanno infatti stanziato ingenti somme per incentivare la produzione di semiconduttori sul proprio territorio. Contemporaneamente, la collaborazione tra pubblico e privato sta accelerando lo sviluppo tecnologico e la produzione di chip, con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dalle importazioni e garantire maggiore autonomia in un settore chiave per l'innovazione e la competitività. L'Europa, ad esempio, ha stanziato l'European Chips Act: un piano ambizioso per rafforzare la produzione di semiconduttori nel nostro continente [53] [54]. Queste azioni prevedono incentivi fiscali, finanziamenti per la ricerca e lo sviluppo, e misure per facilitare gli investimenti nel settore, con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dalle importazioni e garantire la competitività dell'Europa nel mercato globale dei semiconduttori. [55]

5.4 Settore della moda

Il settore della moda è sicuramente il maggiormente caratterizzato da una domanda volatile e da trend in continua evoluzione. Tra le principali sfide di tale settore il problema del dimensionamento dei lotti e la definizione di contratti di approvvigionamento ottimali rivestono un ruolo cruciale. La stagionalità, la rapida obsolescenza dei prodotti e l'importanza dell'estetica rendono la gestione delle scorte nel settore della moda particolarmente complessa. Come per gli altri settori, un errore nella determinazione della quantità da produrre o acquistare può comportare un eccesso di magazzino, con conseguenti costi di stoccaggio e rischi di obsolescenza, oppure carenza di prodotto, con conseguenti perdite di vendite e insoddisfazione del cliente.

I problemi di dimensionamento dei lotti nel settore moda si complicano ulteriormente a causa dell'elevato numero di variabili coinvolte, tra cui a brevità dei cicli di vita dei prodotti, dovuta alla rapida obsolescenza, rende complessa la previsione precisa della domanda futura. Inoltre, l'elevata varietà di prodotti offerti aumenta ulteriormente la difficoltà di gestione, mentre la

crescente richiesta di personalizzazione richiede una maggiore flessibilità nei processi produttivi. Infine, le collaborazioni con fornitori, spesso situati in paesi lontani, necessitano di una pianificazione accurata e una gestione efficace dei rischi per mantenere un flusso regolare delle forniture.

In tale settore, al fine di individuare quanto e quando ordinare le materie prime necessarie alla produzione, è possibile affidarsi ai modelli di dimensionamento lotti [56]. Il primo è sicuramente il LSP (lot sizing problem) classico la cui prima e più nota versione è quella di Wagner e Whitin (1958).

Un' estensione del LSP classico è quello con ordini a lotti, ovvero la quantità di prodotto ordinata o prodotta deve essere un multiplo di una quantità minima definita. Le aziende di moda adottano questo modello principalmente per beneficiare di sconti legati ai volumi (i fornitori spesso offrono riduzioni di prezzo per ordini consistenti) e per rispettare i vincoli produttivi imposti dai fornitori, che potrebbero richiedere l'acquisto di un lotto minimo di produzione. Le funzioni di costo a gradini sono particolarmente adatte a rappresentare i costi associati agli ordini a lotti. Queste funzioni mostrano come il costo totale aumenti a scatti quando si supera una certa quantità, riflettendo gli sconti di quantità o i costi fissi associati a ogni lotto. Nel settore della moda una tipologia di contratto ampiamente usato è sicuramente il contratto di riacquisto, esso si presentano come strumento strategico per le imprese che operano in contesti caratterizzati da elevata volatilità della domanda e incertezza sui futuri fabbisogni. Questi accordi contrattuali, che prevedono la possibilità per l'acquirente di restituire al fornitore una parte della merce acquistata, offrono un bilanciamento ottimale tra la necessità di garantire

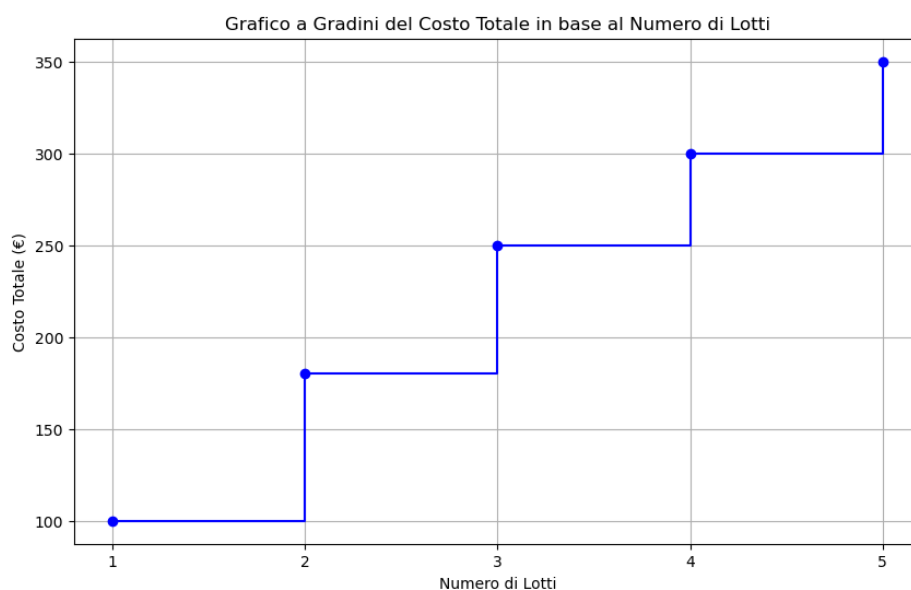


Figura 7 Funzione di costo a gradini

la disponibilità dei materiali e la flessibilità richiesta per adattarsi alle variazioni del mercato. In particolare, nel settore manifatturiero, i contratti di riacquisto consentono di mitigare i rischi connessi alla gestione delle scorte, evitando eccessi di magazzino e ottimizzando l'utilizzo delle risorse. Inoltre, promuovono una maggiore collaborazione tra le aziende della catena di fornitura, rafforzando i rapporti commerciali e favorendo lo sviluppo di strategie di supply chain integration. [57] [58]

5.5 Settore metallurgico

Il settore metallurgico si caratterizza per una complessità intrinseca nel processo di approvvigionamento, dovuta alla varietà di materiali, alla globalizzazione delle catene di fornitura e ai rigorosi standard di qualità. In tale settore possiamo individuare i seguenti punti cardine:

- **Varietà dei materiali:** Il settore metallurgico richiede una vasta gamma di materiali, ciascuno con specifiche caratteristiche e requisiti di qualità. Questa diversità implica una gestione complessa dei fornitori e dei processi di acquisto.
- **Catene di fornitura globali:** La globalizzazione ha reso le catene di fornitura del settore metallurgico sempre più complesse, con numerosi attori coinvolti in diverse parti del mondo ciò comporta un aumento del rischio di interruzione della supply chain e richiede una gestione attenta dei flussi logistici.
- **Requisiti di qualità:** I prodotti metallurgici devono soddisfare standard di qualità rigorosi, sia per motivi di sicurezza che conseguentemente per garantire la performance dei prodotti finiti, ciò implica controlli rigorosi sulla qualità dei materiali in ingresso.
- **Volatilità dei prezzi:** I prezzi delle materie prime nel settore metallurgico sono soggetti a significative fluttuazioni, influenzando i costi di produzione e i margini di profitto delle aziende.

La pianificazione strategica riveste un ruolo cruciale nello sviluppo di piani di approvvigionamento a lungo termine che considerino le tendenze di mercato, le fluttuazioni dei prezzi e le esigenze future dell'azienda. Il sourcing strategico richiede una selezione dei fornitori basata su criteri multidimensionali, che oltre il prezzo includono qualità, affidabilità, sostenibilità e capacità di innovazione. Collaborare con i fornitori diventa essenziale per

costruire relazioni di partnership solide, condividere informazioni e sviluppare soluzioni congiunte. L'adozione di tecnologie avanzate, come sistemi ERP, software di pianificazione della domanda e piattaforme di e-procurement, può migliorare significativamente l'efficienza e la trasparenza del processo di approvvigionamento. Inoltre, una gestione delle scorte equilibrata è fondamentale per garantire la disponibilità dei materiali necessari senza incorrere in costi eccessivi di stoccaggio o rischi di carenza. Infine, la resilienza della supply chain richiede lo sviluppo di strategie mirate a mitigare i rischi legati alle interruzioni, come la diversificazione dei fornitori e la creazione di scorte di sicurezza.

