

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Matematica

Tesi di Laurea Magistrale

**Ottimizzazione della gestione dei magazzini:  
un caso applicato al settore dei ricambi automotive**



**Relatore**

prof. Paolo Brandimarte

**Candidato**

Matteo Racca

Anno Accademico 2024-2025



# Sommario

La gestione delle scorte nel settore dei ricambi automotive rappresenta una delle sfide più complesse e stimolanti nell'ambito della gestione della Supply Chain. Le aziende si trovano infatti a dover bilanciare due esigenze contrapposte: da un lato garantire livelli di servizio molto elevati e capaci di soddisfare clienti che richiedono rapidità, affidabilità e continuità nelle consegne; dall'altro mantenere sotto controllo i costi operativi e di magazzino evitando accumuli eccessivi di scorte che comporterebbero immobilizzo di capitale e rischio di obsolescenza. Questa difficoltà si colloca all'interno di un contesto globale in continua trasformazione caratterizzato da una crescente volatilità della domanda, dalla frammentazione geografica dei mercati serviti e da dinamiche logistiche sempre più articolate. In particolare, la necessità di rispondere con tempestività a ordini provenienti da diverse aree del mondo con volumi o frequenze molto diverse rende più complesso prendere le giuste decisioni rispetto la gestione dell'intera rete logistica. Per questo motivo la gestione delle scorte non può essere vista come una semplice attività operativa, ma diventa un elemento cruciale per la competitività dell'azienda che richiede modelli decisionali evoluti e strumenti analitici capaci di ottimizzare sia l'efficienza economica che la qualità del servizio.

È in questo quadro che si inserisce questo lavoro di ricerca: la tesi si concentra sull'analisi e sull'ottimizzazione dei processi di pianificazione e gestione degli inventari all'interno di una rete di magazzini globale caratterizzata da un'elevata complessità strutturale e operativa. L'obiettivo non è soltanto quello di descrivere i meccanismi che regolano il funzionamento della Supply Chain, ma di proporre un approccio integrato che sappia coniugare la dimensione strategica, legata alle scelte di configurazione della rete e alla definizione delle politiche di approvvigionamento, con quella quantitativa, basata su modelli matematici e statistici in grado di supportare decisioni operative più precise ed efficaci. In tal senso, l'elaborato mira a dimostrare come l'uso combinato di tecniche analitiche, metodologie di ottimizzazione e strumenti di simulazione sia in grado di migliorare la gestione delle scorte nei singoli magazzini e al contempo coordinare in modo efficiente l'intera rete garantendo un equilibrio tra il livello di servizio, i costi logistici e la resilienza complessiva del sistema.

Il primo capitolo introduce il contesto di riferimento e analizza le principali scelte legate alla progettazione della rete logistica nel settore dei ricambi automotive. Nello specifico, vengono messi a confronto i modelli organizzativi di tipo centralizzato e decentralizzato evidenziandone vantaggi e criticità e concentrandosi sul delicato equilibrio tra rapidità di consegna, efficienza economica e solidità operativa.

Successivamente, viene introdotto il concetto innovativo di Magazzino Virtuale, concepito come strumento gestionale capace di coordinare e integrare più magazzini fisici sotto un'unica regia centralizzata. Questo approccio, basato su una rete con magazzini multilivello, viene discusso in chiave strategica per mostrare come questo possa rafforzare la struttura delle catene di fornitura globali migliorandone la flessibilità, la capacità di risposta e la continuità operativa in contesti di mercato sempre più complessi.

Il secondo capitolo è dedicato al tema dell'*Inventory Optimization* e approfondisce gli strumenti e i modelli implementati per affrontare la complessità della domanda e della distribuzione geografica delle scorte della rete di magazzini globale studiata. Viene illustrato nel dettaglio il tool che è stato sviluppato per l'azienda in esame. Si tratta di uno strumento avanzato di ottimizzazione progettato per integrare dati, diversi utenti e processi decisionali all'interno di un'unica piattaforma collaborativa in grado di supportare scelte coordinate e coerenti nei diversi livelli della Supply Chain.

In seguito, l'analisi si concentra sui fondamenti matematici e statistici che guidano il calcolo dei principali parametri che permettono la gestione dell'inventario: l'Economic Order Quantity (EOQ) e il Safety Stock (SS). Vengono analizzate diverse metodologie per stimare la volatilità della domanda e del lead time, confrontando approcci basati sull'errore della previsione della domanda e sulla variabilità storica. Inoltre, vengono presentati i modelli statistici utilizzati per il dimensionamento delle scorte di sicurezza seguendo la logica del *Fill Rate* o del *Service Level*. Infine, si discutono estensioni e adattamenti del modello che consentono di includere la stagionalità della domanda e i vincoli derivanti dalle policy aziendali rendendo l'approccio più realistico e applicabile in contesti operativi complessi.

Il terzo capitolo si concentra sul funzionamento del Distribution Requirements Planning (DRP), il processo aziendale che consente di definire i piani di approvvigionamento coordinati lungo l'intera rete logistica. Per elaborare tali piani, questo processo utilizza i valori di Economic Order Quantity (EOQ) e Safety Stock (SS) che vengono calcolati dal tool di supporto. Poiché questi parametri possono essere determinati attraverso diverse configurazioni, l'impiego delle simulazioni Monte Carlo risulta necessario come strumento per valutare l'impatto delle possibili scelte. L'idea principale è che le simulazioni producano molteplici scenari della futura evoluzione dei livelli di merce in magazzino, offrendo così una rappresentazione probabilistica più realistica del comportamento complessivo del sistema.

Per poter analizzare meglio i risultati ottenuti dalle simulazioni, vengono introdotte specifiche metriche di performance e strumenti di visualizzazione grafica utili per misurare in modo chiaro e comparabile il livello di servizio, la stabilità delle scorte e l'efficienza complessiva della rete. In questo contesto, i benefici derivanti dall'applicazione dei modelli proposti risultano evidenti sottolineando come la combinazione di approcci analitici e simulativi possa tradursi in un miglioramento concreto delle capacità decisionali e operative.

Nel complesso, la tesi dimostra come l'integrazione di modelli matematici, strumenti digitali avanzati e metodologie di simulazione consenta di affrontare in modo strutturato

e innovativo le sfide legate alla gestione delle scorte nel settore dei ricambi automotive. L'approccio sviluppato non si limita a fornire soluzioni puntuali, ma offre una visione organica e scalabile della Supply Chain capace di coniugare efficienza operativa, resilienza e qualità del servizio al cliente. Infine, la metodologia proposta permette di valutare in maniera preventiva l'impatto di diverse scelte gestionali sulla rete logistica. In questo modo, gli utenti vengono supportati nel prendere decisioni più consapevoli e strategiche, contribuendo così alla costruzione di una Supply Chain più reattiva e adattabile alle fluttuazioni della domanda e alle dinamiche di mercato.



# Indice

|          |                                                                              |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Progettazione e gestione della Supply Chain</b>                           | <b>8</b>  |
| 1.1      | Modelli di rete logistica: Centralizzazione e Decentralizzazione a confronto | 9         |
| 1.2      | La rete globale di magazzini fisici . . . . .                                | 9         |
| 1.3      | Il concetto di Magazzino Virtuale . . . . .                                  | 11        |
| 1.4      | Verso una Supply Chain resiliente . . . . .                                  | 13        |
| <b>2</b> | <b>Inventory Optimization: strumenti e modelli</b>                           | <b>15</b> |
| 2.1      | Funzionalità del tool di Inventory Optimization . . . . .                    | 16        |
| 2.2      | Calcolo dell'EOQ . . . . .                                                   | 18        |
| 2.3      | Calcolo del Safety Stock . . . . .                                           | 19        |
| 2.3.1    | Preparazione dei dati . . . . .                                              | 20        |
| 2.3.2    | Calcolo della volatilità . . . . .                                           | 22        |
| 2.3.3    | Calcolo statistico del Safety Stock: Fill Rate method . . . . .              | 23        |
| 2.3.4    | Calcolo statistico del Safety Stock: Service Level method . . . . .          | 28        |
| 2.3.5    | Safety Stock mensili e stagionalità . . . . .                                | 30        |
| 2.3.6    | Capping: limiti min / max di Safety Stock . . . . .                          | 31        |
| 2.3.7    | Virtualizzazione del Safety Stock . . . . .                                  | 34        |
| <b>3</b> | <b>Distribution Requirements Planning (DRP) e simulazioni Monte Carlo</b>    | <b>38</b> |
| 3.1      | Funzionamento del DRP . . . . .                                              | 38        |
| 3.2      | Simulazioni Monte Carlo . . . . .                                            | 40        |
| 3.3      | Metriche di valutazione . . . . .                                            | 43        |
| 3.4      | Valutazione grafica . . . . .                                                | 46        |



# Capitolo 1

## Progettazione e gestione della Supply Chain

In un panorama economico sempre più caratterizzato dalla globalizzazione e dalla crescente complessità dei flussi di merci e informazioni, la gestione efficiente della supply chain, rappresenta un elemento fondamentale per il successo delle aziende. La capacità di strutturare una rete logistica efficiente, flessibile e resiliente rappresenta infatti uno dei principali fattori per il successo, in particolare per le aziende attive nel settore degli spare parts automotive, dove la velocità e l'affidabilità nella consegna dei componenti sono determinanti per la competitività.

Tutte le grandi imprese si trovano oggi a dover affrontare sfide complesse e in continua evoluzione che derivano da diversi fattori. Tra questi il principale è la distribuzione geografica sempre più frammentata dei clienti, che nel mercato dei pezzi di ricambio richiede una capacità di consegna su larga scala, in tempi piuttosto contenuti anche verso regioni molto distanti; poi vi è la crescente eterogeneità e diversificazione dei modelli presenti sul mercato, che richiedono una gestione delle scorte agile e reattiva; e, infine, la necessità di mantenere sotto controllo i costi logistici della rete intera e il livello delle merci nei magazzini per un'ampia gamma di pezzi di ricambio, in modo da mantenere sempre un buon livello di servizio verso il cliente.

Inoltre, l'industria dei pezzi di ricambio è soggetta a dinamiche specifiche che ne aumentano la complessità: la gestione di moltissime tipologie di prodotto, ciascuno con proprie caratteristiche di domanda e relative criticità; la necessità di assicurare al cliente la disponibilità di componenti critici per le macchine in tempi ridotti, altrimenti questo creerebbe il blocco di esse per lungo tempo; il rischio di obsolescenza dei vari pezzi di ricambio e la logistica inversa legata ai resi e alle riparazioni.

Di fronte a questa complessità, diventa imprescindibile per le aziende sviluppare delle reti logistiche in grado di bilanciare l'efficienza operativa richiesta e una buona flessibilità, attraverso scelte progettuali che non si limitano solo alla localizzazione dei magazzini, ma che riguardano la gestione dei flussi, il bilanciamento dinamico delle scorte e l'adozione di tecnologie digitali avanzate.

## 1.1 Modelli di rete logistica: Centralizzazione e Decentralizzazione a confronto

Una delle prime decisioni da prendere nella progettazione della supply chain riguarda la configurazione della rete di magazzini. In particolare, le aziende si trovano a valutare due modelli organizzativi contrapposti.

Da un lato c'è il modello centralizzato che prevede la concentrazione delle attività logistiche in un numero ridotto di magazzini di grandi dimensioni. Questa scelta consente di semplificare la gestione degli stock e di garantire una visibilità unificata sui flussi logistici. Tuttavia, tale configurazione presenta delle criticità, soprattutto in un contesto come quello degli spare parts, dove la dispersione geografica dei clienti e la necessità di tempi di consegna estremamente ridotti rendono rischioso affidarsi a pochi nodi centrali.

All'estremo opposto, il modello decentralizzato si fonda su una rete più diffusa di magazzini locali. Questa architettura consente di ridurre sensibilmente i tempi di consegna e di aumentare la flessibilità operativa, a fronte però di una maggiore complessità nella gestione di tutti i diversi nodi della rete.

Nella realtà operativa, però, la maggior parte delle aziende decide di affidarsi a soluzioni ibride, integrando i principi di centralizzazione e decentralizzazione al fine di massimizzare i vantaggi di entrambi i modelli. In questo contesto, si sta sempre più virando verso la progettazione di reti logistiche multilivello, nelle quali magazzini di primo livello svolgono un ruolo di coordinamento per una rete di magazzini secondari, posizionati strategicamente in prossimità dei principali poli di domanda. Questa scelta strategica ha un impatto diretto su alcune caratteristiche chiave: il livello di servizio al cliente in termini di velocità e affidabilità; una migliore sostenibilità economica attraverso il bilanciamento di costi di trasporto e gestione delle scorte; e infine un'ottima resilienza operativa, ossia la capacità della supply chain di reagire e adattarsi a interruzioni e variazioni improvvise della domanda.

Di conseguenza, la progettazione della rete di magazzini non rappresenta una semplice questione operativa, ma è un elemento cruciale della strategia competitiva aziendale. Non si tratta soltanto di ottimizzare singole strutture logistiche, ma di adottare modelli evoluti, capaci di orchestrare in modo integrato e dinamico una rete di magazzini distribuiti a livello globale. Questo approccio richiede visibilità in tempo reale dell'intera rete, rapidità di risposta agli eventi e un costante bilanciamento dei flussi di merci, al fine di supportare la crescita e la competitività sui mercati internazionali. È in quest'ottica che si inserisce il caso di studio descritto di seguito, dove analizzeremo come la supply chain sia stata progettata e gestita per affrontare queste sfide nel settore degli spare parts automotive.

## 1.2 La rete globale di magazzini fisici

L'azienda oggetto di analisi ha sviluppato nel corso degli anni una rete diffusa di magazzini fisici, dislocati strategicamente nei mercati di maggiore rilevanza commerciale. La presenza fisica in più aree geografiche non è frutto di una semplice espansione territoriale, bensì il risultato di una pianificazione accurata che considera diverse variabili: il volume e

la stagionalità della domanda locale, la stagionalità delle vendite, la vicinanza ai principali snodi logistici (porti e aeroporti), nonché la competitività nel contesto di riferimento.

Nei mercati ad alta priorità strategica, come Europa Occidentale, Nord America e Asia Orientale, l'azienda concentra un numero maggiore di magazzini per garantire più copertura e quindi un servizio rapido ed efficiente. Queste aree, caratterizzate da un'elevata domanda, aspettative di consegna molto rapide e una forte competizione nel mercato, impongono una presenza stabile e prossima ai clienti finali. In questo contesto, la presenza fisica rappresenta un elemento competitivo imprescindibile per mantenere la competitività e rispondere alle crescenti esigenze del mercato.

Al contrario, nei mercati emergenti o nelle aree con minore rilevanza commerciale, l'azienda adotta un approccio diverso. Qui la scelta è di limitare il numero di magazzini fisici, facendo affidamento su connessioni logistiche efficaci con i centri di distribuzione delle regioni vicine. Questo modello consente di mantenere la capacità di servire il territorio con un adeguato grado di flessibilità, evitando investimenti eccessivi in contesti dove la domanda è ancora in fase di sviluppo.

