

# Università Politecnica delle Marche

Corso di Laurea Triennale in  
Ingegneria Informatica e dell'Automazione



GESTIONE DI UNA CATENA DI  
RIFORNIMENTO TRAMITE TECNICHE DI  
CONTROLLO DI SISTEMI DINAMICI  
SUPPLY CHAIN MANAGEMENT WITH  
DYNAMIC SYSTEMS CONTROL  
TECHNIQUES

Tesi di Laurea di:  
Edoardo Pantella

Relatore:  
Prof. Leopoldo Ietto

Anno Accademico 2021/2022

# Indice

## Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1: Gestione di una catena di rifornimento</b>	<b>2</b>
1.1 Importanza della gestione di una catena di rifornimento	4
1.2 Indice degli acronimi utilizzati	9
<b>CAPITOLO 2: Metodi classici</b>	<b>10</b>
2.1 Famiglia IOBPCS	10
2.2 Politica Order-Up-To	20
<b>CAPITOLO 3: Implementazione e risultati</b>	<b>22</b>
3.1 Prima tecnica di controllo	24
3.2 Seconda tecnica di controllo	27
3.3 Terza tecnica di controllo	30
3.4 Quarta tecnica di controllo	33
<b>CAPITOLO 4: Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>36</b>
4.1 Confronto tra i risultati	36
4.2 Sviluppi futuri	40
<b>Bibliografia</b>	<b>42</b>
<b>Ringraziamenti</b>	

# Introduzione

Per comprendere appieno lo scopo di questa tesi è necessario, innanzitutto, introdurre il problema della gestione di una catena di rifornimento. Questo problema è uno dei filoni di ricerca più importanti della teoria del controllo.

La logistica, intesa come funzione aziendale dedicata alla movimentazione delle merci nell'ambito del processo produttivo, si è evoluta nel corso del tempo nel più vasto concetto di Supply Chain Management (gestione della catena di rifornimento).

In questo elaborato viene fornita una rassegna di alcune tecniche di controllo della metodologia classica e vengono proposti, per alcune di esse, dei miglioramenti al fine di ottenere un controllo efficiente di sistemi di produzione/inventario a revisione periodica con beni deperibili.

In particolare, nel primo capitolo viene presentato il problema della gestione di una catena di rifornimento e la sua importanza, mentre nel capitolo successivo vengono presi in rassegna alcuni dei metodi della teoria classica del controllo. Successivamente, nel terzo capitolo, vengono implementate quattro diverse tecniche di controllo di una supply chain. Infine, nel quarto capitolo, vengono confrontati i risultati ottenuti.

# **1. Gestione di una catena di rifornimento<sup>1,2,3</sup>**

La teoria del controllo è stata utilizzata frequentemente nella modellazione e nell'analisi di sistemi operativi, nella produzione e nella logistica fin dagli anni Settanta e inoltre, ha trovato numerose applicazioni nella gestione di una catena di rifornimento dall'inizio del XXI secolo.

Nel 1982, i primi a parlare di Supply Chain Management furono due studiosi, Oliver e Webber, che lo definirono come una tecnica di riduzione delle scorte in aziende facenti parte della stessa filiera. Il termine supply chain management si utilizzava per parlare della gestione del magazzino e delle scorte all'interno di una catena di rifornimento.

Dare una definizione esaustiva di supply chain non è affatto semplice data la complessità della sua struttura. Una catena di rifornimento può essere definita come una rete di organizzazioni e processi in cui un certo numero di imprese diverse (fornitori, produttori, distributori e rivenditori) collaborano lungo l'intera catena per acquisire materie prime, convertire queste materie prime in prodotti finali specifici e consegnare questi prodotti finali ai clienti.

In altre parole, una catena di rifornimento è un sistema di imprese commerciali che si collegano tra loro per soddisfare la domanda dei consumatori. Le parti costitutive di una catena di rifornimento possono essere contenute nella stessa unità aziendale o appartenere a imprese diverse. In ogni caso, quando possiamo distinguere una procedura generica e distinta come parte del processo di produzione/distribuzione, la definiamo come un livello della catena di rifornimento.

Queste distinzioni sono solitamente dettate da fattori geografici, ma, come abbiamo detto, possono esistere due livelli in una stessa fabbrica.