Un caso studio svolto su una fonderia di alluminio in Indonesia [6] presenta uno dei problemi più ricorrenti nel settore metallurgico: i tempi di attesa per i beni e i servizi non rispettano gli standard stabiliti. Ciò ha un impatto negativo sulla produzione, sulla manutenzione e, di conseguenza, sui ricavi dell'azienda.

Attraverso una raccolta dati di ordini di acquisti effettuati nel periodo 2016-2020 attraverso il software SAP si sono estrapolati, per ogni ordine, i tempi di consegna previsti e quelli reali. Attraverso il paragone di questi ultimi si è evidenziato un problema sistematico sul lead time. Per identificare le cause alla base di questi lunghi tempi di attesa, il caso studio utilizza un approccio metodologico misto, combinando:

Analisi Ishikawa: strumento visuale che aiuta a identificare le cause principali del problema, organizzandole in categorie.

Fault Tree Analysis: tecnica permette di analizzare le relazioni causali tra gli eventi che contribuiscono al problema, individuando le cause profonde.

Le principali cause di lead time superiori a quelli pianificati riguardano anzitutto le politiche aziendali, in particolare, sono state evidenziate la complessità delle procedure, la mancanza di flessibilità e l'eccessiva burocratizzazione.

I metodi di acquisto utilizzati dall'azienda erano troppo rigidi e non sempre adatti alle diverse tipologie di beni e servizi. L'utilizzo eccessivo di gare d'appalto ha allungato i tempi di approvvigionamento, in particolare per gli acquisti di valore inferiore.

Le autorizzazioni e la loro approvazione era troppo lunghi e complessi, richiedendo numerose autorizzazioni a diversi livelli gerarchici.

Infine, le negoziazioni con i fornitori si basavano su un approccio tradizionale e non sfruttavano le potenzialità delle nuove tecnologie.

I miglioramenti implementati sulla base delle analisi condotte si possono riassumere in:

- **Semplificazione delle procedure:** sono state riviste e semplificate le procedure di acquisto, riducendo il numero di approvazioni necessarie e automatizzando alcune delle attività.
- **Introduzione di nuovi metodi di acquisto:** sono stati introdotti nuovi metodi di acquisto, come le aste online e gli acquisti diretti, per ridurre i tempi di approvvigionamento per i beni e i servizi standard.
- **Delega delle decisioni:** è stata delegata una maggiore autorità decisionale ai responsabili degli acquisti, riducendo il numero di livelli di approvazione.
- **Utilizzo di strumenti informatici:** sono stati implementati nuovi strumenti informatici per gestire il processo di approvvigionamento in modo più efficiente e trasparente.

Un'altra criticità fortemente presente in tutte le aziende manifatturiere e, anche nel nostro caso specifico, in quello metallurgico è la limitata capacità dei magazzini che, in molti casi, comporta la necessità di posticipare la data di consegna nel caso di fornitori short pipeline (fornitori che consegnano tramite spedizioni via terra data la vicinanza geografica) e in altri casi la necessità di lasciare il materiale al porto qualora i fornitori consegnino con spedizioni via nave (fornitori long pipeline). Ciò comporta costi elevati di demurrage e detention mentre le navi attendono spazio per lo scarico al porto. Per minimizzare tali costi, è essenziale mantenere i livelli di inventario delle materie prime al minimo possibile, Tuttavia, mantenere livelli di inventario troppo bassi può comportare carenze di scorte in caso di ritardi nella fornitura delle materie prime, compromettendo la continuità delle operazioni produttive. Poiché sia un eccesso che una carenza di scorte comportano un aumento dei costi, è fondamentale stabilire livelli di inventario ottimali. Al fine di inquadrare questo problema, in un articolo riguardate la fornitura di ferro e carbone a un'azienda in Giappone con fornitori long pipeline (Australia, Brasile e Canada) è stato proposto un modello di gestione delle scorte che considera le variazioni sul lato della fornitura e basato su un metodo di calcolo dell'inventario per le materie prime in condizioni di fornitori multipli, stabilimenti multipli e interruzioni dell'offerta. [59]

5.6 Additive manufacturing

5.6.1 Tipologie di stampa 3D

La stampa 3D, o produzione additiva, è una tecnologia rivoluzionaria che permette di creare oggetti tridimensionali a partire da un modello digitale. A differenza dei metodi di produzione tradizionali, che sottraggono materiale da un blocco più grande, la stampa 3D aggiunge

materiale strato per strato fino a formare l'oggetto desiderato.

A differenza dei processi di produzione tradizionali ("sottrattivi"), la tecnologia di stampa 3D consente agli utenti di costruire prodotti altamente complessi da una vasta gamma di materiali (ad esempio plastica, metallo, ceramica, arenaria, resina, biomateriali e sostanze alimentari) [60]

Il processo di stampa 3D si basa su un file digitale 3D, solitamente in formato STL o OBJ. Questo file viene inviato alla stampante 3D, che lo interpreta e lo trasforma in istruzioni per il movimento degli ugelli o dei laser. A seconda della tecnologia utilizzata, la stampante deposita strati sottili di materiale fuso, solidificato da una luce UV o sinterizzato, fino a ottenere la forma finale dell'oggetto. I progetti di stampa 3D sono completamente liberi dai vincoli di progettazione imposti dai processi tradizionali. Invece di produrre diversi componenti, è possibile realizzare un singolo assemblaggio integrato. [61]

Attualmente esistono 7 principali metodi di stampa 3D [62]:

La **fusione a letto di polvere** è una delle tecnologie più comuni e avanzate nella stampa 3D, in particolare per la produzione di oggetti metallici. Questo processo si basa sul principio di fondere selettivamente particelle di polvere metallica per creare un oggetto solido, strato per strato .

Si inizia creando uno strato sottile di questa polvere metallica su una piattaforma, successivamente un laser viene puntato su una porzione di questa polvere in modo tale che il calore intenso del laser fonde istantaneamente le particelle metalliche, creando una piccola sezione solida del futuro oggetto. La piattaforma si abbassa leggermente, un nuovo strato di polvere viene distribuito e il laser ricomincia a lavorare, creando il piano successivo.

Le principali applicazioni della fusione a letto di polvere sono il settore aerospaziale per creare componenti leggeri e resistenti per aerei e satelliti, la medicina per produrre protesi personalizzate e strumenti chirurgici, il settore dell'automotive per realizzare prototipi di auto e componenti altamente personalizzati ed infine la gioielleria per la creazione di gioielli unici e su misura.