La rete di magazzini fisici svolge un ruolo strategico nella gestione della supply chain, in particolare nel settore dei pezzi di ricambio. Questa infrastruttura consente all'azienda di perseguire tre obiettivi fondamentali:

- *Ridurre i tempi di consegna verso il cliente finale.* La vicinanza geografica tra i magazzini e i punti di consumo, come officine e distributori, permette di abbattere in modo significativo i lead time di spedizione. Questo aspetto è particolarmente critico in contesti dove il fermo macchina comporta perdite economiche rilevanti e i clienti si aspettano consegne rapide e puntuali.
- *Ottimizzare i costi logistici.* La localizzazione strategica dei magazzini in prossimità dei mercati principali consente di ridurre i costi legati al trasporto a lungo raggio, limitando la dipendenza da spedizioni internazionali molto costose. Inoltre, un attento bilanciamento tra costi di struttura e logistici contribuisce a ottimizzare il costo complessivo delle operazioni.
- *Garantire una maggiore flessibilità operativa.* Una rete distribuita di magazzini permette una risposta rapida a variazioni improvvise della domanda o a eventi imprevisti, come picchi stagionali, emergenze locali o interruzioni della supply chain globale. La possibilità di ridistribuire le scorte e utilizzare flussi logistici alternativi aumenta la resilienza dell'intera rete e ne rafforza la capacità di adattamento.

All'interno della supply chain, i magazzini fisici non hanno tutti le stesse dimensioni né svolgono le stesse funzioni: infatti l'azienda adotta una struttura multilivello. Alcuni centri, localizzati in aree strategiche e dotati di ampie capacità operative, fungono da magazzini principali, coordinando le attività di ricezione, smistamento e distribuzione verso le aree circostanti. Altri magazzini, di dimensioni invece più contenute, operano come satelliti logistici nella rete.

Questa configurazione permette all'azienda di modulare la propria capacità operativa in funzione delle caratteristiche locali, ottimizzando al tempo stesso gli investimenti infrastrutturali, ma mantenendo sempre elevati standard di servizio. In sintesi, permette di ottenere un equilibrio efficiente tra costi e prestazioni.

### 1.3 Il concetto di Magazzino Virtuale

La crescente complessità della gestione logistica su scala globale ha spinto le grandi imprese a superare la tradizionale gestione isolata dei singoli magazzini fisici, sviluppando modelli organizzativi più evoluti. Per tale scopo nasce il concetto di Magazzino Virtuale (Virtual Warehouse, VW), come soluzione innovativa per ottimizzare il controllo e il coordinamento delle scorte all'interno di reti logistiche multi-livello. Il Magazzino Virtuale non rappresenta una struttura fisica, bensì un'entità gestionale che consente di aggregare, sotto un'unica unità operativa, un insieme di magazzini fisici dislocati su un territorio. Ogni Magazzino Virtuale funge da punto di controllo centralizzato, garantendo la visibilità in tempo reale delle scorte presenti nei magazzini fisici collegati, il bilanciamento dinamico dei flussi di merci tra i vari nodi della rete per ottimizzare la disponibilità dei prodotti nei pressi della domanda, e la pianificazione delle spedizioni in uscita.

Quindi, la rete di magazzini fisici, descritta in precedenza, viene organizzata in aggregazioni geografiche, ciascuna gestita attraverso un Virtual Warehouse, con l'obiettivo di migliorare il coordinamento e la gestione delle scorte su base territoriale. A seconda dell'estensione e della complessità dell'area interessata, queste aggregazioni possono essere strutturate a livello continentale, dove ogni macro-regione dispone di un VW che raggruppa tutti i magazzini fisici presenti, oppure a livello regionale, in particolare per i continenti più vasti e economicamente strategici, come Europa e America. In questi casi, il territorio viene suddiviso in diverse zone operative, ciascuna con un proprio VW, al fine di garantire una gestione ancora più efficiente e localizzata.

Come già anticipato, all'interno di ciascun Virtual Warehouse i magazzini fisici non hanno tutti le stesse dimensioni né le stesse funzioni. Infatti questi sono organizzati secondo una struttura gerarchica multilivello che definisce ruoli e responsabilità operative. In particolare, i magazzini fisici si suddividono in:

- *Magazzino di Primo Livello (WH Source)*: è il magazzino principale all'interno della rete virtuale, rappresenta il punto di riferimento principale e ha la funzione di centro di approvvigionamento. Solitamente è dotato di una maggiore capacità di stoccaggio, livelli di stock più elevati e una struttura logistica in grado di gestire volumi più significativi.
- *Magazzini di Secondo Livello*: questi magazzini supportano il WH Source, aiutando nella gestione della distribuzione locale delle merci o in caso di picchi di domanda.

Nella figura 1.1 è riportato uno schema che mostra un esempio di una regione virtuale. Dall'immagine risulta chiaro come il magazzino di primo livello rappresenti il punto di contatto diretto con i fornitori: è infatti questo nodo a ricevere tutte le merci per l'intera regione virtuale, per poi ridistribuirli ai magazzini secondari associati. Grazie a tale

configurazione, l'intera rete regionale è in grado di rispondere in maniera coordinata alla domanda del mercato, assicurando che ogni magazzino disponga delle scorte necessarie per soddisfare i propri clienti.

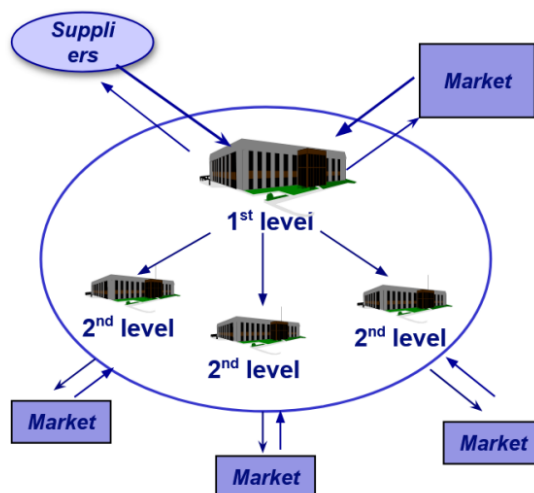


Figura 1.1. Schema rappresentativo di una regione virtuale

L'adozione dei Magazzini Virtuali offre numerosi vantaggi nella gestione dei pezzi di ricambio per il settore automotive. Grazie alla visibilità centralizzata delle scorte distribuite nei magazzini fisici, l'azienda può ottimizzare la pianificazione, evitando livelli di stock elevati e migliorando l'efficienza complessiva della rete. I flussi logistici diventano più agili e reattivi, poiché la possibilità di orchestrare dinamicamente i movimenti tra i vari magazzini consente di rispondere tempestivamente ai cambiamenti della domanda. Questo approccio offre inoltre una notevole flessibilità e scalabilità perché permette di adattare rapidamente la rete logistica a eventuali espansioni geografiche. Infine, la più importante, una gestione intelligente delle risorse all'interno della regione virtuale contribuisce a migliorare il servizio al cliente, riducendo i tempi di consegna e aumentando la capacità di evadere ordini da magazzini più vicini al cliente finale.

Vista la necessaria ma complessa connessione tra i diversi magazzini all'interno della rete, l'efficienza operativa del Magazzino Virtuale dipende fortemente dall'utilizzo di tecnologie digitali avanzate, in grado di garantire uno scambio di informazioni quasi in tempo reale su tutta la rete. Sistemi di Warehouse Management (WMS) su scala globale permettono di tracciare in modo continuo le scorte lungo tutta la rete distributiva, offrendo visibilità in tempo reale su giacenze e movimenti. Per supportare le decisioni operative, vengono utilizzati anche strumenti e modelli di ottimizzazione della logistica distribuita, capaci di suggerire dinamicamente le migliori soluzioni. Per sfruttare a pieno queste tecnologie, deve essere messo a disposizione di tutti i responsabili della supply chain un tool o una dashboard in grado di fornire una panoramica dettagliata e sempre aggiornata delle giacenze, dei flussi di movimentazione e delle performance logistiche, consentendo

decisioni rapide, consapevoli e mirate al miglioramento continuo dell'efficacia complessiva del sistema.

## **1.4 Verso una Supply Chain resiliente**

In un contesto di mercati sempre più globalizzati, caratterizzati da un'elevata volatilità della domanda e da aspettative crescenti da parte dei clienti in termini di rapidità e affidabilità delle consegne, la gestione efficiente della rete logistica diventa un fattore critico di successo. Per affrontare tali sfide, risulta fondamentale adottare modelli organizzativi flessibili. In questo scenario, l'utilizzo di una struttura multilivello, che aggrega i magazzini fisici all'interno di Magazzini Virtuali, rappresenta una soluzione strategica in grado di garantire maggiore resilienza operativa, ottimizzazione delle risorse e capacità di risposta rapida alle evoluzioni del mercato globale.

Questo modello consente di combinare la visibilità e l'efficienza tipiche della centralizzazione con la rapidità di risposta e la flessibilità di una rete decentralizzata. L'azienda riesce così a ottimizzare i costi logistici, riducendo la dipendenza da spedizioni a lungo raggio, a migliorare il livello di servizio, grazie a tempi di consegna ridotti, e a incrementare la resilienza operativa, grazie alla possibilità di ridistribuire dinamicamente le scorte e di attivare flussi alternativi in caso di interruzioni.

È infatti importante sottolineare che una rete logistica basata sul concetto di Magazzino Virtuale non deve essere considerata una configurazione statica. Al contrario, la sua efficacia dipende dalla capacità dell'azienda di adattare continuamente la rete alle evoluzioni del mercato, sfruttando le opportunità offerte dalla digitalizzazione e dall'analisi dei dati per ottimizzare costantemente la propria struttura operativa.

In conclusione, in un contesto in cui la rapidità e l'affidabilità delle consegne rappresentano sempre più un vantaggio competitivo, la progettazione strategica della supply chain assume un ruolo cruciale nel determinare il successo delle imprese sui mercati globali.



## Capitolo 2

# Inventory Optimization: strumenti e modelli

Come anticipato nel capitolo precedente, nel settore dei ricambi automotive, la gestione dell'inventario rappresenta una delle attività più delicate e strategicamente rilevanti all'interno della supply chain. A differenza di altri settori, dove la domanda può essere più stabile e prevedibile, il mercato dei pezzi di ricambio si differenzia per un'elevata variabilità della richiesta, un'ampia gamma di articoli da gestire e una forte pressione nel garantire un elevato livello di servizio al cliente finale. Questi elementi rendono la gestione delle scorte un'operazione complessa, ad alto impatto economico e determinante per la competitività dell'impresa.

La complessità nella gestione dell'inventario si intensifica ulteriormente quando l'azienda opera su scala globale, con una rete logistica articolata e composta da numerosi magazzini fisici dislocati in diverse aree geografiche. In questo contesto, la capacità di coordinare e prendere decisioni sull'intera rete diventa un fattore cruciale per mantenere il controllo delle scorte e garantire un buon livello di servizio.

Viste queste difficoltà, la gestione tradizionale e localizzata nei singoli magazzini dell'inventario non è più sufficiente: le decisioni su quando e quanto riordinare, dove allocare le scorte e come bilanciare la disponibilità tra i diversi magazzini devono essere supportate da strumenti avanzati di pianificazione e ottimizzazione, capaci di gestire in modo efficace l'interdipendenza tra i vari nodi della rete.

Per rispondere a queste esigenze, l'azienda ha deciso di introdurre un tool di Inventory Optimization, progettato per:

- migliorare la visibilità e la condivisione dei dati lungo l'intera rete;
- supportare decisioni di approvvigionamento più accurate e coordinate con tutta la rete;
- ottimizzare i livelli di scorta, riducendo al minimo sia la possibilità di avere un eccesso di inventario per alcuni articoli sia il rischio di esaurimento scorte.

L'elemento distintivo del tool è la capacità di favorire la collaborazione tra tutti gli attori coinvolti nella pianificazione della rete logistica. Infatti le decisioni possono essere

prese da responsabili di magazzino, pianificatori regionali o team centrali che gestiscono l'intera supply chain, ognuno con il proprio obiettivo specifico. Quindi, in questo modo ciascun utente ha la possibilità di accedere a una base dati condivisa e aggiornata in tempo reale, per lavorare con obiettivi allineati per l'intera rete.

Questo strumento rappresenta un passo decisivo verso una gestione dell'inventario più integrata, consentendo di affrontare la complessità operativa non come un ostacolo, ma come un'opportunità strategica. La sua implementazione trasforma la rete logistica in un sistema intelligente e interconnesso, capace di adattarsi rapidamente alle esigenze del mercato.

## 2.1 Funzionalità del tool di Inventory Optimization

Per affrontare la crescente complessità della gestione degli inventari per i magazzini a livello globale, le aziende possono fare affidamento su strategie di Inventory Optimization. In questa direzione, per l'azienda analizzata è stato sviluppato un tool avanzato e integrato, pensato proprio per supportare la pianificazione delle scorte in una rete logistica distribuita e multilivello. Più che un semplice strumento di calcolo, questo si configura come un vero e proprio sistema decisionale collaborativo, capace di garantire visibilità, coerenza e reattività lungo l'intera rete di magazzini, sia fisici che virtuali. Il suo obiettivo principale è trasformare dati grezzi, provenienti dai diversi poli della rete, in informazioni utili per guidare decisioni operative e strategiche in modo coordinato.

Le funzionalità chiave del tool includono:

1. la *condivisione in tempo reale dei dati* relativi a scorte, domanda e ordini di approvvigionamento tra tutti gli attori della rete, dai gestori dei singoli magazzini fisici distribuiti a livello globale ai planner regionali, fino al team centrale di approvvigionamento e ai manager della supply chain. Questa visibilità uniforme garantisce a ciascun utente l'accesso a informazioni aggiornate, affidabili e coerenti, eliminando la possibilità che vengano prese decisioni basate su dati incompleti. Questa funzionalità è particolarmente vantaggiosa: in una rete così complessa, la possibilità di condividere in modo quasi istantaneo le informazioni consente di coordinare azioni tra entità geograficamente distanti, mantenendo l'equilibrio ottimale tra disponibilità delle scorte e controllo dei costi.
2. la *capacità di calcolare in modo dinamico i livelli ottimali di inventario* per ciascun articolo della rete, tenendo conto di diversi fattori: dalle fluttuazioni della domanda alle caratteristiche specifiche del prodotto, fino alle condizioni operative locali. Grazie all'impiego di modelli statistici avanzati e algoritmi predittivi, il sistema può adattare automaticamente i livelli di scorta in funzione delle variazioni stagionali o di improvvisi cambiamenti della domanda, differenziare le strategie di gestione per articoli più critici e meno, e proporre quantità di riordino ottimali (Economic Order Quantity, EOQ) insieme a livelli adeguati di scorta di sicurezza (Safety Stock, SS) per ogni articolo in un nodo della rete. Questo approccio consente in particolare di minimizzare il rischio di avere eccedenze o carenze di stock. A differenza di un

sistema statico, il tool aiuta ad aggiornare costantemente le proprie raccomandazioni in base ai dati più recenti, rendendo il sistema capace di rispondere con tempestività alle mutevoli esigenze del mercato.