Le catene di rifornimento sono solitamente caratterizzate da un flusso di materiali e merci in avanti e da un flusso di informazioni all'indietro. Nella sua forma più elementare, la merce scorre da un livello all'altro fino a raggiungere il consumatore. In realtà, però, le catene di rifornimento non esistono in modo isolato, ma fanno parte di una rete di catene di rifornimento che soddisfano richieste diverse. Inoltre, un flusso lineare di beni lungo la catena è raro. Molti processi di produzione comprendono flussi paralleli che devono unirsi al momento giusto per formare il prodotto finale.

In passato, prima dell'esistenza dei manager di una catena di rifornimento, ogni livello della catena di rifornimento operava in modo indipendente. I manager di ogni stadio prendevano decisioni basate sui requisiti e sugli obiettivi della loro particolare attività, prestando solo un'attenzione superficiale ai vincoli imposti dai livelli vicini.

Di conseguenza, ogni livello cercava di ottimizzare le proprie operazioni in modo isolato. Una sequenza di schemi ottimizzati localmente, però, non costituisce necessariamente un ottimo globale. Ad esempio, la logistica dei processi produttivi di solito favorisce lotti di grandi dimensioni. Tuttavia, i supermercati amano gestire scorte molto ridotte per minimizzare i costi e mantenere la flessibilità di cambiare le

linee di prodotti. Queste esigenze contrastanti possono essere conciliate solo considerando la catena di rifornimento come un'unica entità.

Oggi i responsabili della supply chain hanno l'arduo compito di sviluppare una politica integrata con la dovuta attenzione ai seguenti aspetti:

- riconoscere e quantificare le caratteristiche della domanda, come ad esempio la variazione di prezzo, i tempi di consegna e l'affidabilità del servizio;
- comprendere come la logica del processo di produzione influisce sui livelli di servizio. Ad esempio, quali sono i costi d'impatto della riduzione dei tempi di consegna per aumentare l'affidabilità del servizio;
- gestire i flussi di informazione tra i vari livelli;
- realizzare le previsioni della domanda e agire di conseguenza;
- conoscere dove collocare i livelli ottimali di scorte lungo la catena di rifornimento per garantire il mantenimento dei livelli critici di servizio al cliente ad un costo accettabile in termini di scorte vincolate;
- superare gli inconvenienti, come i guasti alle macchine.

L'obiettivo che governa tutti gli sforzi all'interno di una catena di rifornimento è l'aumento della competitività. Questo perché oggi nessuna singola unità organizzativa è l'unica responsabile della competitività dei propri prodotti e servizi agli occhi del cliente finale; la competitività dipende, invece, dalla catena di rifornimento nel suo complesso.

Di conseguenza, la concorrenza si è spostata dalle singole aziende alle catene di rifornimento. Ovviamente, per convincere una singola azienda a far parte di una catena di rifornimento, è necessaria una situazione vantaggiosa per tutti i partecipanti nel lungo periodo, mentre nel breve periodo potrebbe non essere così per tutte le entità.

Data la complessità di questa catena, le aziende devono essere in grado di avere sempre a disposizione il giusto quantitativo di materie prime, forza lavoro e macchinari in grado di garantire una produzione capace di soddisfare la richiesta di mercato che, come sappiamo, è influenzata da un elevato numero di fattori e varia in modo rapido e spesso imprevisto. Le aziende, tuttavia, non possono permettersi di accumulare un overstock (eccesso) di merce all'interno dei magazzini, dato che questo andrebbe a gravare eccessivamente sui costi aziendali. Da qui la necessità di una pianificazione attenta dell'intera supply chain, capace di gestire l'arrivo e la partenza dei prodotti e i tempi prestabiliti, senza produrre eccessi.

## **1.1 Importanza della gestione di una catena di rifornimento<sup>4,5</sup>**

Le catene di rifornimento sono complicati sistemi dinamici forzati dalle richieste dei clienti. La scelta corretta di attrezzature, macchinari, edifici e mezzi di trasporto è una componente fondamentale per il successo di questi sistemi.

Tuttavia, l'efficienza delle catene di rifornimento dipende soprattutto dalle decisioni del management, che spesso si basano sull'intuizione e sull'esperienza.

A causa della crescente complessità dei sistemi di supply chain, dovuta ai cambiamenti nelle preferenze dei clienti, alla globalizzazione dell'economia e alla concorrenza tra le aziende, queste decisioni sono spesso lontane dall'essere ottimali.