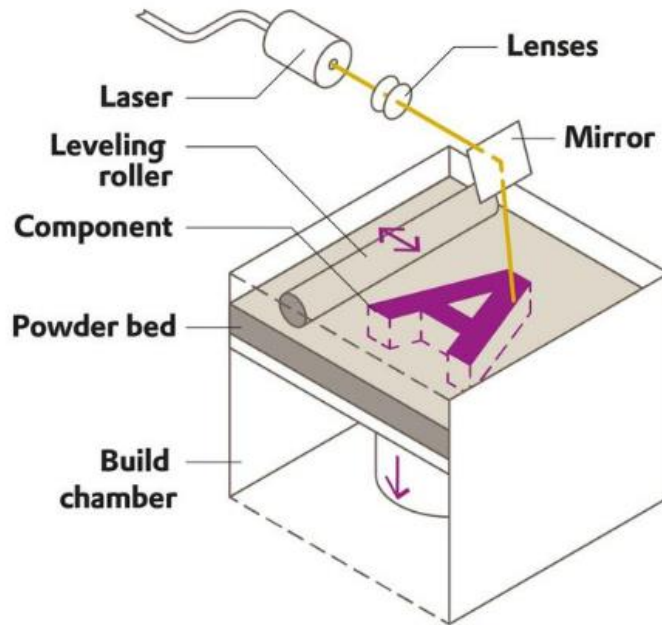


Figura 8 Struttura laser fusione a letto di polvere

La **deposizione di energia diretta** è un processo in cui un fascio di energia concentrata, come un laser o un fascio di elettroni, fonde un materiale (solitamente sotto forma di filo o polvere) depositandolo direttamente sul pezzo in lavorazione. A differenza della fusione a letto di polvere, dove il materiale è depositato in strati su un letto di polvere, nella DED il materiale viene aggiunto solo dove necessario, strato dopo strato. Questa tecnologia è utilizzata principalmente per riparare componenti esistenti, aggiungere materiale a pezzi semilavorati o creare oggetti da zero, è molto utilizzata in quanto può lavorare con una vasta gamma di materiali metallici, comprese leghe difficili da lavorare con altri metodi.

La **laminazione a foglio** consiste nel sovrapporre fogli sottili di materiale, incollandoli o fondendoli insieme. In tale processo un laser taglia i contorni di ogni strato, seguendo il modello CAD 3D, i fogli tagliati vengono sovrapposti e incollati o fusi insieme, creando così lo spessore desiderato dell'oggetto. Una volta completato l'oggetto, il materiale in eccesso viene rimosso.

La laminazione a foglio è tra le tecnologie meno comuni in quanto la geometria degli oggetti che possono essere prodotti è limitata rispetto ad altre tecnologie di produzione additiva.

La qualità superficiale può essere inferiore rispetto ad altre tecnologie, in particolare nelle zone di giunzione tra i fogli. Ed in fine non tutti i materiali possono essere utilizzati in questo processo.

La tecnologia **material jetting** si basa su un principio molto simile alla stampa a getto d'inchiostro. In tale processo di produzione additiva vengono depositati sottili strati di materiale liquido su un piano di costruzione, strato dopo strato, fino a formare l'oggetto desiderato. Questi strati vengono depositati attraverso una testina di stampa che eroga piccole goccioline di materiale, proprio come una stampante a getto d'inchiostro deposita l'inchiostro sulla carta. Nel campo della stampa 3D è una delle metodologie più usate in quanto grazie alla precisione degli ugelli, è possibile ottenere dettagli molto fini e superfici lisce. Inoltre, è possibile personalizzare l'oggetto finale scegliendo tra un'ampia gamma di colori e materiali diversi. È inoltre un processo relativamente veloce, soprattutto per oggetti di piccole dimensioni ed è flessibile poiché permette di creare oggetti con geometrie complesse e cavità interne.

Il **processo di estrusione** consiste nello spingere un materiale termoplastico fuso attraverso una matrice con una forma specifica, creando così un oggetto tridimensionale. Il materiale termoplastico viene riscaldato fino a raggiungere uno stato viscoso, diventando malleabile. Successivamente viene spinto attraverso una matrice con la forma del profilo desiderato.

La **fotopolimerizzazione in vasca** è una delle tecnologie di stampa 3D più avanzate e precise attualmente disponibili. Tale processo prevede una vasca piena di resina liquida fotosensibile, un raggio di luce colpisce la superficie della resina indurendola in modo selettivo basandosi su un modello digitale 3D, questo raggio traccia il contorno del primo strato dell'oggetto che si vuole creare, solidificando solo la parte di resina necessaria. Questo processo si ripete, strato dopo strato, fino a formare l'oggetto completo.

5.6.2 Supplychain e additive manufacturing

Sebbene la stampa 3D sia nata negli anni '80, passando dal rapid prototyping negli anni '90 al rapid manufacturing diretto negli anni 2000 [63], la maggior parte di articoli inerenti alla stampa 3D discutono di essa solo da un punto di vista tecnico. Sono veramente pochi gli articoli che affrontano (in varia misura) il suo potenziale impatto sulle supply chain [64]. A causa della crescente importanza di questo settore, c'è ora un chiaro bisogno di ulteriori ricerche, soprattutto per capire come i servizi di stampa 3D possano integrare, sostituire o addirittura creare supply chain completamente nuove. La produzione additiva, o stampa 3D, rappresenta una rivoluzione nel settore manifatturiero, offrendo una flessibilità progettuale senza precedenti e la possibilità di realizzare geometrie complesse impensabili con le tecnologie tradizionali [65]. Questa tecnologia ha il potenziale di rivoluzionare la produzione,

consentendo la personalizzazione di massa e la riduzione dei tempi di sviluppo. Tuttavia, diversi esperti del settore enfatizzano una serie di peculiarità che rendono tale tipologia di produzione vincolante.

L'elevata dipendenza dei fornitori sia di materie prime che di macchinari, crea una certa vulnerabilità e legame a fonti specializzate, che può conseguentemente ridurre sia la flessibilità nell'approvvigionamento che nell'adempimento degli ordini. Difatti, se i fornitori limitano l'accesso a materiali o parametri specifici dei macchinari, le aziende rischiano di perdere flessibilità nella produzione e nell'adattamento alle esigenze del mercato. Di conseguenza la gamma di prodotti che l'AM può produrre e i mercati che può servire sarà inevitabilmente ridotta. [66]

Un altro problema significativo nella stampa 3D è la mancanza di standard e regolamentazioni per i materiali utilizzati. Ciò limita la scelta dei materiali e rende difficile garantire la qualità e la consistenza dei prodotti finali. Ad esempio, nell'ambito della biostampa, l'assenza di regole precise può comportare rischi per la salute e la sicurezza. Inoltre, la scarsa disponibilità di fornitori affidabili di materiali per la stampa 3D rende le aziende più vulnerabili a interruzioni nella produzione e a ritardi nelle consegne [67].

Un limite della produzione additiva risiede anche nella necessità di complesse e costose operazioni di finitura dopo la stampa. Difatti i post-produzione rappresentano quasi il 60% del tempo totale di produzione dato che tutte le parti prodotte devono essere lavorate e testate per porosità a seconda del materiale di costruzione. Ne consegue che la capacità di rispondere rapidamente alle richieste dei clienti ne risulterà minata. Inoltre, l'instabilità dei processi di stampa 3D incide sull'affidabilità delle macchine e può causare ritardi nella produzione. Di conseguenza, l'idea che la stampa 3D possa garantire tempi di consegna estremamente rapidi deve essere riconsiderata alla luce di queste limitazioni [68].

La produzione additiva richiede inoltre una manutenzione frequente delle macchine e l'adozione di standard di produzione uniformi per garantire la qualità e la prevedibilità dei risultati. Nella tecnologia di fusione a letto di polvere, infatti, l'instabilità del processo può portare fino a un tasso di fallimento di circa il 40%, ovvero solo sei pezzi su dieci prodotti superano i test di qualità, come l'ispezione dimensionale e il rilascio di stress. Questo tasso elevato di fallimento richiede un monitoraggio rigoroso durante il processo di produzione. [69] [70]. Guasti alle macchine e variazioni nei processi possono causare interruzioni nella produzione, prolungare i tempi di consegna e compromettere la soddisfazione dei clienti.

Un altro aspetto da tenere in considerazione è la possibilità di dover fronteggiare il problema del furto di proprietà intellettuale e lo spionaggio industriale. Esso, infatti, scoraggia le

aziende dall'adottare modelli di produzione decentralizzati, come il *capacity pooling*, che potrebbero massimizzare l'utilizzo delle risorse e ridurre i costi. La condivisione di file digitali all'interno della supply chain è fondamentale per sfruttare al meglio le potenzialità della produzione additiva, ma richiede infrastrutture IT adeguate e misure di sicurezza robuste. La crescente complessità del settore richiederà nuove figure professionali con competenze specifiche nell'ambito della sicurezza informatica, della gestione dei dati e della collaborazione digitale. [71] [72]

In uno studio svolto nel 2018 sono state individuate 18 barriere all'adozione della manifattura additiva in diversi settori industriali [73]. Oltre a quelle già sopracitate, tra gli ostacoli più vincolanti sono presenti anche i costi elevati dovuti alla formazione di personale, soprattutto per le piccole e medie imprese.