3. il *supporto alle decisioni coordinate all'interno della rete globale*, un aspetto cruciale in contesti logistici complessi, dove ogni scelta presa in un singolo magazzino può avere ripercussioni significative sugli altri. Il sistema è progettato per analizzare queste interdipendenze e proporre azioni coerenti con la strategia complessiva dell'azienda, evitando decisioni isolate e puntuali che potrebbero generare inefficienze o squilibri. Per supportare gli utenti il tool consente di simulare scenari alternativi (what-if analysis) e di analizzarne l'impatto sull'intera rete. In questo modo, le decisioni diventano il frutto di un processo integrato, capace di migliorare l'efficacia della pianificazione e ridurre i rischi legati a scelte non coordinate.
4. la *capacità di gestire la rete logistica come un ecosistema interconnesso*, superando la visione tradizionale e frammentata del singolo magazzino considerato come entità autonoma. Qui, ogni magazzino diventa parte attiva di un sistema più ampio, in cui informazioni, scorte e responsabilità vengono condivise, bilanciate e coordinate in funzione degli obiettivi comuni. La visione unificata della rete consente di ottimizzare la distribuzione geografica delle scorte, semplificare i flussi inter-magazzino e aumentare la capacità complessiva di risposta alle variazioni, sia prevedibili che improvvise, della domanda. Grazie a questo approccio, la rete non è più un insieme di nodi indipendenti, ma un sistema dinamico, in grado di adattarsi rapidamente alle mutevoli esigenze del mercato. Il risultato è un miglioramento significativo delle performance globali della supply chain, non solo in termini di riduzione dei costi, ma anche di affidabilità operativa, reattività e qualità del servizio offerto ai clienti finali.

Dopo aver illustrato le principali funzionalità del tool di *Inventory Optimization*, è opportuno soffermarsi su uno degli aspetti centrali della gestione delle scorte, che può essere sintetizzato con la seguente domanda: quanta merce è necessario mantenere in ciascun magazzino per garantire un adeguato livello di servizio ai clienti, evitando al tempo stesso un incremento eccessivo dei costi per l'azienda?

Per affrontare questo problema si è fatto riferimento al modello dell'*Economic Order Quantity* (EOQ), ampiamente utilizzato nella gestione dell'inventario. In tale approccio rivestono un ruolo cruciale due parametri: la quantità ottimale da riordinare (EOQ) e il livello di scorta di sicurezza (Safety Stock). Questi elementi costituiscono la base delle decisioni di approvvigionamento e, nella soluzione proposta, non vengono considerati come valori statici, ma come grandezze flessibili e adattabili alle specifiche esigenze operative di ciascun magazzino.

Uno dei punti di forza del tool risiede infatti nella sua versatilità: gli utenti, dislocati nei vari poli della rete globale, hanno la possibilità di scegliere tra differenti modalità di calcolo di questi parametri, adattando il modello alle specificità degli articoli e dei mercati locali. Questa flessibilità consente non solo di applicare formule differenti in base al comportamento della domanda, ma anche di svolgere vere e proprie analisi su come tali differenze possono modificare il comportamento dell'intero sistema.

Ad esempio, attraverso diverse configurazioni dei parametri necessari per il calcolo, i planner possono eseguire simulazioni “what-if”, valutando in anticipo l’impatto che diverse strategie avrebbero sui livelli di servizio, sui costi di magazzino e sulla disponibilità complessiva della rete. In questo modo il tool non si limita a proporre una soluzione unica, ma diventa un ambiente decisionale dinamico, capace di adattarsi alle diverse caratteristiche dei pezzi di ricambio e di guidare scelte più consapevoli e mirate. Nei paragrafi seguenti verranno quindi approfonditi i modelli matematici alla base del calcolo del Safety Stock e dell’EOQ, insieme alle principali opzioni di configurazione disponibili per gli utenti.

## 2.2 Calcolo dell’EOQ

Il calcolo dell’Economic Order Quantity (EOQ) costituisce uno dei capisaldi dell’Inventory Management e ha lo scopo di determinare la quantità ottimale da ordinare ogni volta che si effettua un approvvigionamento. L’obiettivo principale è ridurre al minimo il costo totale di gestione delle scorte, che può essere schematizzato come la somma di due componenti di natura contrapposta:

- *Costo di ordinazione* ( $S$ ): rappresenta il costo fisso associato all’emissione e alla gestione di un ordine. Vi rientrano le spese amministrative, i costi di trasporto e ricezione e, più in generale, tutti i costi operativi che si ripetono a ogni ciclo di riordino.
- *Costo di mantenimento a magazzino* ( $H$ ): rappresenta il costo di detenere una singola unità di prodotto a magazzino per un anno. Include i costi di stoccaggio e i rischi legati all’obsolescenza o al deterioramento.

Per comprendere il meccanismo che porta alla formula classica per il calcolo dell’EOQ, si parte definendo il costo totale annuo di gestione dell’inventario, espresso come:

$$C(Q) = C_{\text{ord}}(Q) + C_{\text{hold}}(Q)$$

dove  $Q$  indica la quantità ordinata a ogni ciclo.

Se la domanda annua è pari a  $D$  unità, il numero di ordini effettuati in un anno è  $\frac{D}{Q}$ . Poiché ogni ordine comporta un costo fisso  $S$ , il costo totale di ordinazione è dato da:

$$C_{\text{ord}}(Q) = \frac{D}{Q} \cdot S$$

Il livello medio delle scorte durante un ciclo di approvvigionamento è pari a  $\frac{Q}{2}$  (si parte da  $Q$  e si arriva progressivamente a 0, assumendo un consumo costante). Moltiplicando questo valore per il costo annuo di mantenimento per unità  $H$ , si ottiene:

$$C_{\text{hold}}(Q) = \frac{Q}{2} \cdot H$$

Sostituendo i due contributi nella funzione del costo totale si ottiene:

$$C(Q) = \frac{D}{Q} \cdot S + \frac{Q}{2} \cdot H$$

Tale espressione mostra chiaramente il *trade-off* alla base della gestione delle scorte:

- quantità  $Q$  elevate riducono il numero di ordini annui e quindi i costi di ordinazione, ma incrementano il livello medio di inventario e dunque i costi di mantenimento;
- quantità  $Q$  ridotte hanno l'effetto opposto, aumentando i costi di ordinazione e riducendo quelli di mantenimento.

Per determinare la quantità  $Q$  che minimizza il costo totale si procede con la derivazione rispetto a  $Q$  e ponendo uguale a zero:

$$\frac{dC(Q)}{dQ} = -\frac{DS}{Q^2} + \frac{H}{2} = 0$$

Da cui si ricava:

$$\frac{H}{2} = \frac{DS}{Q^2} \implies Q^2 = \frac{2DS}{H}$$

Prendendo la radice quadrata si ottiene la **formula di Wilson**:

$$Q = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

La formula mostra che la quantità ottimale dipende direttamente dalla domanda annua  $D$  e dal costo di emissione degli ordini  $S$ , mentre è inversamente proporzionale al costo di mantenimento  $H$ . In termini pratici:

- un incremento della domanda o dei costi di ordinazione porta a ordinare lotti più grandi;
- un aumento dei costi di mantenimento spinge invece a ridurre le quantità per non mantenere scorte eccessive.

## 2.3 Calcolo del Safety Stock

Il calcolo del Safety Stock (SS) rappresenta un altro passaggio fondamentale per ottimizzare la gestione delle scorte, in quanto consente di determinare, per ogni singolo part e per ciascun magazzino, sia fisico che virtuale, la quantità di scorta di sicurezza necessaria per garantire il livello di servizio desiderato. L'obiettivo è quindi quello di assicurare che le fluttuazioni della domanda e le incertezze legate ai tempi di approvvigionamento non compromettano la disponibilità del prodotto, riducendo al minimo il rischio di stock-out.

Il dimensionamento del Safety Stock non è un'attività banale, poiché deve tener conto di diversi fattori critici che caratterizzano la supply chain e la gestione logistica di essa. In particolare:

- la *variabilità della domanda* o, in alternativa, l'errore delle future previsioni (*forecast error*), che può rendere incerto il fabbisogno reale;
- l'*incertezza e la variabilità dei lead time*, ossia i tempi di consegna, che possono subire variazioni a seconda delle condizioni operative e di mercato;
- i *vincoli di policy aziendali*, come ad esempio limiti minimi o massimi di SS, che influenzano le soglie entro cui muoversi;
- la *stagionalità della domanda*, che introduce variazioni cicliche nei fabbisogni durante l'anno e richiede un adeguamento dinamico delle scorte;
- la *struttura della rete logistica*, caratterizzata dalla coesistenza di magazzini fisici e virtuali, organizzati su più livelli (magazzini di primo e secondo livello).

Per gestire e tenere conto di tutte queste complessità, il tool di calcolo del Safety Stock opera su una finestra temporale di 12 mesi e segue un processo strutturato in più fasi. In primo luogo, viene calcolato un valore statistico di SS di base (*Statistical SS*), derivato dall'analisi dei dati storici o previsti e sulla base dei parametri selezionati dagli utenti. Questo valore iniziale viene successivamente modulato per riflettere gli andamenti stagionali, traducendosi in 12 valori mensili di Safety Stock distinti. Il passo successivo è l'applicazione di regole di *capping*, volte a rispettare i vincoli di policy prefissati. Infine, il processo si conclude con la *virtualizzazione*, che adatta i valori calcolati alla struttura della rete logistica, distinguendo tra magazzini fisici e virtuali.

In questo modo, il calcolo del Safety Stock non si limita a fornire una stima quantitativa, ma diventa uno strumento dinamico di supporto decisionale, capace di bilanciare esigenze operative, vincoli organizzativi e obiettivi strategici di servizio al cliente.

### 2.3.1 Preparazione dei dati

In questa sezione vengono descritti i dati di input utilizzati dal tool e le trasformazioni preliminari necessarie a rendere tali dati pronti per il calcolo dello Safety Stock (SS). L'obiettivo è quindi di definire un set di variabili statistiche che alimentano gli step successivi di calcolo dell'algoritmo.

Tutti i dati e i parametri impiegati nel processo di calcolo sono i seguenti:

- *Serie storica della domanda (36 mesi)*: eventuali valori mancanti vengono impostati a zero per preservare la continuità della serie. Tali valori non vengono imputati con medie o interpolazioni per non introdurre bias sulla variabilità.
- *Forecast mensile* e relativi *indici stagionali* per i 12 mesi successivi, calcolati tramite algoritmi previsionali e specifici modelli.
- *Lead time*: l'utente può selezionare tra diverse opzioni. Il lead time *teorico/contrattuale*, definito dalle condizioni concordate con il fornitore; il lead time *effettivo*, stimato automaticamente dal tool sulla base degli ordini storici, che considera eventuali ritardi usuali; oppure il lead time *forzato*, inserito manualmente dall'utente per particolari esigenze operative.

- *Parametri di policy*: ricavati dalla Inventory Policy Matrix (IP Matrix) associata al singolo articolo. Tra i principali parametri utili in questo calcolo ci sono il *Target Service Level* (TSL), il *Target Fill Rate* (TFR) e i limiti di scorta minima (Min SS) e scorta massima (Max SS), generalmente espressi in mesi di domanda prevista, utilizzati nella fase di capping.

Per ogni articolo (*part/warehouse*) si costruisce il demand vector a partire dalla più antica osservazione positiva nella serie storica di 36 mesi di domanda, nel seguente modo:

1. Si individua l'osservazione positiva più vecchia (primo mese con domanda  $> 0$ ).
2. Si eliminano i periodi precedenti e si conserva il tratto da tale mese fino all'ultimo disponibile.

Dal vettore risultante di  $n$  osservazioni, si calcolano i seguenti indicatori, la media e la deviazione standard mensile:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n D_t \quad \sigma_D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (D_t - \bar{D})^2}$$

Per modellare la domanda, il tool supporta due famiglie di distribuzioni:

- *Normale (Gaussiana)*: appropriata per materiali con domanda media/alta, andamento approssimativamente simmetrico e variabilità ben rappresentata da una deviazione standard continua.
- *Poisson*: indicata per materiali a bassa domanda e intermittente, quando la probabilità di osservare mesi con domanda nulla è non trascurabile e gli arrivi sono discreti.

Tali distribuzioni della domanda possono essere assegnate ai diversi pezzi di ricambio direttamente dagli utenti secondo due modalità:

1. *Automatica*: il sistema confronta il *forecast medio mensile*  $\bar{F}$  con un parametro soglia  $X$  configurabile e utilizza la seguente regola:

$$\bar{F} > X \Rightarrow \text{modello Gaussiano} \quad \text{altrimenti} \quad \text{modello Poisson.}$$

2. *Forzatura manuale*: l'utente può imporre globalmente l'uso della distribuzione di Gauss o di Poisson per tutti gli articoli.

Al termine del processo di preparazione dei dati, per ciascun *part/warehouse* sono disponibili:

- $\bar{D}$  (media mensile della domanda) e  $\sigma_D$  (deviazione standard mensile).
- $LT$  (lead time in mesi) e  $\sigma_{LT}$  (deviazione standard del lead time).

- $\bar{F}$  (media mensile del forecast),  $\sigma_{FE}$  (deviazione standard dell'errore di forecast mensile) e gli indici stagionali mensili  $seas\_index_m$ .
- Modello di distribuzione selezionato (Gauss/Poisson) e parametri relativi alla *inventory policy* attiva (TSL, TFR, Min/Max SS).

Queste grandezze costituiscono la base informativa per gli step successivi del calcolo del Safety Stock, in cui la variabilità della domanda e l'incertezza del lead time sono combinate in modo coerente con il livello di servizio desiderato e con i vincoli di policy aziendali.

### 2.3.2 Calcolo della volatilità

La volatilità rappresenta la variabilità attesa della domanda durante il lead time ed è uno degli elementi fondamentali nel calcolo della Safety Stock. Essa costituisce il componente statistico che, moltiplicato per un fattore di servizio legato al livello di servizio desiderato, consente di dimensionare la scorta di sicurezza in maniera coerente con l'incertezza del sistema. In altre parole, maggiore è l'incertezza e quindi la volatilità, maggiore sarà la quantità di Safety Stock necessaria per proteggere il processo produttivo dal rischio di stockout.