Un altro fattore che causa difficoltà nel processo decisionale è il fatto che le diverse fasi delle catene di rifornimento sono spesso supervisionate da gruppi di persone diversi con filosofie di gestione differenti.

Fin dai primi anni Cinquanta è apparso evidente che un quadro rigoroso per analizzare le dinamiche delle catene di rifornimento e prendere decisioni adeguate avrebbe potuto migliorare sostanzialmente le prestazioni dei sistemi. Data la somiglianza delle catene di rifornimento con i sistemi dinamici dell'ingegneria, la teoria del controllo ha fornito un solido background per la costruzione di tale struttura. Nell'ultimo mezzo secolo molti strumenti matematici emersi dalla letteratura sul controllo sono stati applicati al problema della gestione della supply chain.

Recentemente, le imprese hanno mostrato un crescente interesse per una gestione efficiente della catena di rifornimento. Ciò è dovuto all'aumento dei costi di produzione e di trasporto, alla globalizzazione dell'economia di mercato e alla richiesta da parte dei clienti di prodotti diversificati con cicli di vita breve, tutti i fattori che aumentano la concorrenza tra le aziende. Una gestione efficiente della catena di rifornimento può portare ad una riduzione dei costi di produzione, di magazzino e di trasporto e ad un miglioramento del servizio ai clienti in tutte le fasi della catena.

In particolare, i manager devono tenere conto delle caratteristiche dinamiche del sistema della supply chain, dovute a fluttuazioni della domanda, ritardi nei tempi di consegna, previsioni di vendita, ecc.

Inoltre, uno dei principali problemi delle catene di rifornimento è il cosiddetto effetto bullwhip. Il fenomeno del "bullwhip" è l'amplificazione della variabilità della domanda quando si passa da un livello a valle a un livello a monte della catena di rifornimento.

Lee et al.<sup>6</sup> hanno individuato quattro principali cause dell'effetto bullwhip:

1. la previsione della domanda, che spesso viene effettuata in modo indipendente da ciascun elemento della catena di rifornimento in base ai clienti immediati;
2. lottizzazione degli ordini per ridurre i costi di lavorazione e trasporto;
3. variazioni di prezzo dovute a promozioni speciali come sconti sul prezzo e sulla quantità;
4. carenza di offerta, che porta a richieste artificiali.

Il progettista deve prendere decisioni al fine di ottimizzare il sistema rispetto ai seguenti obiettivi di prestazione:

- recupero del livello di inventario;
- attenuazione delle fluttuazioni del tasso di domanda sul tasso di ordinazione.

I due obiettivi di prestazioni sono in contraddizione. Pertanto, per ogni particolare catena di rifornimento, il progettista del sistema di controllo cerca il miglior compromesso tra livello di inventario e tasso di ordinazione.

Uno sguardo qualitativo ai due scenari estremi (perfetta soddisfazione di ciascuno dei due obiettivi) mostra chiaramente che è necessario un compromesso per arrivare a un sistema di controllo ben progettato.

Se si utilizza un tasso di ordinazione fisso, si osservano grandi deviazioni di inventario, poiché i livelli di inventario seguono le variazioni della domanda. Questa politica, nota come Lean Production, comporta ovviamente grandi costi di inventario. D'altro canto, una politica basata su un livello di scorte fisso, nota come produzione agile<sup>7</sup>, comporta programmi di produzione molto variabili e, di conseguenza, costi di produzione elevatissimi.

Lo scopo primario della gestione di una catena di rifornimento è controllare le prestazioni e migliorare l'efficienza per aumentare il livello di servizio offerto al cliente finale, razionalizzando i costi operativi ed il capitale impegnato. Diventa, quindi, uno dei driver fondamentali su cui le organizzazioni possono puntare per aumentare la loro competitività e la soddisfazione del cliente: oggi la gestione di una catena di rifornimento è parte integrante del successo di un'azienda. La gestione efficiente della catena di rifornimento consente all'azienda di ridurre il time-to-market, cioè il tempo che intercorre fra l'inizio del processo di sviluppo di un nuovo prodotto e l'avvio della sua commercializzazione, di diminuire i prezzi dei prodotti e di assicurare una differenziazione rispetto ai competitor.