Inoltre, la qualità e l'affidabilità non è sempre equiparabile a quella offerta dalla produzione tradizionale.

Tutti questi aspetti fanno in modo che, sebbene la stampa 3D possa potenzialmente rendere le supply chain più efficienti, più agile, reattiva, più economica e sostenibile i produttori non sono ancora convinti che possa sostituire completamente i processi di produzione tradizionali, in particolare per grandi volumi di produzione. Per i settori industriali in cui la personalizzazione è raramente richiesta e/o il costo di produzione è una variabile fondamentale probabilmente le tecnologie di produzione tradizionali continueranno a dominare nel breve termine. Nel medio termine, invece, l'AM potrebbe completare, aiutare e affiancare i processi tradizionali [74].

Le previsioni svolte dagli esperti su quando avverrà l'adozione diffusa della stampa 3D, in particolare quella consumer, sono state più volte rimandate. Attualmente, l'uso commerciale della tecnologia è limitato principalmente alla prototipazione di base, piuttosto che alla produzione rapida su larga scala. È infatti discutibile se la fabbricazione domestica sarà una proposta realistica per la maggior parte dei consumatori [75].

Nonostante la relativa novità dei servizi di stampa 3D, è possibile però anticipare un impatto significativo sulla struttura e l'efficienza delle supply chain aziendali. Infatti, la flessibilità intrinseca della fabbricazione additiva permette alle imprese di esternalizzare completamente il processo produttivo, dalla progettazione alla realizzazione finale, affidandosi a fornitori specializzati. Questa scelta strategica offre numerosi vantaggi, tra cui la riduzione dei costi iniziali legati all'acquisto e alla manutenzione di macchinari, la possibilità di accedere a una vasta gamma di materiali e tecnologie e una maggiore agilità nel rispondere alle variazioni della domanda. Inoltre, delegando la produzione, le aziende possono concentrarsi sulle

proprie competenze distintive, ottimizzando l'allocazione delle risorse e accelerando i tempi di immissione sul mercato. Sebbene la maggior parte degli studi sull' AM siano incentrati sul processo produttivo, recenti studi, [76] [77] [78], hanno sviluppato quadri concettuali o discusso le implicazioni dell'adozione di AM sulla logistica e le catene di fornitura, basandosi su revisioni della letteratura e interviste

Per comprendere il ruolo della produzione additiva (AM) nelle catene di fornitura, è necessario analizzare i principali elementi logistici della gestione della supply chain: pianificazione della domanda e dell'offerta, gestione dell'inventario, e trasporti.

Pianificazione della domanda

In qualsiasi tipo di azienda manifatturiera, come quelle descritte nei precedenti paragrafi, la pianificazione della domanda e dell'offerta comprende:

Struttura della rete: ovvero quanti livelli della catena di approvvigionamento sono necessari, dalla materia prima fino al consumatore finale.

Localizzazione delle strutture: dove porre gli impianti produttivi e come allocare i punti di approvvigionamento e mercato.

Capacità degli impianti: quanta capacità produttiva deve essere disponibile e quanto flessibile deve essere ogni struttura.

Con l'introduzione di AM la complessità della pianificazione della supply chain si riduce: le fasi di produzione più snelle aiutano a mitigare i problemi legati all'effetto frusta (bullwhip effect), che si verifica quando le variazioni della domanda di un prodotto vengono amplificate man mano che si risale la supply chain [79]. Infine, le strutture AM richiedono meno manodopera e spazio.

Gestione delle scorte

La gestione delle scorte comprende:

- tipo e quantità dell'inventario da tenere.
- posizionamento del magazzino lungo la catena di approvvigionamento.
- processi di riapprovvigionamento.
- stato delle scorte e gestione delle eccedenze.

Questo aspetto può cambiare radicalmente con l'AM in quanto, a differenza della catena di approvvigionamento tradizionale in cui si hanno grandi scorte di componenti e parti, con AM, la riduzione della diversità dei materiali rende più semplice e conveniente la gestione delle scorte, così come il controllo della qualità.

Inoltre, i costi sono ridotti in quanto l'inventario è per lo più costituito da materie prime con basso valore aggiunto e che occupano meno spazio [80].

Mezzi di trasporto

Il terzo elemento riguarda la gestione dei trasporti (spostamento di materie prime, componenti e prodotti finiti tra le strutture della catena di fornitura). Le principali decisioni riguardano:

- Scelta dei mezzi di trasporto.
- Capacità di carico e pianificazione dell'utilizzo delle risorse.
- Pianificazione delle operazioni (itinerari e programmazione).

Con l'AM la logistica dei materiali grezzi fa sì che l'inbound possa beneficiare di economie di scala, dato che la varietà dei materiali è ridotta [78].

Inoltre, poiché il materiale da trasportare è principalmente costituito da materie prime anziché da componenti, servono meno imballaggi e i flussi logistici sono più snelli rispetto ai sistemi tradizionali, in cui i componenti devono essere trasportati con maggiore cura.

5.6.3 L'Importanza di un approccio contestualizzato nella valutazione della manifattura additiva

Nella discussione riguardante la manifattura additiva (AM), non è corretto limitarsi a un'analisi generica dei vantaggi e degli svantaggi della tecnologia, poiché ogni azienda che adotta l'AM affronta sfide e opportunità specifiche. Queste varietà sono dettate dalla diversità di fattori coinvolti; diversità riguardanti non solo la tipologia di prodotto fornito ma anche sulla distanza geografica del fornitore rispetto al sito produttivo. Altro fattore di differenziazione è legato alle tecnologie utilizzate, le politiche di produzione e le competenze richieste: ogni contesto è unico e difficilmente comparabile.

Ad esempio, aziende che utilizzano tecnologie diverse, come la fusione a letto di polvere o la fotopolimerizzazione in vasca, potrebbero sperimentare impatti differenti sulla loro catena di fornitura e sulla capacità produttiva [73] [81].

Configurazione siti produttivi stampa 3D

L'implementazione della stampa 3D all'interno di una supply chain comporta una serie di scelte strategiche che influenzano profondamente la gestione degli acquisti e dei flussi logistici.

Le configurazioni più utilizzate sono quella centralizzata, quella distribuita e quella parziale.

Configurazione centralizzata

La centralizzazione della stampa 3D rappresenta una strategia in cui le strutture di produzione vengono concentrate in un unico sito per servire molteplici sedi di domanda. Questa configurazione è particolarmente comune nel settore aerospaziale, dove le stampanti 3D vengono utilizzate per produrre pezzi di ricambio a basso volume. [82]

I principali vantaggi della centralizzazione della produzione con stampanti 3D risultano essere:

- **Economie di scala:** la concentrazione della produzione in un unico sito consente di sfruttare economie di scala, negoziando prezzi migliori con i fornitori e ottimizzando l'utilizzo delle risorse
- **Standardizzazione:** la centralizzazione facilita l'adozione di standard qualitativi uniformi per i prodotti, migliorando la consistenza e la prevedibilità del processo produttivo.
- **Controllo centralizzato:** la gestione centralizzata permette un maggior controllo sulla qualità, sulla pianificazione della produzione e sulla distribuzione dei prodotti. [82]

Al contempo i fattori più critici sono:

- **Distanza tra il sito di produzione e le sedi di domanda:** se le distanze fossero elevate, i costi di trasporto potrebbero essere significativi.
- **Volume e frequenza degli ordini:** la configurazione centralizzata è più adatta per volumi elevati e frequenze di ordine regolari.
- **Sensibilità al tempo di consegna:** se i tempi di consegna fossero critici, la configurazione centralizzata potrebbe non essere la scelta migliore.
- **Disponibilità di infrastrutture logistiche:** la presenza di infrastrutture logistiche adeguate è essenziale per garantire la distribuzione efficiente dei prodotti.