Il calcolo della volatilità può essere realizzato con diversi metodi, configurabili in funzione delle caratteristiche dell'articolo considerato e della qualità dei dati a disposizione. I diversi metodi implementati sono i seguenti:

- **STD Demand:** In questo metodo si utilizza la variabilità storica della domanda. Poiché la domanda si accumula lungo l'orizzonte del lead time, la deviazione standard cresce con la radice quadrata del tempo. Pertanto, la formula è:

$$volatility = \sigma_D \sqrt{LT}$$

mentre la domanda attesa nel lead time è data da:

$$\bar{D} \cdot LT$$

- **STD Forecast Error:** Quando si dispone di previsioni di domanda e si vuole considerare l'incertezza legata alla loro accuratezza, si utilizza la deviazione standard dell'errore di previsione. Anche in questo caso la volatilità cresce con  $\sqrt{LT}$ , quindi:

$$volatility = \sigma_{FE} \sqrt{LT}$$

con domanda attesa:

$$\bar{F} \cdot LT$$

- **STD Demand + STD Lead Time:** In altri scenari gli utenti possono voler considerare anche il fatto che il lead time presenta incertezza, dunque occorre tener conto di entrambi i contributi. In questo caso si applica la regola della somma delle varianze per variabili indipendenti:

$$volatility = \sqrt{(\sigma_D \sqrt{LT})^2 + (\sigma_{LT} \cdot \bar{D})^2}$$

Qui il primo termine riflette la variabilità della domanda nel tempo, mentre il secondo rappresenta l'effetto dell'incertezza nel lead time moltiplicata per la domanda media. La domanda attesa resta:

$$\bar{D} \cdot LT$$

- **STD Forecast Error + STD Lead Time:** Analogamente al caso precedente, si considera contemporaneamente l'incertezza della previsione e la variabilità del lead time. La formula è:

$$volatility = \sqrt{(\sigma_{FE} \sqrt{LT})^2 + (\sigma_{LT} \cdot \bar{F})^2}$$

dove il primo termine quantifica la variabilità dovuta alla qualità della previsione, mentre il secondo cattura l'effetto del lead time variabile. La domanda attesa è:

$$\bar{F} \cdot LT$$

L'inclusione della variabilità del lead time introduce un ulteriore livello di realismo, poiché nella pratica operativa i tempi di approvvigionamento non sono costanti e possono variare in funzione di diversi fattori logistici o esterni.

Infine, la scelta tra l'utilizzo della domanda storica e l'errore di forecast dipende dall'affidabilità delle previsioni e dalla disponibilità di dati. In contesti con previsioni affidabili oppure in cui non sono presenti dati relativi alla domanda perché si tratta di un nuovo articolo in commercio, l'approccio basato sull'errore di forecast può meglio rappresentare l'incertezza futura; viceversa, laddove i dati storici siano robusti, risulta più opportuno basarsi direttamente sulla variabilità osservata nella domanda passata.

In sintesi, il calcolo della volatilità costituisce un passaggio fondamentale per la determinazione del livello di Safety Stock, in quanto consente di tradurre l'incertezza della domanda e del lead time in valori numerici concreti. La volatilità così stimata viene successivamente utilizzata nel calcolo statistico del Safety Stock, che può essere effettuato mediante due approcci principali: il *Fill Rate Method* e il *Service Level Method*.

Nelle prossime sezioni, durante la descrizione di questi due metodi di calcolo del SS, quando si farà riferimento alla media e alla deviazione standard della domanda nel lead time, per questi valori verrà rispettivamente utilizzata la domanda attesa nel lead time e la volatilità calcolata in uno di questi modi.

### 2.3.3 Calcolo statistico del Safety Stock: Fill Rate method

Una volta stimata la volatilità della domanda durante il lead time, il sistema può procedere al calcolo del *Safety Stock statistico* utilizzando il cosiddetto *Fill Rate Method*. Questo approccio si adatta al modello di distribuzione della domanda, distinguendo tra distribuzione Gaussiana e distribuzione Poissoniana, in modo da garantire accuratezza anche per SKU a bassa domanda.

Elemento centrale del metodo è il parametro  $Q$ , che rappresenta il lotto di riferimento e viene utilizzato per la valutazione dei backorders tollerabili al fine di mantenere il Fill Rate desiderato. Per impostazione predefinita,  $Q = 1$ , ma l'utente può configurarlo scegliendo il massimo tra diverse grandezze, quali:

- Economic Order Quantity (EOQ)
- Minimum Order Quantity (MOQ)
- Media mensile del forecast moltiplicata per il lead time
- Media mensile della domanda moltiplicata per il lead time

In tal modo,  $Q$  riflette il volume di riferimento più significativo rispetto al contesto operativo, influenzando direttamente il numero massimo di ordini arretrati tollerabili.

### Distribuzione Gaussiana

Per SKU caratterizzati da domanda elevata o moderata, la domanda durante il lead time può essere modellata come variabile casuale continua  $D_{LT}$  distribuita normalmente, con media  $\mu_{LT}$  e deviazione standard  $\sigma_{LT}$ , come calcolate nello step precedente:

$$D_{LT} \sim \mathcal{N}(\mu_{LT}, \sigma_{LT}^2).$$

In questo metodo, l'attenzione non è posta sulla probabilità di non andare in stockout, bensì sul *fill rate*, ossia sulla quantità di domanda complessiva che si riesce a soddisfare direttamente con la merce in magazzino quando arriva una richiesta. Perciò qui non si tiene conto solo della frequenza degli stockout, ma anche dell'entità media degli arretrati generati durante il ciclo di riordino.

Per quantificare il legame tra quantità ordinata, volatilità della domanda e obiettivo di fill rate, si introduce l'indice  $E[BO]_{\text{target}}$ , definito come:

$$E[BO]_{\text{target}} = \frac{Q}{\sigma_{LT}} (1 - \text{TFR})$$

dove:

- $Q$  è il lotto di riferimento,
- $\sigma_{LT}$  rappresenta la deviazione standard della domanda durante il lead time,
- TFR è il fill rate target espresso come valore frazionale.

$E[BO]_{\text{target}}$  esprime il numero massimo di ordini arretrati che il sistema può tollerare senza compromettere il livello di fill rate desiderato. Da un punto di vista operativo si osservano alcune relazioni intuitive:

- Un fill rate target più elevato riduce  $1 - \text{TFR}$  e dunque porta a un  $E[BO]_{\text{target}}$  più basso, poiché si accetta una quota minore di domanda inevasa.
- Una maggiore volatilità della domanda (ovvero un  $\sigma_{LT}$  più alto) riduce  $E[BO]_{\text{target}}$ , poiché la stessa quantità di riordino riesce a coprire meno efficacemente le fluttuazioni.

- Un incremento della quantità di riordino  $Q$  aumenta  $E[BO]_{\text{target}}$ , migliorando la capacità del sistema di fronteggiare la variabilità e riducendo l'impatto degli arretrati sul fill rate.

Un'altra quantità che viene introdotta è il punto di riordino, o *Reorder Point* ( $ROP$ ), rappresenta la quantità di scorta al di sotto della quale viene emesso un nuovo ordine per aumentare il livello di scorte all'interno del magazzino. Questo valore per definizione è la somma della domanda media durante il lead time e del Safety Stock:

$$ROP = \mu_{LT} + SS$$

Il numero atteso di ordini arretrati  $E[BO]$ , nel momento in cui viene emesso un nuovo ordine una volta che il livello di magazzino arriva al  $ROP$ , può essere espresso come:

$$\begin{aligned} E[BO] &= \int_{ROP}^{\infty} (x - ROP) f_{D_{LT}}(x) dx \\ &= \int_{ROP}^{\infty} (x - ROP) \frac{1}{\sigma_{LT}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_{LT})^2}{2\sigma_{LT}^2}} dx \end{aligned}$$

Definendo un fattore di servizio  $K$  nel seguente modo:

$$K = \frac{ROP - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}}$$

e sostituendo usando  $z = \frac{x-\mu_{LT}}{\sigma_{LT}} \implies dx = \sigma_{LT}dz$ , si ottiene:

$$\begin{aligned} E[BO] &= \int_K^{\infty} (\mu_{LT} + z\sigma_{LT} - ROP) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \\ &= \sigma_{LT} \int_K^{\infty} (z - K) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \\ &= \sigma_{LT} L(K) \end{aligned}$$

dove

$$\begin{aligned} L(K) &= \int_K^{\infty} (z - K) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \\ &= \int_K^{\infty} z\phi(z) dz - K \int_K^{\infty} \phi(z) dz \\ &= \phi(K) - K(1 - \Phi(K)) \end{aligned}$$

è una funzione di perdita normale dove:

- $\phi(K) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-K^2/2}$  è la funzione di densità della normale standard.
- $\Phi(K) = \int_{-\infty}^K \phi(t)dt$  è la funzione di distribuzione cumulativa della normale standard.

In tal modo, il numero atteso di ordini arretrati può essere espresso come:

$$E[BO] = \sigma_{LT} L(K)$$

L'obiettivo operativo del sistema è garantire che tale valore non superi il numero massimo di backorders accettabili definito da  $E[BO]_{\text{target}}$ , quindi si impone che:

$$E[BO] \leq E[BO]_{\text{target}} \Rightarrow \sigma_{LT} L(K) \leq E[BO]_{\text{target}}$$

Poiché l'equazione per  $K$  non è invertibile analiticamente, si ricorre a tabelle pre-calcolate che collegano  $E[BO]_{\text{target}}$  ai corrispondenti valori di  $K$ . Questo approccio consente di determinare rapidamente il fattore di servizio  $K$  in pratica.

In termini statistici,  $K$  è un parametro che determina la posizione del punto di riordino rispetto alla media della distribuzione della domanda: spostandosi a destra della media di  $K$  deviazioni standard, si ottiene un livello di scorta che consente di rispettare la probabilità di servizio prefissata.

Il Safety Stock si calcola quindi come:

$$SS = K \cdot \text{volatilità}$$

perchè

$$ROP = \mu_{LT} + SS \Rightarrow K = \frac{ROP - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}} = \frac{SS}{\sigma_{LT}} \Rightarrow SS = K \sigma_{LT}$$

### Distribuzione di Poisson

Per SKU con domanda molto bassa, la modellazione gaussiana risulta spesso inadeguata. In questi casi è naturale modellare la domanda durante il lead time con una variabile di Poisson:

$$D_{LT} \sim \text{Poisson}(\lambda)$$

dove  $\lambda = E[D_{LT}]$  è la domanda attesa calcolata nello step precedente.

Dato un punto di riordino  $ROP$  discreto  $r \in N$ , il numero di ordini non soddisfatti oltre al ROP quando la domanda vale  $x$  è  $(x - r)^+ := \max(0, x - r)$ . Il valore atteso di tale quantità è

$$E[BO](r) = E[(D_{LT} - r)^+] = \sum_{x=r+1}^{\infty} (x - r) P(D_{LT} = x) = \sum_{x=r+1}^{\infty} (x - r) \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}. \quad (2.1)$$

Per variabili a valori interi non negativi vale la seguente identità, che rappresenta il valore atteso tramite la probabilità di coda:

$$(y - r)^+ = \sum_{t=1}^{\infty} \mathbf{1}\{y - r \geq t\} \Rightarrow E[(D_{LT} - r)^+] = \sum_{t=1}^{\infty} P(D_{LT} \geq r + t).$$

Riscrivendo si ottiene la forma equivalente:

$$E[BO](r) = \sum_{k=r+1}^{\infty} P(D_{LT} \geq k) = \sum_{k=r+1}^{\infty} (1 - F_{D_{LT}}(k-1)), \quad (2.2)$$

dove  $F_{D_{LT}}(k) = P(D_{LT} \leq k)$  è la funzione di ripartizione discreta (CDF) della Poisson. Le formule (2.1) e (2.2) sono equivalenti e forniscono due modalità numeriche per il calcolo di  $E[BO]$ .

Anche nel caso in cui la domanda segua una distribuzione di Poisson, in analogia con il modello basato su distribuzione normale, viene introdotto un vincolo sul numero atteso di backorders ritenuto accettabile. In questo scenario, però,  $E[BO]_{\text{target}}$  viene definito come:

$$E[BO]_{\text{target}} = Q(1 - TFR),$$

dove:

- $Q$  rappresenta la quantità di riordino,
- $TFR$  è il fill rate obiettivo, espresso come valore frazionale.

In modo analogo a prima, il termine  $1 - TFR$  esprime la quota massima di domanda che si ammette possa rimanere inevasa in media durante un ciclo di riordino. Moltiplicando tale frazione per la quantità ordinata  $Q$ , si ottiene un valore atteso di backorders tollerabili, espresso in unità fisiche. Quindi  $E[BO]_{\text{target}}$  definisce la soglia quantitativa che stabilisce fino a che punto sia accettabile accumulare arretrati senza compromettere l'obiettivo di fill rate prefissato.

A questo punto, per trovare il punto di riordino  $ROP$  si procede in modo iterativo fino a soddisfare il vincolo:

$$E[BO](ROP) \leq E[BO]_{\text{target}}$$

Un algoritmo semplice è:

1. Calcolare  $\lambda = E[D_{LT}]$  e fissare  $E[BO]_{\text{target}}$ .
2. Si pone  $r \leftarrow 0$ .
3. Calcolare  $E[BO](r)$  tramite (2.1) o (2.2).
4. Se  $E[BO](r) \leq E[BO]_{\text{target}}$ , allora  $ROP = r$  e termina; altrimenti  $r \leftarrow r + 1$  e si ripete dal passo 3.

Per il calcolo di  $E[BO](r)$  è spesso più efficiente usare la formula (2.2), perché coinvolge la CDF discreta:

$$F_{D_{LT}}(k) = \sum_{i=0}^k \frac{e^{-\lambda} \lambda^i}{i!}.$$

In pratica si troncano le somme ad un indice massimo  $M$  tale che  $\sum_{i=0}^M P(D_{LT} = i) \approx 1$  entro la precisione desiderata. Inoltre è possibile sfruttare la relazione ricorrente della pmf:

$$P(D_{LT} = k + 1) = \frac{\lambda}{k + 1} P(D_{LT} = k),$$

per aggiornare velocemente i termini della somma senza ricalcolare fattoriali o esponenziali ad ogni passo.

Di conseguenza, al termine della procedura iterativa, il punto di riordino  $ROP$  viene determinato come il più piccolo valore intero  $r$  tale che il numero atteso di backorders calcolato a quel livello di scorta non superi la soglia prefissata  $E[BO]_{\text{target}}$ , assicurando così che il livello di servizio desiderato sia mantenuto:

$$ROP = \min \left\{ r \in N : E[BO](r) \leq E[BO]_{\text{target}} \right\}.$$

Una volta fissato  $ROP$ , il *Safety Stock* viene definito come la parte del  $ROP$  che eccede la domanda attesa durante il lead time. Ricordando che  $\lambda = E[D_{LT}]$ , allora si ha che:

$$ROP = E[D_{LT}] + SS \implies SS = \max(0, ROP - \lambda). \quad (2.3)$$

### 2.3.4 Calcolo statistico del Safety Stock: Service Level method

Un approccio alternativo al calcolo del Safety Stock si basa direttamente sull'imposizione di un vincolo sul *service level*, senza passare attraverso il calcolo esplicito del numero atteso di backorders. In questo metodo, l'obiettivo è scegliere un livello di Safety Stock tale che la probabilità che la domanda durante il lead time  $D_{LT}$  sia coperta dalla scorta disponibile (cioè che non si verifichi stockout) sia almeno pari al *Target Service Level* (TSL). A seconda della natura della distribuzione della domanda, si distinguono due casi principali.