Tutto questo anche grazie all'avvento di internet, il quale ha reso strategica la gestione di una catena di rifornimento, rendendo più facili e immediate la coordinazione, l'integrazione e la comunicazione tra i membri che operano lungo la catena di distribuzione.

Questi miglioramenti si traducono, in pratica, in una più precisa previsione della domanda, che permette di comprendere le esigenze dei consumatori; in una pianificazione della domanda puntuale, per realizzare piani di azioni attendibili e precisi e ridurre il numero di resi; in un processo di trattamento degli ordini ottimizzato; in una migliore previsione della capacità produttiva, ottimizzando l'uso degli impianti; in una pianificazione ottimale dell'utilizzo delle materie prime; in una più efficiente integrazione tra domanda e rifornimento ed anche tra produzione, logistica e marketing.

Quotidianamente le decisioni relative alla supply chain vengono influenzate da possibili squilibri che vanno ad interferire nell'equilibrio tra domanda ed offerta. Per non incorrere in rallentamenti, o nella peggiore delle ipotesi a uno stop totale, è necessario tenere costantemente traccia di tutti i movimenti delle merci lungo la

catena di rifornimento, individuando anche eventuali colli di bottiglia o altre problematiche di diversa natura.

Solo avendo una piena consapevolezza della situazione in tempo reale è possibile intervenire laddove è necessario, ad esempio assegnando i prodotti, intervenendo sulla forza lavoro o bilanciando gli ordini dei fornitori, aumentando o riducendo il rifornimento. Naturalmente, l'elaborazione di queste informazioni richiede l'implementazione di specifiche applicazioni in grado di tenere traccia di tutte le fasi che compongono la catena di rifornimento, oltre che coordinare tutti i reparti dell'azienda.

In definitiva la supply chain si configura come un processo estremamente complesso e articolato su più fasi e più aree di lavoro che devono comunicare costantemente tra loro in modo da non incorrere in possibili intoppi e rallentamenti.

Analizzando, in maniera più dettagliata, i benefici relativi alla diminuzione dei costi derivanti da una gestione ottimale della catena di rifornimento, si è visto che la diminuzione dei costi avviene a più livelli.

In primo luogo diminuiscono i costi di produzione, in quanto i produttori dipendono dalle catene di rifornimento per consegnare in modo affidabile i materiali agli impianti di assemblaggio ed evitare carenze di materiale che arresterebbero la produzione. Ad esempio, un ritardo imprevisto nella spedizione di pezzi che causa l'arresto di un impianto di assemblaggio di automobili può costare 20.000€ al minuto e milioni di euro al giorno in salari persi.

Inoltre, diminuisce il costo totale della catena di rifornimento poiché produttori e rivenditori dipendono dai gestori della catena per progettare reti che soddisfino gli obiettivi del servizio clienti al minor costo totale. Catene di rifornimento efficienti consentono a un'azienda di essere più competitiva sul mercato. Ad esempio, il rivoluzionario approccio alla catena di rifornimento di computer di Dell prevedeva la realizzazione di ciascun computer in base a un ordine specifico del cliente, quindi la spedizione del computer direttamente al cliente. Di conseguenza, Dell è stato in grado di evitare di avere grandi scorte di computer nei magazzini e nei negozi al dettaglio, risparmiando milioni di euro.

Si è visto, infine, che una gestione ottimale della catena di rifornimento comporta anche una diminuzione dei costi di acquisto dei prodotti. Infatti, i rivenditori dipendono dalle catene di rifornimento per consegnare rapidamente prodotti costosi per evitare di tenere scorte, nei negozi, più del necessario.

Oltre a ridurre i costi e migliorare la qualità dei prodotti e la soddisfazione dei clienti, una gestione efficiente della catena di rifornimento permette alle aziende di migliorare la loro posizione finanziaria. Permette, infatti, alle aziende di aumentare i ricavi. Un esempio è dato dai consumatori statunitensi; essi consumano 2,7 miliardi di pacchi di cereali all'anno, quindi ridurre i costi della catena di rifornimento di cereali negli Stati Uniti di solo un centesimo per scatola di cereali comporterebbe un risparmio di 13 milioni di dollari in tutto il settore poiché 13 miliardi di scatole di cereali sono fruite attraverso la catena di rifornimento migliorata in un periodo di 5 anni.