Configurazione distribuita

La configurazione distribuita rappresenta un approccio alternativo alla produzione

centralizzata, caratterizzato dalla decentralizzazione delle strutture di stampa 3D per avvicinarle ai mercati locali. Questo modello è reso possibile dalla capacità della stampa 3D di produrre piccoli lotti in modo economico, grazie all'assenza di costosi setup e attrezzature. [83] [84]

I principali vantaggi della configurazione distribuita sono:

- **Tempi di risposta rapidi:** la vicinanza ai mercati locali consente di ridurre significativamente i tempi di consegna, migliorando la soddisfazione del cliente.
- **Riduzione dei costi di trasporto e inventario:** la produzione locale elimina o riduce i costi associati allo stoccaggio e al trasporto dei prodotti.
- **Maggiore flessibilità:** la decentralizzazione permette di rispondere più rapidamente alle variazioni della domanda e alle esigenze specifiche dei clienti.

Mentre tra i possibili svantaggi troviamo:

- **Costi operativi più elevati:** La gestione di più piccole strutture di produzione può comportare costi operativi più alti, soprattutto in termini di personale e manutenzione.
- **Economie di scala limitate:** La produzione su piccola scala può limitare le possibilità di ottenere economie di scala nei fornitori di materie prime e servizi.
- **Difficoltà di coordinamento:** La gestione di una rete distribuita di strutture di produzione può richiedere una complessa coordinazione logistica e operativa.

La configurazione distribuita può realizzarsi attraverso due tipologie di siti produttivi:

Hub-based: le strutture di produzione sono localizzate in hub regionali per servire più sedi. Questa variante consente di sfruttare alcune economie di scala a livello regionale.

On-site: le stampanti 3D sono installate direttamente presso i clienti o le sedi di servizio. Questa opzione offre il massimo livello di localizzazione e rapidità di risposta, ma può essere costosa per la necessità di investimenti in ogni singola sede.

5.6.4 Approvvigionamento materie prime nell'additive manufacturing

Nel caso di configurazione centralizzata è interessante studiare e analizzare il processo di inbound, anche detto di approvvigionamento, delle materie prime.

Anzitutto un fattore fondamentale da sottolineare è la tipologia di materiali necessari. Tra le

raw materials più prodotte e vendute per alimentare l'industria dell'additive troviamo i materiali sottoforma di polvere la cui qualità è dettata principalmente dal livello di purezza. La difficoltà alla base dei prodotti in polvere è dettata dal fatto che essa è soggetta a contaminazione (ad esempio durante il trasporto, l'ossidazione o l'esposizione ad altri materiali), il che può compromettere notevolmente la qualità e influenzare negativamente il processo di costruzione e la qualità finale delle parti. La sensibilità elevata alla qualità della polvere rende la limitata tracciabilità dei materiali un problema significativo [73].

La necessità di acquistare materiali in polvere, o in generale materie prime non contaminate e qualitativamente idonee, rende le aziende AM fortemente vulnerabili a interruzioni di produzioni che possono verificarsi a monte della catena di fornitura e compromettere la capacità del fornitore principale di consegnare puntualmente. Una soluzione percorribile per evitare fermi produttivi è sicuramente avere fornitori alternativi in grado di garantire anch'essi standard qualitativi stabiliti dall'OEM [72].

Dal punto di vista della gestione degli ordini delle materie prime, se da una parte è vero che nell'AM si utilizzano materiali specifici meno comuni e/o più costosi di quelli utilizzati tradizionalmente [85] dall'altra parte si può affermare che il materiale grezzo, che costituisce la maggior parte del flusso di materiali in entrata, potrebbe dover percorrere lunghe distanze per raggiungere gli stabilimenti di produzione, specialmente a causa del fatto che i materiali grezzi necessari potrebbero arrivare da parti del mondo molto distanti dalla sede produttiva d'interesse.

Da questo se ne deduce che la stampa 3D potrebbe spostare l'attenzione della logistica in entrata sul trasporto di grandi quantità di materie prime (grossi lotti) meno frequenti ma più consistenti, facendo sì che i trasporti a pieno carico diventino la soluzione più efficiente. Inoltre, la stampa 3D richiede meno imballaggio rispetto ai sistemi tradizionali che spediscono parti e componenti già assemblati, da ciò se ne deduce dunque che la supply chain basata sulla stampa 3D è più efficiente dal punto di vista del trasporto.

Un altro aspetto di importanza rilevante è che il materiale grezzo ha generalmente un costo inferiore per unità di peso rispetto ai prodotti finiti. Questo fa evincere che avere una configurazione centralizzata potrebbe essere ancora una volta la migliore scelta per AM. Data l'importanza rivestita dal processo di inbound, le aziende potrebbero affidarsi maggiormente a società di logistica esterne per gestire lo stoccaggio e il trasporto delle materie prime al fine di migliorare le proprie performance.

In sintesi, le macchine AM semplificano la gestione dell'inventario riducendo la necessità di stoccare componenti intermedi e aumentando la flessibilità grazie alla crescente varietà di

materiali disponibili.

Dagli ultimi studi svolti riguardanti il processo di inbound nell'additive se ne evince inoltre che gli ordini dovrebbero essere fatti a lotti, per ridurre i costi di approvvigionamento e ottimizzare la gestione delle scorte. Ordinare materiali in grandi quantità consente di sfruttare le economie di scala, riducendo il costo unitario delle materie prime grazie alla maggiore quantità acquistata [86].

Un altro aspetto cruciale nell'approvvigionamento delle materie prime per l'AM è la scelta dei fornitori e conseguentemente la modalità di spedizione. È fondamentale, infatti, che il reparto acquisti di ogni azienda AM svolga un'attività di scouting approfondita al fine di avere più opzioni possibili sui fornitori di materie prime a cui rivolgersi. Nel caso in cui si opti per fornitori long pipeline la spedizione via mare è sicuramente l'unico metodo di spedizione possibile. Essa è generalmente utilizzata per grandi volumi e lunghe distanze, poiché è più economica rispetto al trasporto via terra, ma richiede tempi di consegna più lunghi. Questo può essere un fattore critico nella gestione della supply chain di un'azienda che utilizza l'AM, in cui la tempistica di approvvigionamento dei materiali deve essere coordinata attentamente con la pianificazione della produzione.

La spedizione via terra, invece, è preferibile per consegne più rapide e per distanze più brevi. Offre maggiore flessibilità e può ridurre i tempi di risposta alle esigenze produttive, ma è spesso più costosa per grandi quantità di materiale rispetto al trasporto via mare. [87]

Per sfruttare al meglio le economie di scala le spedizioni predilette sono quelle via mare che prevedono lotti di grandi quantità. [88] Nel caso di spedizioni via mare i lotti spediti sono nella maggior parte dei casi di dimensioni superiori rispetto alle spedizioni via land.