#### Distribuzione Gaussiana

In questo caso la domanda durante il lead time è sufficientemente elevata da poter essere modellata come variabile casuale continua con distribuzione normale:

$$D_{LT} \sim \mathcal{N}(\mu_{LT}, \sigma_{LT}^2),$$

Definendo il punto di riordino  $ROP$  in modo classico:

$$ROP = \mu_{LT} + SS$$

si vuole che la probabilità di non avere stockout durante il lead time sia almeno TSL; formalmente:

$$P(D_{LT} \leq ROP) \geq \text{TSL}.$$

Poiché  $D_{LT}$  segue una distribuzione normale, si può standardizzare usando la variabile:

$$Z = \frac{D_{LT} - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}} \sim \mathcal{N}(0,1).$$

Allora

$$P(D_{LT} \leq ROP) = P\left(\frac{D_{LT} - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}} \leq \frac{ROP - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}}\right) = \Phi\left(\frac{ROP - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}}\right),$$

dove  $\Phi$  è la CDF della normale standard. Quindi imporre  $P(D_{LT} \leq ROP) = \text{TSL}$  equivale a risolvere

$$\Phi\left(\frac{ROP - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}}\right) = \text{TSL}.$$

Poiché  $\Phi$  è strettamente crescente, esiste l'inversa e si ottiene:

$$\frac{ROP - \mu_{LT}}{\sigma_{LT}} = \Phi^{-1}(\text{TSL}).$$

Da cui, isolando  $ROP$  e ricordando che  $SS = ROP - \mu_{LT}$ ,

$$SS = \sigma_{LT} \Phi^{-1}(\text{TSL}).$$

Questa relazione si interpreta facilmente: il valore  $\Phi^{-1}(\text{TSL})$  rappresenta il numero di deviazioni standard da aggiungere alla media della domanda per garantire che la probabilità di stockout sia al più pari a  $1 - \text{TSL}$ . In altre parole, il Safety Stock non è altro che una barriera di protezione calcolata come multiplo della volatilità della domanda, dove il moltiplicatore dipende esclusivamente dal livello di servizio desiderato. Per esempio, un TSL del 95% implica  $\Phi^{-1}(0.95) \approx 1.645$ , e quindi il magazzino deve mantenere un buffer pari a circa 1.645 volte la deviazione standard della domanda durante il lead time.

Confrontando i due approcci, il *Service Level method* e il *Fill Rate method*, nel caso in cui la domanda sia approssimabile con una distribuzione normale, emerge come entrambi facciano uso di un parametro moltiplicativo della volatilità: nel primo caso il quantile della distribuzione normale, nel secondo il fattore di servizio  $K$ . In altre parole, sia  $K$  sia  $\Phi^{-1}(\text{TSL})$  svolgono il ruolo di coefficienti che scalano la deviazione standard  $\sigma_{LT}$  per determinare il Safety Stock.

È però fondamentale sottolineare che i due metodi perseguono obiettivi differenti:

- Il *Service Level method* assicura che la probabilità di non incorrere in stockout durante l'intero lead time (cycle service level) sia almeno pari al livello desiderato:

$$P(D_{LT} \leq ROP) \geq \text{TSL}.$$

- Il *Fill Rate method*, invece, pone un vincolo sul numero atteso di backorders, imponendo una condizione su  $E[BO]$ .

Questi due criteri, nonostante siano correlati, non sono equivalenti. In particolare, utilizzare  $\Phi^{-1}(\text{TSL})$  garantisce il rispetto del vincolo probabilistico sul livello di servizio, ma non implica necessariamente che il numero atteso di backorders sia ridotto sotto una certa soglia. Al contrario, imporre il vincolo su  $E[BO]$  può produrre un valore di  $K$  diverso dal quantile  $\Phi^{-1}(\text{TSL})$ , evidenziando così la distinzione sostanziale tra i due approcci.

### Distribuzione di Poisson

Quando la domanda durante il lead time è bassa, si assume che la domanda durante il lead time sia una variabile di Poisson:

$$D_{LT} \sim \text{Poisson}(\lambda), \quad \lambda = E[D_{LT}],$$

Analogamente, si richiede che la probabilità di non incorrere in stockout durante il lead time sia almeno pari al *Target Service Level* (TSL):

$$P(D_{LT} \leq r) = F_{D_{LT}}(r) \geq \text{TSL},$$

Il punto di riordino  $ROP$  verrà scelto come il più piccolo intero  $r$  che soddisfa tale equazione.

Per una variabile discreta si definisce il quantile come il minimo intero che rende la CDF almeno pari alla probabilità richiesta:

$$q = F_{\text{Poisson}}^{-1}(\text{TSL}; \lambda) = \min\{n \in N : F_{D_{LT}}(n) \geq \text{TSL}\}.$$

Per costruzione  $F_{D_{LT}}(q) \geq \text{TSL}$  e  $F_{D_{LT}}(q-1) < \text{TSL}$  (se  $q > 0$ ). Quindi, scegliendo  $ROP = q$ , il vincolo di servizio  $P(D_{LT} \leq ROP) \geq \text{TSL}$  è garantito.

In questo modo, la scorta di sicurezza è definita come l'eccesso del punto di riordino rispetto alla domanda attesa:

$$SS = ROP - \lambda.$$

Avendo scelto  $ROP = q = F_{\text{Poisson}}^{-1}(\text{TSL}; \lambda)$ , si ottiene quindi:

$$SS = \max\{0, q - \lambda\} = \max\{0, F_{\text{Poisson}}^{-1}(\text{TSL}; \lambda) - \lambda\}.$$

### 2.3.5 Safety Stock mensili e stagionalità

Una volta determinato il valore del Safety Stock statistico  $SS_{\text{stat}}$ , il tool offre la possibilità di adattare questo valore alla stagionalità della domanda. Questo passaggio è cruciale perché, in generale, la variabilità della domanda non si distribuisce in modo uniforme lungo l'anno, ma presenta picchi e cali legati a fattori stagionali, quali variazioni climatiche, festività o dinamiche di mercato.

L'applicazione o meno degli indici stagionali può essere controllata dagli utenti:

- Se questi non vengono utilizzati, si assume che la domanda non presenti variazioni stagionali rilevanti oppure che tali fluttuazioni possano essere trascurate. In pratica, questa opzione è particolarmente indicata per quei part la cui domanda si mantiene sostanzialmente stabile durante l'intero anno, senza picchi o cali significativi. In tale configurazione, il valore di  $SS_{\text{stat}}$  calcolato a livello annuo viene semplicemente replicato identico per ciascuno dei 12 mesi, generando così un Safety Stock mensile costante durante l'intero anno:

$$SS_1 = SS_2 = \dots = SS_{12} = SS_{\text{stat}}.$$

Questo approccio ha il vantaggio di essere semplice e garantire uniformità, ma risulta meno adatto nei casi in cui la domanda sia caratterizzata da andamenti stagionali particolarmente evidenti, poiché non riflette in modo adeguato tale variabilità.

- Se invece gli utenti decidono di utilizzare gli indici stagionali stimati, il valore del Safety Stock viene adattato mese per mese in funzione della stagionalità della domanda. In particolare, per ciascun mese  $m = 1, \dots, 12$ , si calcola un livello dedicato di scorta di sicurezza secondo la relazione:

$$SS_m = SS_{\text{stat}} \cdot \text{SeasIndex}_m,$$

dove  $\text{SeasIndex}_m$  è l'indice stagionale associato al mese  $m$ . Gli indici stagionali vengono stimati attraverso analisi statistiche sui dati storici della domanda. In questo modo, il valore di  $SS_{\text{stat}}$  viene scalato opportunamente per riflettere le fluttuazioni cicliche della domanda lungo l'anno.

Da un punto di vista operativo, nel secondo caso descritto, questa moltiplicazione consente di calibrare il valore del Safety Stock in base all'intensità attesa della domanda nel singolo mese. Ad esempio, se in un determinato mese la domanda storica risulta del 20% più elevata rispetto alla media annua, l'indice stagionale sarà pari a 1.2, e di conseguenza il Safety Stock mensile verrà aumentato in proporzione. Viceversa, nei mesi di domanda più debole l'indice sarà inferiore a 1, riducendo così il livello delle scorte.

In questo modo, tale procedura rappresenta un compromesso efficace: da un lato mantiene una logica statistica uniforme di calcolo del Safety Stock, dall'altro introduce la flessibilità necessaria a tenere conto delle ciclicità presenti nel mercato o nel settore specifico.

### 2.3.6 Capping: limiti min / max di Safety Stock

Dopo aver applicato l'eventuale stagionalizzazione, i valori di Safety Stock mensili così ottenuti vengono sottoposti a una fase di *capping*, ossia di applicazione di limiti inferiori e superiori. L'obiettivo di questa procedura è garantire che i valori finali di  $SS_m$  non risultino né troppo bassi (e quindi potenzialmente insufficienti a coprire la variabilità della domanda), né eccessivamente alti (con conseguente immobilizzo di capitale e rischio di obsolescenza).

La fonte di riferimento per la determinazione di questi limiti è l'*Inventory Policy Matrix*, in cui vengono definiti i parametri Min\_SS e Max\_SS, espressi in termini di mesi di copertura della domanda prevista. Tali valori, compresi tra 0 e 12 mesi, forniscono una intervallo operativo entro cui il Safety Stock deve rimanere.

L'applicazione del capping si può realizzare secondo due modalità principali: *Average Forecast Capping* e *Rolling Forecast Capping*.

#### Average Forecast Capping

In questa modalità, i limiti minimi e massimi del Safety Stock vengono determinati come multipli della domanda media mensile attesa. L'idea di fondo è semplice ma estremamente efficace: fissare i valori estremi di  $SS$  a una grandezza stabile e rappresentativa, ossia il consumo medio mensile stimato. Matematicamente, questi limiti vengono definiti come:

$$\text{min\_qty} = \text{avg\_monthly\_forecast} \cdot \text{Min\_SS},$$

$$\text{max\_qty} = \text{avg\_monthly\_forecast} \cdot \text{Max\_SS},$$

dove  $\text{avg\_monthly\_forecast}$  rappresenta il valore medio della domanda prevista su base mensile.

Una volta fissati questi due limiti, ciascun valore mensile di Safety Stock  $SS_m$ , derivante dal calcolo statistico e dall'eventuale stagionalizzazione, viene confrontato con l'intervallo  $[\text{min\_qty}, \text{max\_qty}]$ . Se  $SS_m < \text{min\_qty}$ , il valore viene rialzato al minimo; se invece  $SS_m > \text{max\_qty}$ , viene ridotto al massimo. Formalmente:

$$\text{capped\_SS}_m = \min \left( \max(SS_m, \text{min\_qty}), \text{max\_qty} \right).$$

Questa procedura ha una forte valenza operativa e gestionale:

- *Protezione da sottostime*: se il calcolo statistico o la stagionalità producono valori molto bassi, il cap minimo garantisce che il magazzino disponga comunque di una scorta di sicurezza sufficiente a gestire eventi imprevisti, riducendo il rischio di stockout.
- *Protezione da sovrastime*: al contrario, se i calcoli producono valori eccessivi, il cap massimo limita l'accumulo di scorte oltre un livello giudicato sostenibile, evitando immobilizzi di capitale e costi di stoccaggio troppo elevati.
- *Coerenza con la domanda media*: basare i limiti sul forecast medio mensile assicura che il dimensionamento del Safety Stock rimanga proporzionato al profilo complessivo della domanda, mantenendo una relazione logica e intuitiva tra consumo atteso e buffer di sicurezza.

In sintesi, l'*Average Forecast Capping* rappresenta una misura di controllo semplice e robusta: pur non modellando in modo dettagliato la stagionalità o l'evoluzione dinamica del forecast, consente di fissare confini ragionevoli entro cui il Safety Stock può variare, garantendo un equilibrio tra protezione dal rischio di stockout e contenimento dei costi di inventario.

## Rolling Forecast Capping

La modalità di *Rolling Forecast Capping* introduce un approccio più dinamico e sensibile all'evoluzione della domanda rispetto all'altra modalità di capping. L'idea di fondo è che i limiti minimo e massimo del Safety Stock non debbano essere calcolati una volta sola in funzione della media annua, ma debbano invece adattarsi mese per mese sulla base della struttura del forecast futuro.

Anche in questo caso, i parametri  $\text{Min\_SS}$  e  $\text{Max\_SS}$  definiti nella *Inventory Policy Matrix* rappresentano orizzonti di copertura espressi in mesi (anche frazionari). Essi specificano, rispettivamente, il numero minimo e massimo di mesi di domanda futura che il Safety Stock deve essere in grado di coprire.

Ad esempio, se il parametro  $Max\_SS$  è pari a 6.7 mesi, il limite superiore per un generico mese  $m$  viene determinato sommando i forecast dei successivi 6 mesi completi, più il 70% del forecast del settimo mese.

In termini generali, se  $F_{m+k}$  denota la previsione di domanda del mese  $m+k$ , i limiti si calcolano come segue:

$$Q_m^{max} = \sum_{k=1}^{\lfloor Max\_SS \rfloor} F_{m+k} + (Max\_SS - \lfloor Max\_SS \rfloor) \cdot F_{m+\lfloor Max\_SS \rfloor+1},$$

$$Q_m^{min} = \sum_{k=1}^{\lfloor Min\_SS \rfloor} F_{m+k} + (Min\_SS - \lfloor Min\_SS \rfloor) \cdot F_{m+\lfloor Min\_SS \rfloor+1}.$$

Una volta calcolati i valori  $Q_m^{min}$  e  $Q_m^{max}$ , il Safety Stock mensile viene adattato imponendo i limiti di capping:

$$capped\_SS_m = \min \left( \max(SS_m, Q_m^{min}), Q_m^{max} \right).$$

Questa procedura viene ripetuta per ciascuno dei 12 mesi della finestra di pianificazione, generando così una sequenza di intervalli  $[Q_m^{min}, Q_m^{max}]$  che non è statica, ma si aggiorna mese per mese seguendo il profilo della domanda prevista.

Dal punto di vista operativo, il *Rolling Forecast Capping* offre molteplici vantaggi:

- *Adattabilità alla stagionalità*: nei periodi in cui il forecast segnala picchi di domanda, i limiti risultano automaticamente più elevati, permettendo di dimensionare correttamente le scorte di sicurezza.
- *Reattività ai trend*: se la domanda presenta un trend crescente o decrescente, questo metodo lo cattura immediatamente, garantendo limiti di capping coerenti con l'andamento previsto.
- *Maggiore aderenza alla domanda reale*: definire i limiti sulla base delle somme cumulative del forecast, invece che su valori medi annui, permette di catturare meglio le oscillazioni della domanda. In questo modo si evita che il capping risulti eccessivamente appiattito e quindi poco rappresentativo delle dinamiche temporali effettive.