Inoltre le aziende riducono l'uso di grandi immobilizzazioni come impianti, magazzini e veicoli di trasporto nella catena di rifornimento. Se, per esempio, i manager della catena di rifornimento riuscissero a riprogettare la rete per servire adeguatamente i clienti statunitensi da 6 magazzini anziché 10, l'azienda eviterebbe di costruire quattro edifici molto costosi.

Infine, le aziende aumentano i flussi di cassa, in quanto riescono ad accelerare i flussi di prodotti verso i clienti. Ad esempio, se un'azienda può realizzare e consegnare un prodotto a un cliente in 10 giorni anziché in 70 giorni, può fatturare al cliente 60 giorni prima.

Meno noto, invece, è come la gestione della catena di rifornimento svolga un ruolo fondamentale nella società. Le conoscenze e le capacità di gestione di una catena di rifornimento possono essere utilizzate per supportare missioni mediche, condurre operazioni di soccorso in caso di calamità e gestire altri tipi di emergenze.

Uno dei principali ruoli è quello di aiutare a sostenere la vita umana, dal momento che gli esseri umani dipendono dalle catene di rifornimento per ottenere beni di prima necessità come cibo e acqua. Qualsiasi guasto nella catena di rifornimento di questi beni può rappresentare un pericolo per la vita umana.

Un altro ruolo molto importante è quello di migliorare l'assistenza sanitaria grazie alle catene di rifornimento di medicinali. Durante un'emergenza medica, infatti, le prestazioni della supply chain possono fare la differenza tra la vita e la morte. Ad esempio, gli elicotteri di soccorso medico possono salvare alcune vite trasportando rapidamente le vittime di incidente negli ospedali per cure mediche di urgenza.

In aggiunta, i medicinali e le attrezzature necessarie per il trattamento saranno disponibili presso l'ospedale grazie all'eccellente esecuzione della catena di rifornimento.

Inoltre, gli esseri umani dipendono dalle catene di rifornimento energetiche. Esse forniscono energia elettrica alle case e alle aziende per la luce, il riscaldamento, la refrigerazione e l'aria condizionata. Il fallimento logistico (un blackout elettrico) può rapidamente tradursi in una minaccia per la vita umana. Ad esempio, durante una massiccia tempesta di ghiaccio abbattutasi sulla costa orientale nel gennaio 1998, 80.000 miglia di linee elettriche sono cadute, provocando la mancanza di elettricità per 3.200.000 residenti di Montreal, Quebec. A causa del freddo estremo, 30 persone sono morte ed il 25% di tutti i residenti del Quebec ha lasciato la casa per cercare un rifugio riscaldato.

In generale, una catena di rifornimento migliora la qualità della vita per numerose ragioni. In primo luogo, favorisce la crescita economica. Le società con un'infrastruttura della catena di rifornimento altamente sviluppata (moderno sistema autostradale interstatale, vasta rete ferroviaria, numerosi porti e aeroporti moderni) sono in grado di scambiare molti beni tra imprese e consumatori in modo rapido e a basso costo. Di conseguenza, l'economia cresce e i consumatori possono permettersi di acquistare più prodotti con il loro reddito, aumentando così il tenore di vita nella società. Ad esempio, si stima che i costi della catena di rifornimento costituiscono il 20% del prezzo di un prodotto negli Stati Uniti, ma il 40% di un prodotto in Cina. Se, poi, si aggiungono i danni da trasporto, questi costi

costituiscono il 60% del prezzo di un prodotto. E' evidente che una gestione efficiente della catena di rifornimento possa portare ad un minor costo dei prodotti e quindi ad una migliore qualità della vita.

La qualità della vita migliora anche grazie ai numerosi posti di lavoro che una catena di rifornimento mette a disposizione dei cittadini. Negli Stati Uniti, infatti, le attività logistiche rappresentano il 9,9% di tutti i dollari spesi in beni e servizi nel 2006 e ciò si traduce in 10 milioni di posti di lavoro.

Un'efficiente gestione della catena di rifornimento è necessaria anche per quanto riguarda lo sviluppo di processi e metodi sostenibili, volti a ridurre l'inquinamento ambientale. Infatti, le attività della catena di rifornimento comprendono l'imballaggio e il trasporto del prodotto e proprio a causa di questi si hanno le maggiori emissioni di anidride carbonica.