Tuttavia, l'aumento della dimensione del lotto può avere un impatto diretto sui tempi di consegna a causa dei seguenti fattori:

- Tempi di ordine e produzione: ordinare in grandi quantità può richiedere tempi maggiori per la produzione e l'approvvigionamento.
- Tempi di trasporto: i lotti più grandi possono influenzare la modalità di trasporto scelta. Ad esempio, spedizioni via mare sono più economiche per grandi volumi ma richiedono tempi di consegna più lunghi rispetto a quelle via terra [87]

Miglioramento processo inbound e il ruolo dei fornitori

Seppur producendo asset molto diversi, qualsiasi azienda all'interno del settore manifatturiero ripone nel processo di approvvigionamento gran parte del successo aziendale. Un

approvvigionamento strategico risulta infatti essere un processo che dipende fortemente dal reparto acquisti ma è anche un processo a livello organizzativo, che coinvolge tutte le aree funzionali e i reparti di un'organizzazione. L'approvvigionamento strategico si riferisce a strategie a lungo termine per garantire un approvvigionamento tempestivo di beni o servizi essenziali per un'organizzazione al fine di raggiungere i suoi obiettivi aziendali. [12]

Focalizzandoci nuovamente sull' AM, come affermato precedentemente, una delle principali vulnerabilità della SC è l'elevata dipendenza dai fornitori di macchine AM, ovvero la dipendenza da fonti specializzate. Per mitigare queste vulnerabilità costruire una relazione basata sulla fiducia e su una stretta collaborazione con i fornitori è centrale per il successo delle catene di fornitura AM [89] [90]. Inoltre, le considerazioni a lungo termine riguardo ai piani di produzione strategici, sono importanti per investire nei fornitori e nelle attrezzature giuste fin dall'inizio [91].

Diversi studi si sono cimentati nel dimostrare l'effetto combinato dell'approvvigionamento strategico e l'integrazione dei fornitori: la combo di questi aspetti ha sicuramente come output un miglioramento della velocità di immissione dei prodotti sul mercato, soprattutto se l'azienda presa in considerazione gode di ottime performance manifatturiere [92] [93] [94]. Al fine di ottenere una riduzione delle tempistiche di entrata nel mercato è necessario ridurre i tempi di sviluppo e commercializzazione dei prodotti. Il time-to-market (tempo di immissione sul mercato) è un fattore determinante per ottenere un vantaggio competitivo sostenibile.

Diversi studi antecedenti agli anni 2000 hanno dimostrato che un time-to-market ridotto consente alle aziende di acquisire una quota di mercato maggiore, aumentare l'efficienza delle risorse, praticare prezzi più elevati e incrementare la fedeltà dei clienti [95]. Negli studi più recenti è sottolineato anche il rapporto di stretta collaborazione con i fornitori come leva per accelerare significativamente il time to market. [96] Un altro vantaggio fondamentale nell'avere un solido rapporto con i fornitori è la possibilità di condividere tempestivamente le informazioni tra essi e i clienti. Man mano che la partnership con il fornitore si protrae nel tempo i vantaggi che si otterranno saranno via via maggiori. Altro aspetto cruciale è che le partnership con i fornitori possono riguardare non solo la risoluzione efficace e veloce di eventuali problemi ma anche la collaborazione nella progettazione.

In particolare, uno studio condotto nel 2007 ha analizzato gli antecedenti e le conseguenze dell'integrazione dei fornitori nelle attività di sviluppo prodotto, distinguendo tra integrazione black-box e grey-box. Black Box e Grey Box si riferiscono al livello di visibilità che abbiamo sui processi di questi fornitori. Nel caso di black box non si ha nessuna visibilità sul fornitore (processi produttivi, tecnologia utilizzata, struttura organizzativa interna, eventuali problemi

interni). Nel caso di black box la relazione con il fornitore è più formale, esso riceve le specifiche tecniche e conseguentemente consegna il componente finito. Nel caso di grey box la visibilità è parziale, dunque si ha la possibilità di essere a conoscenza di specifiche e documentazione tecnica del fornitore e di visitare il suo stabilimento o avere dei punti di contatto specifici per discutere di aspetti tecnici. Il rapporto è più collaborativo, c'è uno scambio di informazioni e una maggiore fiducia reciproca.

L'integrazione del fornitore, soprattutto in modalità grey box, può portare a nuove idee e soluzioni, grazie alla condivisione di conoscenze e competenze. Inoltre, attraverso la collaborazione tra le parti si avrà un miglioramento della qualità del prodotto finale, grazie a un controllo più serrato sui processi e una comunicazione più efficace.

La scelta della modalità tra black e grey box dipende da diversi fattori, come la complessità del prodotto, il livello di fiducia nel fornitore e i tempi di consegna. Inoltre, ognuna di queste modalità richiede un approccio diverso alla gestione. In particolare, l'integrazione black box richiede una definizione chiara delle specifiche e un monitoraggio rigoroso dei risultati mentre con la grey box è necessaria una collaborazione più stretta e una condivisione di informazioni. [97]

Data l'importanza strategica delle tempistiche di entrata nel mercato, un ultimo aspetto cruciale per gran parte delle aziende manifatturiere è la capacità di ridurre i tempi di sviluppo e commercializzazione dei prodotti. Il time-to-market (tempo di immissione sul mercato) è un fattore determinante per ottenere un vantaggio competitivo sostenibile. Diversi studi antecedenti agli anni 2000 hanno dimostrato che un time-to-market ridotto consente alle aziende di acquisire una quota di mercato maggiore, aumentare l'efficienza delle risorse, praticare prezzi più elevati e incrementare la fedeltà dei clienti [95]. Negli studi più recenti è sottolineato anche il rapporto di stretta collaborazione con i fornitori come leva per accelerare significativamente il time to market. [96]

6. Conclusioni

Questa tesi ha esplorato in profondità il legame tra gestione delle scorte, processo di approvvigionamento delle materie prime e variabilità del procurement lead time nelle aziende manifatturiere, con particolare attenzione alle implicazioni del Quantity Dependent Lead Time (QDL). Le domande iniziali a cui si è cercato di rispondere includevano: in che modo le fluttuazioni del lead time, soprattutto quando dipendenti dalla quantità ordinata, influenzano la pianificazione della produzione e la gestione delle scorte? Quali strategie possono essere adottate per mitigare gli effetti negativi di tali variabilità? E infine, come l'additive manufacturing può contribuire a ottimizzare il processo di approvvigionamento, tenendo conto delle complessità logistiche e delle peculiarità della tecnologia stessa? La ricerca ha seguito un approccio teorico-empirico, combinando una revisione estensiva della letteratura con l'analisi di casi di studio specifici che hanno permesso di quantificare l'impatto del QDL sul ciclo di approvvigionamento. Si è analizzato come la variabilità del lead time, in funzione della quantità ordinata, possa alterare in modo significativo l'efficienza delle operazioni. Ad esempio, è stato evidenziato che ordini di grandi volumi, sebbene beneficiati da economie di scala, tendono ad allungare i tempi di consegna a causa di vincoli produttivi e logistici dei fornitori, con conseguente aumento dei costi di mantenimento delle scorte. Al contrario, ordini di piccole dimensioni possono ridurre il lead time ma incrementano i costi amministrativi e di setup.

L'implementazione del modello QDL ha rivelato inoltre come le aziende possano ridurre il bullwhip effect e migliorare la flessibilità operativa, modulando la quantità ordinata in base alla variabilità della domanda e alla capacità produttiva del fornitore. In particolare, l'adozione di strategie di procurement che includano contratti flessibili con fornitori e l'uso di strumenti di previsione avanzati ha dimostrato di poter ridurre i costi totali di approvvigionamento, minimizzare le scorte di sicurezza e ottimizzare i costi di crashing del lead time.

L'analisi dell'additive manufacturing ha poi mostrato che, sebbene questa tecnologia possa semplificare la gestione della supply chain riducendo la necessità di componenti intermedi e di scorte, presenta sfide rilevanti a monte. In particolare, la qualità e la disponibilità delle materie prime rappresentano un problema cruciale: la dipendenza da fornitori specializzati e

la necessità di materiali di elevata qualità per la stampa 3D riducono la flessibilità e la resilienza della catena di approvvigionamento. È emerso dunque che, per massimizzare i benefici dell'AM, è essenziale sviluppare una strategia di approvvigionamento robusta e diversificata, che includa fornitori alternativi e investimenti in ricerca per la produzione di materiali più accessibili e affidabili.