In sintesi, il *Rolling Forecast Capping* consente di disporre di un meccanismo di controllo dinamico, in cui i limiti non sono più rigidi, ma si muovono in parallelo alla domanda prevista. Questo approccio riduce sensibilmente il rischio di sottodimensionare le scorte nei periodi di picco o di eccedere in quelli di domanda bassa, portando a una gestione delle giacenze più efficiente, bilanciata e in linea con le reali esigenze.

### 2.3.7 Virtualizzazione del Safety Stock

Una volta determinati, per ciascun magazzino sia fisico che virtuale, i 12 valori mensili di Safety Stock  $\{capped\_SS_{w,m}\}_{m=1}^{12}$ , il passo successivo consiste nella loro trasformazione in valori di Safety Stock virtualizzato per ogni Virtual Warehouse (VW).

Il processo di virtualizzazione viene svolto su base mensile: per ciascun mese  $m \in \{1, \dots, 12\}$ , si considerano tutti i magazzini fisici  $w$  associati al VW in questione. La relazione di appartenenza fra magazzini fisici e magazzini virtuali è definita dalla Bill Of Distribution (BOD), che specifica la gerarchia e i legami logistici fra i vari nodi della rete. L'obiettivo principale della virtualizzazione è garantire coerenza aggregata: la quantità totale di Safety Stock prevista a livello di magazzino virtuale deve essere in equilibrio con la somma dei livelli di Safety Stock calcolati sui magazzini fisici sottostanti.

A seconda delle esigenze operative e delle priorità strategiche, gli utenti possono scegliere quale regola di virtualizzazione applicare. In particolare, la selezione della logica da adottare consente di indirizzare il processo verso obiettivi diversi:

- In alcuni contesti si desidera privilegiare la protezione dei magazzini di primo livello, ossia i nodi più centrali della rete.
- In altri scenari, invece, può risultare più vantaggioso distribuire una quota consistente del Safety Stock verso i magazzini di secondo livello, per bilanciare meglio le scorte all'interno della rete.

Sia  $V$  un virtual warehouse e  $W_V = \{w_1, \dots, w_n\}$  l'insieme dei magazzini fisici ad esso associati. Per ogni magazzino fisico  $w_i$  e per ogni mese  $m$  si dispone di:

- $capped\_SS_{i,m}$  : il Safety Stock mensile calcolato e già soggetto a capping;
- $\bar{F}_i$  : forecast medio mensile per il magazzino  $w_i$ ;
- il livello gerarchico che identifica se  $w_i$  è un magazzino di primo o secondo livello nella BOD.

Si definisce inoltre con  $capped\_SS_{V,m}^{VW}$  il valore del Safety Stock calcolato per il magazzino virtuale  $V$  nel mese  $m$ . Tale quantità rappresenta il livello di stock, già sottoposto alle procedure di capping, che deve essere coerentemente distribuito tra i magazzini fisici appartenenti a  $V$  a seconda della regola scelta.

#### Split Logic

Questa regola ha l'obiettivo di ripartire il livello di Safety Stock calcolato a livello di magazzino virtuale  $V$  tra tutti i magazzini fisici  $w_i \in W_V$  ad esso associati, in maniera proporzionale al contributo che ciascun magazzino fornisce in termini di forecast. In altre parole, il principio di base è quello di allocare più Safety Stock ai magazzini fisici che, sulla base della previsione di domanda, hanno un peso maggiore all'interno della rete.

Formalmente, per ciascun magazzino fisico  $w_i$  si definisce un peso relativo  $\omega_i$  sulla base della media mensile del forecast  $\bar{F}_i$ :

$$\omega_i = \begin{cases} \frac{\bar{F}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{F}_j}, & \text{se } \sum_{j=1}^n \bar{F}_j > 0, \\ \frac{1}{n}, & \text{se } \sum_{j=1}^n \bar{F}_j = 0, \end{cases}$$

in modo tale che valga sempre:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1.$$

Una volta ottenuti i pesi, dato il valore calcolato di Safety Stock del magazzino virtuale  $SS_{V,m}^{VW}$  per il mese  $m$ , la scorta di sicurezza per il magazzino fisico  $w_i$  risulta quindi:

$$virtualized\_SS_{i,m} = \omega_i \cdot SS_{V,m}^{VW}, \quad i = 1, \dots, n.$$

In questo modo viene garantita la conservazione del Safety Stock aggregato:

$$\sum_{i=1}^n virtualized\_SS_{i,m} = SS_{V,m}^{VW}.$$

In sintesi, la *Split Logic* permette di mantenere un legame diretto tra la distribuzione dello stock di sicurezza e la struttura della domanda prevista, garantendo al contempo l'esatta conservazione dell'aggregato virtuale.

### Square Logic

La *Square Logic*, analogamente alla regola di *Split*, è una modalità che ha come obiettivo quello di eliminare eventuali discrepanze tra il livello di Safety Stock calcolato a livello di Virtual Warehouse (VW) e la somma dei valori locali dei magazzini fisici ad esso associati. In particolare, questa seconda regola si occupa di ridistribuire la differenza tra il target virtuale e l'aggregato effettivo dei magazzini sottostanti, in modo da ristabilire la coerenza complessiva.

Per ogni mese  $m$  vengono quindi calcolati i seguenti valori:

$$Local\_SS_m = \sum_{i=1}^n capped\_SS_{i,m}, \quad \Delta_m = SS_{V,m}^{VW} - Local\_SS_m.$$

A seconda del segno di  $\Delta_m$ , si presentano tre casi distinti:

- $\Delta_m = 0$ : i valori locali coincidono esattamente con il target del VW; non è quindi necessaria alcuna correzione;
- $\Delta_m > 0$ : il livello di SS virtuale risulta superiore alla somma dei livelli locali; l'eccedenza deve essere ripartita tra i magazzini fisici;
- $\Delta_m < 0$ : il livello virtuale risulta inferiore al totale dei valori locali; è quindi necessario ridurre i livelli di alcuni magazzini fisici, oppure adeguare il livello del VW.

Nei casi in cui sia necessario redistribuire il delta, sia esso positivo o negativo, l'utente può scegliere quale regola applicare tra le seguenti opzioni:

- **Caso  $\Delta_m > 0$**

In questo scenario il livello di Safety Stock virtuale è superiore alla somma dei valori locali e l'eccedenza deve essere ripartita. Le possibili regole sono:

- *Opzione 1: Distribuire sui primi livelli*

L'intero delta viene assegnato al magazzino di primo livello definito nella BOD, mentre tutti i magazzini di secondo livello mantengono invariato il proprio livello di capped\_SS.

- *Opzione 2: Distribuire sui primi e secondi livelli*

Il delta viene distribuito proporzionalmente tra i magazzini di primo e secondo livello. Il peso di ciascun magazzino è calcolato in modo analogo a quanto avviene nella *Split Logic*, ma in questo caso sulla base del valore di capped\_SS già calcolato. In tal modo, i magazzini che dispongono già di un livello più elevato di scorta di sicurezza ricevono un incremento maggiore. Formalmente, per ogni magazzino fisico si ha:

$$virtualized\_SS = capped\_SS + \Delta_m \cdot weight.$$

- **Caso  $\Delta_m < 0$**

In questo caso il livello virtuale è inferiore alla somma dei valori locali e occorre ridurre la disponibilità complessiva. Le regole previste sono:

- *Opzione 1: Aumentare il livello virtuale*

I magazzini fisici mantengono i propri valori di capped\_SS invariati. L'intero delta viene assorbito dal magazzino virtuale, il cui livello di Safety Stock viene aumentato per compensare lo sbilanciamento.

- *Opzione 2: Diminuire sui secondi livelli*

La riduzione viene distribuita proporzionalmente sui magazzini di secondo livello, in base a un peso che riflette i rispettivi valori di capped\_SS. In questo modo si scarica l'impatto solo sui second-level, lasciando invariati i magazzini di primo livello. La formula per i magazzini di secondo livello risulta essere:

$$virtualized\_SS = capped\_SS - \Delta_m \cdot weight.$$

In conclusione, la virtualizzazione del Safety Stock rappresenta un passaggio cruciale per garantire coerenza e controllo nella pianificazione delle scorte all'interno di reti logistiche così complesse. Le diverse logiche di redistribuzione introdotte offrono un ventaglio di strumenti adattabili alle esigenze specifiche di ogni contesto operativo, consentendo agli utenti di modellare il processo in funzione degli obiettivi strategici desiderati.



## Capitolo 3

# Distribution Requirements Planning (DRP) e simulazioni Monte Carlo

Nel capitolo precedente sono stati presentati i metodi di calcolo dei parametri fondamentali per la gestione delle scorte, il *Safety Stock* e l'*Economic Order Quantity* (EOQ). Nella pratica questi valori vengono utilizzati all'interno del processo di *Distribution Requirements Planning* (DRP), ossia lo strumento con cui vengono pianificate le quantità da ordinare e da distribuire lungo l'intera rete logistica.

Un aspetto centrale da ricordare, come già visto in precedenza, è che i parametri in questione possono essere calcolati in diversi modi, usando diverse configurazioni: differenti livelli di servizio, utilizzo di diverse ipotesi sui lead time, o utilizzo di una formula diversa per calcolare il *Safety Stock*. Questa varietà di possibili parametrizzazioni rende necessario comprendere non soltanto il significato teorico dei valori, ma anche il loro effettivo impatto sul funzionamento del sistema di distribuzione.

Per questo motivo, al fine di analizzare in maniera approfondita le conseguenze delle scelte effettuate, si è deciso di implementare un modello di simulazione basato sul metodo Monte Carlo. Tale approccio permette di riprodurre virtualmente il comportamento del DRP in scenari caratterizzati da incertezza e variabilità, rendendo possibile osservare come i valori di *Safety Stock* ed EOQ si traducano, nella pratica, in prestazioni operative della rete.

In questo capitolo verrà quindi descritto il processo DRP e la metodologia di simulazione adottata, con l'obiettivo di fornire una valutazione critica e realistica delle diverse politiche di pianificazione basate sui valori suggeriti dal tool.

### 3.1 Funzionamento del DRP

Il *Distribution Requirements Planning* (DRP) è un processo aziendale di pianificazione che ha come obiettivo principale la determinazione di eventuali carenze di stock all'interno

della rete logistica. Quindi, attraverso questo strumento è possibile stabilire in maniera precisa sia quando sia dove debba essere emesso un nuovo ordine, così da garantire livelli di scorte adeguati nei magazzini. In questo modo si assicura un flusso costante di materiali lungo la supply chain, riducendo il rischio di rotture di stock e garantendo continuità al servizio offerto.

Il processo di DRP viene eseguito con cadenza settimanale e prende in considerazione tutti i magazzini virtuali, operando quindi a livello di regioni virtuali. Questo significa che gli ordini generati non riguardano i singoli magazzini fisici, ma le aggregazioni virtuali di questi. L'ordine calcolato dal DRP per una determinata regione virtuale viene consegnato direttamente dai fornitori al magazzino di primo livello della regione stessa. In una fase successiva, attraverso ulteriori processi gestionali interni, il materiale ricevuto dal magazzino principale viene ridistribuito verso i magazzini secondari, così da coprire l'intero fabbisogno della regione virtuale in maniera equilibrata.

Il punto cardine del funzionamento del DRP è rappresentato dal calcolo del *Reorder Point (ROP)*. Questo parametro costituisce la soglia critica che consente di stabilire il momento in cui è necessario emettere un nuovo ordine. In particolare, quando il livello delle scorte, considerando sia quelle disponibili in magazzino sia quelle attualmente in transito, scende al di sotto del ROP, il sistema individua la necessità di rifornire la regione virtuale al fine di riportare le giacenze ad un livello adeguato.

Il ROP è costruito integrando al suo interno due componenti principali: la domanda attesa durante il lead time e il livello di Safety Stock. La formulazione utilizzata, in linea con quanto definito nei capitoli precedenti, è la seguente:

$$ROP = \mu_{LT} + SS$$

dove:

- $\mu_{LT}$ : rappresenta la domanda attesa durante il lead time, calcolata come il prodotto tra la domanda media mensile prevista e il lead time espresso in mesi;
- $SS$ : indica il livello di Safety Stock, scelto tra i 12 valori calcolati in precedenza in funzione del mese in cui gira il DRP. In particolare, il livello considerato è quello del mese futuro corrispondente al lead time, poiché la decisione di emettere un ordine avviene oggi, ma il suo effetto in termini di disponibilità a magazzino si manifesta solo al momento della consegna.

Una volta calcolato il ROP, il DRP valuta la situazione di magazzino per decidere se emettere un nuovo ordine. La logica seguita è la seguente:

$$\text{stock\_lvl} + \text{in\_transit\_qty} \leq ROP \Rightarrow \text{emissione ordine (quantità EOQ)}$$

$$\text{stock\_lvl} + \text{in\_transit\_qty} > ROP \Rightarrow \text{nessun ordine}$$

dove:

- $\text{stock\_lvl}$ : rappresenta il livello di stock disponibile e utilizzabile in magazzino;

- `in_transit_qty`: indica la quantità già ordinata e attualmente in transito verso il magazzino.

L'integrazione dei parametri di Safety Stock e EOQ è quindi essenziale nel funzionamento del DRP:

- Il Safety Stock entra nel calcolo del ROP, agendo come livello di protezione contro l'incertezza della domanda e dei tempi di consegna, e prevenendo potenziali rotture di stock.
- L'EOQ, invece, definisce la quantità effettiva da ordinare quando si verifica la condizione di riordino, garantendo un equilibrio tra frequenza degli ordini e costi di mantenimento delle scorte.

In sintesi, il DRP utilizza i parametri calcolati nei capitoli precedenti come input fondamentali per generare ordini coerenti e sostenibili. Grazie all'integrazione tra ROP, Safety Stock ed EOQ, il sistema è in grado di trasformare valori teorici in decisioni operative, assicurando un processo di pianificazione robusto ed efficace.

## 3.2 Simulazioni Monte Carlo

Dopo aver analizzato il funzionamento del Distribution Requirements Planning e compreso il ruolo centrale di parametri come il Safety Stock e l'Economic Order Quantity, si è resa necessaria una fase di validazione delle politiche di approvvigionamento così definite. Per fare ciò è stato sviluppato un modello di simulazione basato sul metodo Monte Carlo, strumento particolarmente efficace per lo studio di sistemi complessi caratterizzati da variabili aleatorie.

Le simulazioni Monte Carlo risultano infatti adatte a descrivere la dinamica di un processo di pianificazione logistica in cui intervengono fattori intrinsecamente incerti, quali:

- la variabilità della domanda nei diversi nodi della rete;
- l'incertezza nei lead time di approvvigionamento.

L'obiettivo principale della simulazione è ottenere una proiezione realistica dell'andamento delle giacenze di magazzino su un orizzonte temporale medio-lungo, così da poter valutare l'impatto delle politiche di riordino derivate dal DRP. In particolare, disponendo di una previsione della domanda per i prossimi 18 mesi, il modello consente di analizzare l'evoluzione delle scorte per un anno e mezzo, fornendo come risultato metriche quantitative e una rappresentazione grafica del livello delle scorte nel tempo, in modo da identificare rapidamente eventuali criticità, come accumuli eccessivi o rischi di esaurimento delle scorte.

Le simulazioni vengono condotte a livello di *virtual warehouse*, coerentemente con la logica del DRP, che pianifica il riordino a livello aggregato di regione virtuale. Per ciascun

articolo e per ciascun magazzino virtuale, il modello Monte Carlo permette di generare molteplici traiettorie che rappresentano l'evoluzione del livello delle scorte disponibili in magazzino durante l'orizzonte temporale considerato (ad esempio 100 repliche), così da esplorare l'intera distribuzione dei possibili scenari futuri. Questa esigenza nasce dal fatto che alcune variabili chiave sono di natura aleatoria: la domanda, che varia intorno ai valori di forecast, e il lead time di consegna degli ordini, soggetto a variabilità. Perciò, nelle diverse repliche della simulazione, tali variabili vengono campionate da distribuzioni probabilistiche stimate sui dati a disposizione, così da riprodurre la variabilità tipica di un contesto reale.

Per la costruzione della simulazione vengono utilizzati i seguenti input:

- livello di stock iniziale nei magazzini virtuali,
- ordini già emessi e non ancora ricevuti (quantità in transito e date di arrivo attese),
- valori di Safety Stock ed EOQ ottenuti dal calcolo del tool da validare,
- previsioni di domanda mensile per i successivi 18 mesi e relativo errore standard,
- stima della deviazione standard del lead time, ottenuta da dati storici.

Gli ultimi due elementi rivestono un ruolo cruciale: essi definiscono infatti le distribuzioni di probabilità da cui vengono campionati i valori di domanda e lead time nelle diverse repliche.

Un aspetto critico riguarda la natura dei dati previsionali a disposizione: il forecast è espresso su base mensile ed è accompagnato dal relativo errore standard. Poiché il DRP opera con granularità settimanale, è stato necessario trasformare il dato mensile in una sequenza coerente di domande settimanali.

Formalmente, se  $D_M$  rappresenta la domanda mensile, essa può essere scomposta come somma delle domande settimanali  $D_{W,i}$ , con  $i = 1, \dots, 4$ :

$$D_M = \sum_{i=1}^4 D_{W,i}.$$

Assumendo indipendenza e contributo uniforme delle settimane, si sceglie di modellare ciascuna variabile settimanale come una variabile normale:

$$D_{W,i} \sim \mathcal{N}\left(\frac{\mu_M}{4}, \frac{\sigma_M^2}{16}\right),$$

dove  $\mu_M$  e  $\sigma_M^2$  indicano rispettivamente media e varianza della distribuzione mensile.

Questa scelta garantisce che la somma delle quattro variabili settimanali riproduca la distribuzione mensile voluta:

$$\sum_{i=1}^4 D_{W,i} \sim \mathcal{N}(\mu_M, \sigma_M^2).$$

In fase di simulazione, i valori settimanali della domanda vengono dunque campionati da tali distribuzioni, imponendo il vincolo di non negatività per garantire coerenza con la natura della variabile.

La gestione del lead time risulta più diretta: disponendo di una stima della media  $\mu_{LT}$  e della deviazione standard  $\sigma_{LT}$ , ricavate dai dati storici, il lead time effettivo per ciascun ordine viene campionato da una distribuzione normale:

$$LT \sim \mathcal{N}(\mu_{LT}, \sigma_{LT}^2).$$

In tal modo, ogni ordine emesso nel corso della simulazione è caratterizzato da un tempo di consegna variabile, in linea con l'incertezza osservata nei dati reali.

Definiti i dati in ingresso alla simulazione e chiarito il modo in cui le variabili casuali vengono generate, è ora possibile descrivere nel dettaglio come il processo di *Distribution Requirements Planning* sia stato schematizzato all'interno del modello simulativo.

Come già accennato, il DRP è un processo che gira con cadenza settimanale: ogni settimana viene valutato il livello delle scorte e si decide se emettere nuovi ordini. Per questo motivo, la simulazione è stata impostata come un modello a tempo discreto, in cui l'evoluzione del sistema viene osservata a intervalli settimanali. L'obiettivo è quindi quello di riprodurre la sequenza di eventi che avviene nei magazzini in una settimana, comprendendo il processo del DRP.

In particolare, la simulazione per ciascuna settimana, indicizzata con  $i$ , segue i seguenti passaggi:

1. **Aggiornamento ordini aperti.** All'inizio di ogni settimana si aggiornano i tempi residui di consegna degli ordini già emessi e non ancora ricevuti. In pratica, per ciascun ordine aperto si riduce il numero di giorni mancanti alla consegna di 7 unità.
2. **Ricezione ordini.** Si identificano gli ordini che vengono completati tra la settimana  $i - 1$  e la settimana  $i$ . La quantità di merce ricevuta è indicata con  $arr\_qty_{i-1}$ .
3. **Aggiornamento stock.** Il livello di stock della settimana corrente viene aggiornato aggiungendo al livello della settimana precedente la merce ricevuta:

$$stk\_lvl_i = stk\_lvl_{i-1} + arr\_qty_{i-1}.$$

4. **Calcolo della merce in transito.** Viene aggiornata la quantità di materiale ancora in transito, derivante dagli ordini emessi ma non ancora completati, indicata con  $in\_trans\_qty_i$ .
5. **Calcolo del punto di riordino.** Si procede con la logica del DRP calcolando il punto di riordino della settimana corrente:

$$ROP_i = avg\_monthly\_forecast \times LT_{months} + SS_{future},$$

dove  $SS_{\text{future}}$  rappresenta il livello di safety stock previsto nel mese corrispondente alla data attesa di arrivo del nuovo ordine. Ad esempio, se ci si trova nella prima settimana di marzo e il lead time medio è di 3,5 mesi, l'ordine atteso ricadrebbe a metà giugno: pertanto, il valore di  $SS$  considerato nella formula è quello calcolato per il mese di giugno.

6. **Decisione di riordino.** Una volta determinato il valore di  $ROP_i$ , il sistema verifica la condizione:

$$stk\_lvl_i + in\_trans\_qty_i < ROP_i.$$

Se la disuguaglianza è verificata, viene emesso un nuovo ordine; altrimenti non si procede ad alcun riapprovvigionamento.

7. **Emissione di un nuovo ordine.** Per ciascun articolo che necessita riordino, si inserisce un nuovo ordine nella lista degli ordini aperti. La quantità ordinata è pari al valore di EOQ, mentre il lead time effettivo viene generato campionando da una variabile casuale normalmente distribuita con media e deviazione standard stimate sui dati storici, come descritto in precedenza.
8. **Soddisfacimento della domanda settimanale.** Infine, dal livello di stock aggiornato viene sottratta la domanda effettiva della settimana,  $dem_i$ , campionata anch'essa dalle distribuzioni casuali derivate dal forecast mensile. Il livello di scorte a fine settimana sarà quindi:

$$stk\_lvl_i = stk\_lvl_i - dem_i,$$

e rappresenterà lo stock iniziale per la settimana successiva.

Questo schema iterativo consente di riprodurre passo dopo passo tutto ciò che può influenzare il livello di merci in magazzino, compreso il processo del DRP. In questo modo, per ciascuna replica desiderata, si ha la possibilità di simulare l'evoluzione settimanale del livello di stock in funzione della variabilità della domanda e dell'incertezza dei lead time. In tal modo si ottiene una rappresentazione probabilisticamente coerente e dinamica dell'intero processo di pianificazione.

### 3.3 Metriche di valutazione

Dopo aver definito il funzionamento della simulazione, è necessario comprendere come i risultati possano essere sfruttati per ottenere informazioni significative. L'obiettivo principale è quello di valutare, in maniera rigorosa e statisticamente solida, l'efficacia delle politiche di approvvigionamento basate sui parametri di Safety Stock e EOQ calcolati nei capitoli precedenti.

Poiché il sistema include numerose variabili casuali, l'approccio più adeguato non è quello di analizzare un singolo scenario futuro, bensì di generare molteplici repliche per ciascun articolo e magazzino virtuale. Questo permette di ottenere una visione probabilistica del comportamento del sistema e di stimare, con buona affidabilità, le prestazioni delle politiche adottate.

Per raggiungere questo obiettivo, i risultati di ciascuna simulazione vengono analizzati attraverso un insieme di metriche quantitative. Ogni metrica viene calcolata per ogni singola replica della simulazione, così da disporre di una distribuzione di valori per tali metriche piuttosto che di una singola osservazione. In questo modo, è poi possibile derivare delle statistiche per le diverse metriche che rendono la valutazione delle politiche di approvvigionamento più robusta e significativa.

Le metriche individuate appartengono al dominio della gestione delle scorte e risultano particolarmente efficaci per descrivere in modo accurato il comportamento del sistema:

- **Cycle Service Level:** rappresenta una delle metriche più diffuse e significative nell'ambito della gestione delle scorte, in quanto misura la probabilità che non si verifichi alcun evento di stockout all'interno di un ciclo di approvvigionamento. In termini pratici, il ciclo di approvvigionamento è definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra due ordini successivi. Matematicamente, la metrica viene calcolata come:

$$CSL = 1 - \frac{\text{numero di settimane con stockout}}{\text{numero totale di settimane osservate}}.$$

Un valore di  $CSL$  prossimo a 1 indica un'elevata capacità del sistema di mantenere la disponibilità dei prodotti senza interruzioni, mentre valori più bassi segnalano una frequenza significativa di stockout. Quindi questa misura è particolarmente rilevante perché fornisce una stima diretta del livello di servizio percepito dal cliente: più alto è il  $CSL$ , maggiore è la probabilità che il cliente possa ottenere il prodotto desiderato senza dover affrontare mancanze di stock.

- **Fill Rate:** è una metrica che misura la percentuale della domanda effettivamente soddisfatta con lo stock disponibile. A differenza del Cycle Service Level, che fornisce un'informazione di tipo binario (ovvero se in un determinato periodo si è verificato o meno uno stockout), il Fill Rate è in grado di quantificare in modo più dettagliato la copertura della domanda. Formalmente, può essere espresso come:

$$FR = 1 - \frac{\text{quantità di domanda non soddisfatta}}{\text{domanda totale}}.$$

Un valore di  $FR$  vicino a 1 indica che quasi tutta la domanda è stata soddisfatta con le giacenze disponibili in magazzino, mentre valori inferiori segnalano carenze rilevanti nella capacità del sistema di rispondere alle richieste dei clienti. Quindi questa metrica consente anche di valutare l'impatto degli stockout in termini quantitativi, mostrando quanta parte della domanda non viene effettivamente coperta.

- **Frequenza degli Stockout:** per analizzare la frequenza con cui accadono episodi di stockout, vengono utilizzate due informazioni complementari. Da un lato, si misura il numero assoluto di settimane in cui si è verificato lo stockout, offrendo quindi una quantificazione immediata della ricorrenza del fenomeno. Dall'altro lato, si esprime la percentuale di settimane affette da stockout rispetto al totale dell'orizzonte temporale considerato, normalizzando così l'informazione e rendendola confrontabile tra scenari o orizzonti temporali diversi.

- **Average On-Hand:** rappresenta il livello medio di scorte disponibili lungo tutto l'orizzonte di simulazione. Questa metrica è particolarmente significativa perché fornisce una stima del capitale mediamente immobilizzato in magazzino, consentendo di valutare l'efficienza della gestione delle scorte dal punto di vista economico. Un valore elevato di Average On-Hand indica una maggiore disponibilità di merce, ma al costo di un maggiore investimento in inventario; al contrario, valori troppo bassi possono ridurre i costi di mantenimento, ma aumentare il rischio di stockout.
- **Max On-Hand:** indica il livello massimo di scorte registrato durante l'orizzonte di simulazione. Questa informazione è utile per individuare eventuali picchi di inventario che potrebbero comportare costi elevati di stoccaggio o problemi di capacità nei magazzini.
- **Min On-Hand:** rappresenta il livello minimo di scorte osservato durante la simulazione. Questa metrica è fondamentale per valutare quanto il sistema si avvicini a situazioni di criticità, anche nei casi in cui non si verifichi uno stockout effettivo. Un valore molto basso di Min On-Hand evidenzia condizioni di rischio, segnalando che anche piccole variazioni della domanda o del lead time potrebbero portare a rotture di stock.
- **Frequenza degli Ordini:** indica il numero totale di ordini di riapprovvigionamento emessi durante l'intero orizzonte temporale della simulazione. Questa informazione risulta utile per valutare la coerenza tra la politica adottata e gli obiettivi di ottimizzazione dei costi legati agli ordini. Un'elevata frequenza può indicare una politica molto reattiva ma potenzialmente più costosa, mentre valori più bassi suggeriscono una gestione più stabile ma a rischio di scorte insufficienti.
- **Turnover:** rappresenta l'efficienza con cui le scorte vengono utilizzate e ruotate all'interno del magazzino. Viene calcolato come il rapporto tra la domanda totale effettivamente soddisfatta e lo stock medio presente nel periodo considerato:

$$\text{Turnover} = \frac{\text{Domanda totale soddisfatta}}{\text{Stock medio}}.$$

Un valore elevato di Turnover indica che le merci ruotano rapidamente, suggerendo una gestione efficiente e un utilizzo ottimale del capitale immobilizzato. Al contrario, un valore basso segnala un accumulo eccessivo di scorte, con conseguente aumento dei costi di stoccaggio e rischio di immobilizzazione del capitale.

- **Frequenza periodi sotto Safety Stock:** viene calcolato il numero assoluto di settimane e la percentuale di settimane rispetto al totale in cui il livello di stock in magazzino risulta essere inferiore al Safety Stock. Questo consente di valutare l'efficacia del valore di Safety Stock utilizzato: valori elevati indicano che il livello di scorta di sicurezza non riesce a svolgere appieno la sua funzione di cuscinetto contro la variabilità della domanda e dei tempi di consegna, suggerendo possibili aree di intervento per migliorare la resilienza del sistema.

In sintesi, l'insieme di queste metriche consente di osservare il comportamento del sistema da diverse prospettive: dal livello di servizio al cliente, all'efficienza del magazzino, fino alla robustezza delle politiche di riordino.

Come accennato, le metriche vengono calcolate per ogni singola replica della simulazione. Tuttavia, il valore ottenuto da una singola replica non è sufficiente a fornire una valutazione robusta e statisticamente significativa. Per questo motivo, per ciascuna metrica, utilizzando i valori calcolati nelle diverse repliche, vengono successivamente calcolate delle statistiche che permettono di cogliere in maniera più completa il comportamento complessivo del sistema.