Tra le limitazioni dello studio, va segnalato che l'analisi si è basata principalmente su casi di studio specifici, senza una validazione empirica su larga scala che potrebbe fornire un quadro più completo e generalizzabile. Inoltre, il focus sull'additive manufacturing potrebbe non essere rappresentativo per tutte le tipologie di aziende manifatturiere, data la variabilità nelle esigenze e capacità tecnologiche tra settori.

Per studi futuri, sarebbe opportuno approfondire l'analisi quantitativa del QDL in settori con diverse configurazioni di supply chain, come quello alimentare o farmaceutico, dove la variabilità del lead time può avere impatti più marcati. Un ulteriore filone di ricerca potrebbe esplorare l'integrazione di tecnologie emergenti, come la blockchain e l'intelligenza artificiale, per migliorare la tracciabilità e la previsione del lead time. Infine, una maggiore attenzione alle implicazioni del reshoring e alla localizzazione delle supply chain, in risposta a eventi disruptive come la crisi del Mar Rosso, potrebbe offrire nuovi spunti per costruire catene di fornitura più resilienti e sostenibili.

7. Bibliografia

- [1] L. Tiacci, «Gestione delle scorte, modelli matematici e loro applicazione,» 2014.
- [2] A. Alfieri e M. Cantamessa, Programmazione e controllo della produzione, 2016-2017.
- [3] S. X. Y. a. K. Y. Yang, The supply chain design for perishable food with stochastic demand, 2017.
- [4] F. Yiğit, «A novel type-2 hexagonal fuzzy logic approach for predictive safety stock management for a distribution business,» 2023.
- [5] a. P. W. L. Nauval Hernandoko¹, « Inventory Control Using ABC Classification and Min-Max Stock,» 2023.
- [6] D. R. H. M. D. R. Ade Buandra, « Shorten Lead Time of the Procurement Process in Aluminium,» 2020.
- [7] C. K. Coe, « Public financial management. New Jersey: Prentice Hall.,» 1989.
- [8] K. Thai, « Public procurement re-examined. Journal of Public Procure,» 2001.
- [9] J. Mangan, «Global Logistics and Supply Chain Management,» 2008.
- [10] D. F. Ross, « Introduction to e-supply chain management: Engaging,» 2016.
- [11] M. E. Porter, «What is strategy? Harvard Business Review,» 1996.
- [12] U. & R. Weigel, « The strategic procurement practice guide,» 2017.
- [13] S. C. Liao CJ, «An analytical determination of lead time,» 1991.
- [14] J. D. R. B. T. S. P. W. Salal Humair, «Incorporating Stochastic Lead Times Into the Guaranteed Service Model of Safety Stock Optimization,» 2013.
- [15] M. Christopher, «Logistics & supply chain management,» 2011.
- [16] U. BAGCHI, JACK C. HAYYA e CHAO-HSIEN CHU, «The Effect of Lead-Time Variability: The Case of Independent Demand,» 1986.

- [17] P. Kouvelis e Sammi Y. Tang, «On Optimal Expediting Policy for Supply Systems with Uncertain Lead-Times,» 2011.
- [18] C. C. L. Shu-Lu Hsua, «Replenishment and lead time decision in manufacturer-retailer chains,» 2008.
- [19] C. E. Sarker B.R., «Manufacturing setup cost reduction under variable lead times and finite opportunities for investment,» 1997.
- [20] J. C.-H. P.-C. Hsiao, «Inventory models with back-order discounts and variable lead time,» 2001.
- [21] S. R. H. Ali Arkan, «Coordinating orders in a two echelon supply chain with controllable lead time and ordering cost using the credit period,» 2011.
- [22] T. G. Kim, «A multi-stage joint economic lot size model with lead time penalty costs,» 2013.
- [23] Z. Michna, Stephen M. Disney e Peter Nielsen, «The impact of stochastic lead time on the bullwhip effect under correlated demand and moving average forecasts,» 2019.
- [24] A. Colibasanu, «What Red Sea Disruption Means for Global Supply Chains.,» 2024.
- [25] S. N. Khandare, «The Red Sea Crisis and Its Ripple Effect on Global Supply Chains and Sustainability,» 2024.
- [26] S. N. Khandare, «The Red Sea Crisis and Its Ripple Effect on Global Supply Chains and Sustainability,» 2024.
- [27] P. D. P. R. Silver EA, «Inventory management and production planning and scheduling. New York: Wiley,» 1998.
- [28] C.-J. L. a. C.-H. Shyu, «An Analytical Determination of Lead Time with Normal Demand,» 1991.
- [29] C. S. Moon I, « A note on lead time and distributional assumptions in continuous review inventory models.,» 1998.
- [30] L.-Y. Ouyanga e H.-C. C. Cheng-Kang Chen, «Quality improvement, setup cost and lead-time reductions in lot size reorder point models with an imperfect production process,» 2002.
- [31] E. H. R.J. Tersine, «Lead-time reduction: the search for competitive advantage,» 1995.

- [32] S. V. C. D. J. Jayaram, «An empirical study of time-based competition in the North American automotive supplier industry,» 1999.
- [33] T. D. Disney SM, «On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy.,» 2003.
- [34] L. A.-M. S.K. Das, «Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains,» 2003.
- [35] W. J. Stevenson, Operations Management. McGraw-Hill Education, 2020.
- [36] D. K. P. & S.-L. E. Simchi-Levi, Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies..
- [37] T. E. B. W. L. W. D. C. & J. F. R. Vollmann, Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management., 2005.
- [38] H. G. E. N. F. & W. F. R. Tannady, «Process improvement to reduce waste in the biggest instant noodle manufacturing company in South East Asia.,» 2019.
- [39] B. B. S. F. & G. K. Ejlali, «Integrated and periodic relief logistics planning for reaction phase in uncertainty condition and model solving by PSO algorithm,» 2019.
- [40] M. G. G. D. R. Filscha Nurprihatin, «Improving the Performance of Planning and Controlling,» 2021.
- [41] F. Nurprihatin, Metta Gotami e Glisina Dwinoor Rembulan, «Improving the Performance of Planning and Controlling,» 2021.
- [42] J. D. R. C. M. F. J. F. E. S. S. & Y. R. Astill, Transparency in food supply chains: A review of enabling technology solutions, 2019.
- [43] X. L. D. H. C. X. L. Y. H. Z. W. S. R. & Y. B. Shen, Blockchain for transparent data management toward 6G. Engineering, 2022.
- [44] B. A. M. B. M. B. J. & M. T. Brown, An economic evaluation of the whole genome sequencing source tracking program in the US, 2021.
- [45] A. & C. E. Collart, How might broad adoption of blockchain-based traceability impact the US fresh produce supply chain?, 2022.

- [46] I. & A. A. O. O. Onoyere, Sustainable energy development in a developing economy: the Nigerian experience., 2012.
- [47] J. R. J. & A. A. Vilas-Boas, «Convergence of distributed ledger technologies with digital twins, IoT, and AI for fresh food logistics: challenges and opportunities.,» 2023.
- [48] R. M. M. R. C. & K. U. Dash, «Application of artificial intelligence in automation of supply chain management.,» 2019.
- [49] I. Sarker, «Data science and analytics: an overview from data-driven smart computing, decision-making and applications perspective.,» 2021.
- [50] V. K. S. & W. G. Lele, «Streamlining production: using Big-Data's CRM & supply chain to improve efficiency in high-speed environments.,» 2023.
- [51] J. V. S. G. Ferguson M, «An application of the EOQ model with nonlinear holding cost to inventory management of perishables.,» 2006.
- [52] P. N. Nhu, «Inventory planning for continuous demand materials – A case study in chip manufacturing industry.,» 2023.
- [53] K. v. Wieringen, «Strengthening EU chip capabilities: How will the chips act reinforce Europe's semiconductor sector by 2030?,» 2022.
- [54] D.-C. Horng, «The US CHIPS Act and Its Impacts on the WTO and China.,» 2024.
- [55] F. Bassanini, «L'industria dei microprocessori e l'autonomia strategica dell'Europa.,» 2022.
- [56] N. N. A. S. D.-P. Brahim, «Single-item dynamic lot-sizing problems: An updated survey,» p. 838–863, 2017.
- [57] C. i. m.-e. s. c. u. s. a. d. uncertainty, «He, Y., X. Zhao,» pp. 106-115, 2012.
- [58] J. A. Z. L. Z. Hou, «Coordination with a backup supplier through buy back contract under supply disruption,» pp. 881-895, 2012.
- [59] H. K. K. N. Kosuke Kawakami, «Seasonal Inventory Management Model for Raw Materials in steel industry,» 2021.
- [60] H. a. K. M. Lipson, «The New World of 3D Printing,» 2013.