In particolare, per ogni metrica vengono considerati:

- la **media**, che fornisce un valore atteso medio del fenomeno osservato ed è utile per avere un'indicazione centrale del comportamento del sistema;
- la **deviazione standard**, che quantifica la variabilità dei risultati attorno alla media, segnalando quanto le prestazioni del sistema siano stabili o, al contrario, soggette a oscillazioni rilevanti;
- il **percentile al 5%** e il **percentile al 95%**, che rappresentano rispettivamente una stima delle situazioni peggiori e migliori osservabili. Tali valori sono particolarmente utili perché permettono di avere una misura della dispersione dei risultati e di individuare i possibili scenari estremi che, pur essendo meno frequenti, possono avere un forte impatto gestionale.

L'analisi di queste statistiche consente di valutare non solo l'andamento medio delle politiche di approvvigionamento, ma anche la loro robustezza rispetto all'incertezza della domanda e dei tempi di consegna. Ad esempio, una politica che mostra una media favorevole ma una deviazione standard molto elevata potrebbe rivelarsi poco affidabile, poiché esposta a forti fluttuazioni; al contrario, una politica con valori medi leggermente meno performanti ma con una variabilità ridotta potrebbe risultare preferibile in ottica di stabilità operativa.

Quindi, le statistiche calcolate permettono di trasformare la grande quantità di dati generati dalla simulazione in indicatori significativi e di facile interpretazione, funzionando come un ottimo strumento di supporto per le decisioni strategiche e operative nella gestione delle scorte.

### 3.4 Valutazione grafica

Le metriche quantitative e le relative statistiche descritte in precedenza costituiscono uno strumento fondamentale per validare i calcoli del tool in merito al livello del Safety Stock e dell'EOQ. Tuttavia, i soli indicatori numerici possono delle volte risultare poco intuitivi, soprattutto quando i valori osservati non sembrano coerenti o immediatamente interpretabili. Per questo motivo, accanto all'analisi statistica è stato sviluppato anche uno strumento di valutazione grafica, che consente di visualizzare in maniera diretta l'evoluzione del livello di stock nel magazzino e il comportamento delle politiche di riordino

simulate. Questa rappresentazione risulta particolarmente utile per fornire una visione immediata della quantità di merci in magazzino nel tempo, facilitando l'individuazione di eventuali criticità.

La prima tipologia di rappresentazione implementata riguarda la visualizzazione grafica di una singola replica della simulazione. In questo modo, per ciascun articolo all'interno del magazzino virtuale, è possibile analizzare più nel dettaglio come si sviluppa nel tempo la politica di riordino applicata. Nelle immagini 3.1 e 3.2, ad esempio, sono riportati due casi che mostrano l'evoluzione delle scorte per due diversi articoli nei rispettivi magazzini virtuali.

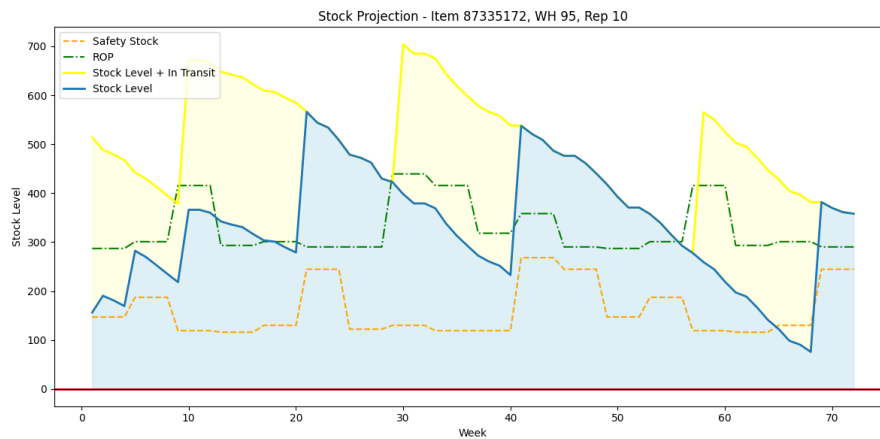


Figura 3.1. Visualizzazione di una replica della simulazione per un articolo con Safety Stock che varia su base stagionale

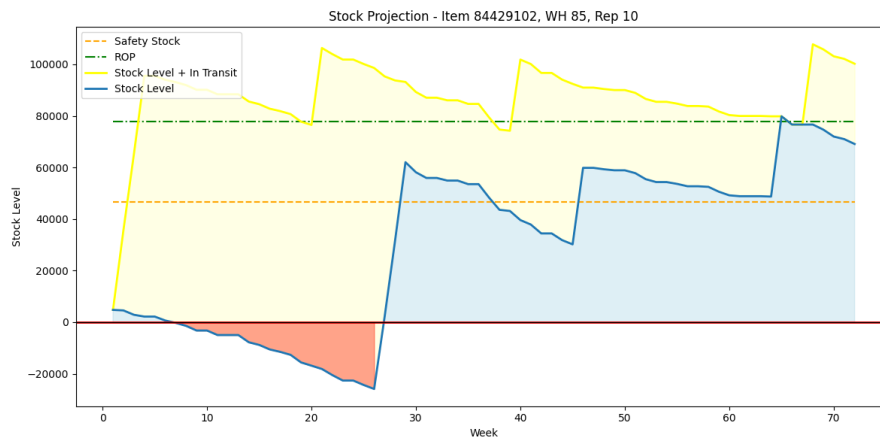


Figura 3.2. Visualizzazione di una replica della simulazione per un articolo che presenta rotture di stock

La linea blu continua rappresenta l'andamento dello stock disponibile in magazzino. In questo modo, osservandola, l'utente può comprendere immediatamente se, in quella replica, si verificano o meno episodi di stockout. Nel primo dei due esempi riportati il livello di scorte rimane sempre positivo, mentre nel secondo si evidenziano settimane in cui la domanda non riesce a essere soddisfatta.

In aggiunta alla linea dell'andamento delle scorte, nei grafici viene anche rappresentata una linea tratteggiata arancione che indica il livello di Safety Stock calcolato dal tool. Questo riferimento visivo è particolarmente importante, poiché permette di apprezzare il ruolo del Safety Stock come "cuscinetto" contro le incertezze della domanda e dei tempi di consegna. In alcuni casi, il livello di scorte scende a sfiorare il limite del Safety Stock senza oltrepassarlo, mostrando come quest'ultimo riesca a proteggere il sistema da possibili stockout. In altri casi, invece, la linea blu scende al di sotto del livello di sicurezza, segnalando che, senza il contributo del Safety Stock nel calcolo del Reorder Point, la probabilità di non riuscire a soddisfare la domanda sarebbe stata molto più elevata.

Un ulteriore elemento rappresentato nei grafici è la dinamica di emissione degli ordini del DRP. In particolare, la linea verde tratteggiata indica il Reorder Point, ROP, calcolato settimanalmente, mentre la linea gialla mostra la somma tra lo stock disponibile in magazzino e le quantità già ordinate ma non ancora consegnate. È immediato notare come l'emissione di un nuovo ordine avvenga ogni volta che la linea gialla supera il valore del Reorder Point: questo corrisponde precisamente alla logica presente nel processo DRP e permette di verificare in modo immediato la coerenza tra teoria e simulazione.

Oltre all'analisi delle singole repliche, è stata sviluppata una seconda tipologia di rappresentazione che considera simultaneamente l'insieme di tutte le repliche effettuate per ogni articolo. Questo approccio permette di passare da una visione puntuale, legata a un singolo scenario, a una prospettiva più ampia e robusta che permette di analizzare l'intero spettro di possibili comportamenti futuri del sistema. L'obiettivo è quello di sintetizzare l'incertezza caratteristica della gestione delle scorte, fornendo non solo una previsione media del livello di merci in magazzino, ma anche una chiara indicazione della variabilità attesa e delle situazioni estreme che potrebbero verificarsi.

Nelle figure 3.3 e 3.4 vengono riportati due esempi di tali rappresentazioni. In particolare, queste sono le visualizzazioni dell'intero insieme di repliche per gli articoli già selezionati negli esempi precedenti, in modo da vedere i vantaggi che ci sono nell'analizzare questo secondo tipo di grafici.

Per costruire questo tipo di rappresentazione, per ogni settimana del periodo simulato vengono calcolati il 5° e il 95° percentile del livello di stock. Questi due valori delimitano un intervallo che viene visualizzato graficamente come una fascia colorata. Questa fascia rappresenta la regione entro cui si colloca la maggior parte degli scenari futuri possibili per l'evoluzione del magazzino. In altre parole, questa fascia consente di comprendere immediatamente i margini di oscillazione del sistema e di valutare la probabilità di trovarsi in condizioni particolarmente favorevoli o, al contrario, critiche. A completare il quadro, una linea blu continua mostra la mediana delle diverse repliche, che funge da indicatore del comportamento centrale atteso del sistema.

Questa modalità di rappresentazione porta numerosi vantaggi. In primo luogo, consente di apprezzare in modo diretto quanto i risultati possano cambiare da una replica

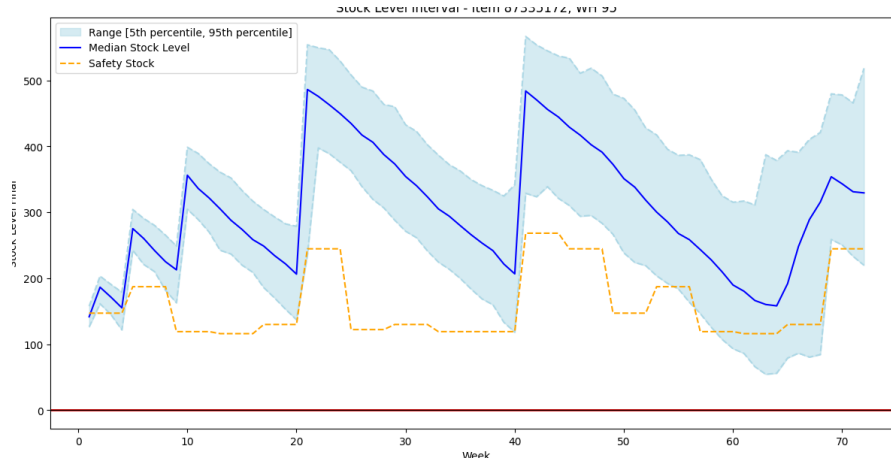


Figura 3.3. Visualizzazione aggregata della simulazione per un articolo con Safety Stock che varia su base stagionale

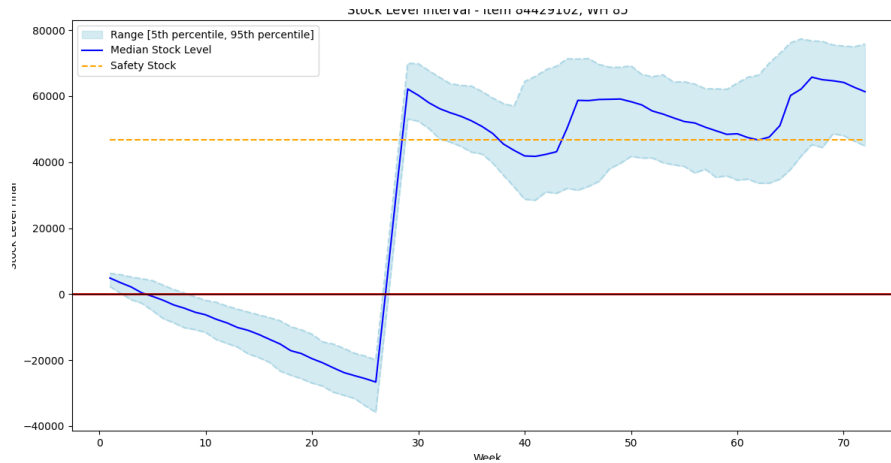


Figura 3.4. Visualizzazione aggregata della simulazione per un articolo che presenta rotture di stock

all'altra: se l'intervallo tra il 5° e il 95° percentile risulta molto ampio, significa che l'incertezza del sistema è elevata e che le politiche di approvvigionamento potrebbero portare a esiti molto diversi a seconda delle condizioni reali di domanda e lead time. Al contrario, un intervallo ristretto suggerisce che il sistema è relativamente stabile e che le decisioni di riordino producono risultati consistenti. In secondo luogo, questa rappresentazione aiuta a individuare tempestivamente gli scenari più estremi, ovvero quelli che si collocano al di sotto del 5° percentile o al di sopra del 95° percentile, i quali, pur non essendo i più probabili, possono avere un impatto rilevante in termini di costi o livelli di servizio.

Come nei grafici delle singole repliche, anche in questa rappresentazione è riportata la linea tratteggiata arancione che rappresenta il livello di Safety Stock. Un confronto

diretto tra la regione più probabile, la mediana e la soglia di sicurezza fornisce indicazioni importanti per gli utenti.

Infatti, teoricamente, la presenza del Safety Stock contribuisce a ridurre il rischio che le traiettorie simulate scendano in zone critiche, garantendo una migliore performance del magazzino anche negli scenari meno favorevoli. Perciò, quando l'intervallo tende ad adagiarsi sulla linea del Safety Stock, diventa evidente il ruolo di quest'ultimo come meccanismo di stabilizzazione per il sistema, e questo è sintomo di una corretta configurazione dei parametri per il calcolo di esso. Mentre nei casi in cui la regione colorata risulta molto spesso al di sotto del livello del Safety Stock è necessario rivedere le parametrizzazioni del calcolo. Ad esempio, potrebbero essere state scelte delle regole di calcolo che non hanno dato la giusta attenzione al fatto che l'articolo in esame presenta una forte stagionalità nella domanda.

In definitiva, questa seconda tipologia di visualizzazione non si limita a mostrare un valore medio o una singola traiettoria, ma rende possibile una valutazione più completa e consapevole del comportamento del sistema. L'utente può così comprendere non solo "cosa ci si aspetta" in media, ma anche "cosa potrebbe accadere" in termini di oscillazioni e incertezza del sistema, migliorando la capacità di prendere decisioni informate sulle politiche di approvvigionamento.

In sintesi, la valutazione grafica rappresenta un complemento indispensabile alle analisi numeriche: da un lato rende più immediata la comprensione delle dinamiche di riordino e di consumo delle scorte, dall'altro rafforza la capacità di individuare scenari critici e validare l'efficacia delle politiche di approvvigionamento proposte dal modello.



# Bibliografia

Jay Heizer, Barry Render, and Chuck Munson. *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management*. Pearson, 2023.

Abby Jenkins. What is a virtual warehouse for inventory management? 2022.

Stefan Minner. *Strategic Safety Stocks in Supply Chains*. Springer Berlin Heidelberg, 2000.

Fabrice Mocellin. *La gestione delle scorte e del magazzino*. Franco Angeli, 2017.

Max Muller. *Essentials of Inventory Management*. AMACOM, 2019.

Wilhelm Müller. Virtual warehousing: A modern solution for effective inventory management. 2024.