- [61] E. a. S. Atzeni, «Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts,» , pp. 1147-1155, 2012.
- [62] S. L. P. M. A. a. H. L. Huang, «Additive manufacturing and its societal impact: a literature review,» pp. 1191-1203, 2012.
- [63] T. a. S. Rayna, «From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation,» 2016.
- [64] H. R. N. B. K. S. Pawar, «3D printing services: classification, supply chain implications and research agenda,» 2016.
- [65] H. R. N. B. K. S. Pawar, «3D printing services: classification, supply chain implications and research agenda,» 2016.
- [66] M. K. N. a. R. Kunovjanek, «“Additive manufacturing and supply chains—a systematic review,» 2020.
- [67] J. P. L. a. B. P. Kietzmann, «Disruptions, decisions, and destinations: enter the age of 3-D printing and additive manufacturing,» 2015.
- [68] B. a. C. Naghshineh, «“The implications of additive manufacturing technology adoption for supply chain resilience: a systematic search and review,» 2022.
- [69] B. C. S. a. G. M. Colosimo, «A cost model for the economic evaluation of in-situ monitoring tools in metal additive manufacturing,» 2020.
- [70] C. K. S. a. W. S. Durach, «The impact of additive manufacturing on supply chains,» 2017.
- [71] S. S. C. K. M. a. W. Kurpjuweit, «Blockchain in additive manufacturing and its impact on supply chains,» 2019.
- [72] S. M.-K. S. S. M. R. I. a. J. A. Chekurov, «The perceived value of additively manufactured digital spare parts in industry: an empirical investigation,» 2018, pp. 87-97.
- [73] Thomas-Seale, «The barriers to the progression of additive manufacture: perspectives from UK industry,» pp. 104-118.
- [74] PwC, «3D Printing: A Potential Game Changer for Aerospace and Defense,» [Online].
- [75] D. a. K. R. Gress, «Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing,» 2015, p. 43–52.

- [76] H. B. N. & P. K. S. Rogers, «Classification, supply chain implications and research agenda».
- [77] C. R. H. & J. A. Braziotis, «3D printing strategic deployment: The supply chain perspective,» 2019.
- [78] M. D. S. L. C. A. & B. a Silva, « bibliographical analysis in the literature of value co-creation in private higher education between the years 2006 to 2016,» 2020.
- [79] K.-C. F. F. P. P. & L. B.-Y. Ying, «Adjusted iterated greedy for the optimization of additive manufacturing scheduling problems.,» 2022.
- [80] K.-C. F. F. P. P. & L. B.-Y. Ying, «Adjusted iterated greedy for the optimization of additive manufacturing scheduling problems.,» 2022.
- [81] Astm, «ASTM52900-15 standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology,» 2015.
- [82] S. P. J. a. H. Khajavi, «Additive manufacturing in the spare parts supply chain,» 2014.
- [83] «Huang, S.H., Liu, P., Mokasdar, A. and Hou.,» *Additive manufacturing and its societal impact: a literature review*, 2013.
- [84] C. Kohtala, «Addressing sustainability in research on distributed production: an integrated literature review,» 2015.
- [85] N. K. A. S. V. & K. P. Choudhary, «Barriers in adoption of additive manufacturing in medical sector supply chain.,» 2021, p. 637–660.
- [86] A. & H. Scott, «Additive manufacturing in an end-to-end supply chain setting,» 2015.
- [87] M. C. M. & M. R. Rinaldi, «Additive manufacturing and supply chain configuration: Modelling and performance evaluation,» 2022.
- [88] M.-C. & L. Y.-H. Chiu, «. Simulation based method considering design for additive manufacturing and supply chain,» 2016.
- [89] T. a. M. M. Luomaranta, «“Supply chain innovations for additive manufacturing,» 2020.
- [90] G. S. S. a. S. R. Dwivedi, «Analysis of barriers to implement additive manufacturing technology in the Indian automotive sector,» 2017.

- [91] K. a. H. E. Oettmeier, «Impact of additive manufacturing technology adoption on supply chain management processes and components,» 2016.
- [92] M. B. M. A. G. L. & D. J. Cho, «Restaurant purchasing skills and the impacts upon strategic purchasing and performance: The roles of supplier integration,» 2019.
- [93] R. & T. S. Narasimhan, «Supplier integration—Finding an optimal configuration,» 2006.
- [94] W. Darr, «Conception for procurement excellence: The performance profile and degree of digitalization of procurement. Tredition,» 2019.
- [95] E. a. C. A. Kessler, «Innovation Speed: A Conceptual Model of Context, Antecedents, and Outcomes.,» 1996.
- [96] J. Z. C. & K. S. Perols, « On the relationship between supplier integration and time-to-market,» 2013.
- [97] X. A. C. T. E. & L. K. H. Koufteros, «Black-box” and “gray box” supplier integration in product development: Antecedents, consequences and the moderating role of firm size.,» 2007.
- [98] L. Tiacci, Gestione delle scorte, Modelli matematici e loro applicazione.
- [99] P. J. Singh, «Improving Lead Times Through Collaboration With Supply Chain Partners:Evidence From Australian Manufacturing Firms,» 2009.
- [100] T. C. R. P, «Faster Way To Create Better Quality Products,» *International Journal of Project Management*, 2001.
- [101] F. Nurprihatin, Metta Gotami e Glisina Dwinoor Rembulan, «Improving the Performance of Planning and Controlling,» 2021.
- [102] C. a. G. R. McMillan, «Systems Analysis:A Computer Approach to Decision Models.».
- [103] D. Bogataj e M. Bogataj, «NPV approach to material requirements planning theory – a 50-year review of these research achievements,» 2018.
- [104] F. H. ., A. L. 2. a. H. M. A. Dolgui, «Parameterization of MRP for Supply Planning Under Lead Time Uncertainties,» 2008.
- [105] D. J. C. D. & C. B. Bowersox, «Supply Chain Logistics Management (3rd ed.). New York: McGraw-Hil,» 2010.

- [106] M. Christopher, «Logistics & supply chain management (4th). London: Pearson Education Limited.,» 2011.
- [107] M. B. M. A. G. L. & D. J. (. Cho, «Restourant purchasing skills and the impacts upon strategic purchasing and performance: The roles of supplier integration,» 2019.
- [108] P. L. R. L. B. & S. B. Cousins, «Strategic supply management: Principles, theories and practice, Harlow England: Pearson Education,» 2008.
- [109] A. J. J. & D. A. Nair, « Strategic purchasing participation, supplier selection, supplier evaluation and purchasing performance,» 2015.
- [110] D. K. A. Aksen, «The single-item lot-sizing problem with immediate lost sales,» p. 558–566, 2003.
- [111] B. N. B. C. G. F. D. C. Torres, «The impacts of additive manufacturing technology on lean/green supply chain management practices,» 2019.
- [112] S. P. J. a. H. Khajavi, «Additive manufacturing in the spare parts supply chain,» 2014.
- [113] M.-C. & L. Chiu, « Simulation based method considering design for additive manufacturing and supply chain,» 2016.
- [114] L. Tiacci, Gestione delle scorte, Modelli matematici e loro applicazione.
- [115] A. Colibasanu, «What Red Sea Disruption Means for Global Supply Chains,» 2024.