Oltre a ridurre l'inquinamento, l'obiettivo dei manager delle catene di rifornimento deve essere quello di ridurre il consumo di energia, sviluppando catene efficienti dal punto di vista energetico.

## ***1.2 Indice degli acronimi utilizzati***

In questa tesi vengono utilizzati i seguenti acronimi:

<b>APIOBPCS</b>	Automatic Pipeline, Inventory and Order Based Production Control System
<b>APVIOBPCS</b>	Automatic Pipeline, Variable Inventory and Order Based Production Control System
<b>AR</b>	Amplitude Ratio
<b>IOBPCS</b>	Inventory and Order Based Production Control System
<b>MLMS</b>	Multi-Level, Multi-Stage Production-Inventory System
<b>MPC</b>	Model Predictive Control
<b>OBPCS</b>	Order Based Production Control System
<b>OPC</b>	Optimal Program Control
<b>OUT</b>	Order-Up-To
<b>PID</b>	Proportional-Integral-Derivative
<b>POUT</b>	Proportional Order-Up-To
<b>SCM</b>	Supply Chain Management
<b>SD</b>	System Dynamics
<b>VAN</b>	Valore Attuale Netto
<b>VIOBPCS</b>	Variable Inventory and Order Based Production Control System
<b>WIP</b>	Work In Progress

## **2. Metodi classici<sup>2</sup>**

L'utilizzo di tecniche di controllo classiche nel problema della gestione della supply chain può essere fatto risalire ai primi anni Cinquanta, quando Simon<sup>8</sup> applicò la teoria del servomeccanismo a tempo continuo per manipolare il tasso di produzione in un sistema semplice che coinvolgeva un solo prodotto. L'idea è stata estesa a modelli a tempo discreto da Vassian<sup>2</sup>, che ha proposto un framework per il controllo delle scorte basato sulla trasformata  $z$ .

Una svolta, tuttavia, si ebbe alla fine degli anni Cinquanta con la cosiddetta metodologia della "dinamica industriale", introdotta dal lavoro rivoluzionario di Forrester<sup>9,10</sup>. La metodologia, successivamente denominata "dinamica dei sistemi", utilizzava una prospettiva di feedback per modellare, analizzare e migliorare i sistemi dinamici, compreso il sistema produzione/inventario. L'ambito di applicazione della metodologia è stato successivamente ampliato per coprire i sistemi complessi di varie discipline, come i sistemi sociali, la pianificazione aziendale e la progettazione di politiche, la gestione e la politica pubblica, le dinamiche micro e macro economiche, i problemi educativi, la modellazione biologica e medica, l'energia e l'ambiente, lo sviluppo di teorie nelle scienze naturali e sociali, la ricerca sul processo decisionale dinamico, la pianificazione strategica e altro ancora.

Il lavoro di Forrester è stato apprezzato per aver fornito strumenti potenti per modellare e simulare fenomeni dinamici complessi, comprese le leggi di controllo non lineari. Tuttavia, la metodologia della "dinamica industriale" è stata criticata perché non contiene un supporto analitico sufficiente<sup>11</sup> e perché non fornisce linee guida agli ingegneri di sistema su come migliorare le prestazioni<sup>12</sup>.

Motivato dalla necessità di sviluppare un nuovo quadro di riferimento che potesse essere utilizzato come base per la ricerca di nuove leggi di controllo e/o nuovi percorsi di retroazione nei sistemi di produzione/inventario, Towill<sup>12</sup> ha presentato il sistema di controllo della produzione basato su inventario e ordini (IOBPCS) in forma di diagramma a blocchi, estendendo il lavoro di Coyle<sup>13</sup>.

Negli anni successivi il sistema è stato oggetto di numerose modifiche e miglioramenti, tra cui l'estensione ai sistemi a tempo discreto, che hanno portato alla famiglia IOBPCS.

### **2.1 Famiglia IOBPCS<sup>2,14</sup>**

Un sistema di controllo della produzione basato su inventario e ordini è il punto di partenza di molti sistemi di ordinazione commerciali, fondati sulla revisione periodica delle scorte e degli obiettivi di produzione.

La famiglia IOBPCS è stata studiata sia in tempo continuo (da John, Naim e Towill nel 1994<sup>14</sup>) sia in tempo discreto (da Disney e Towill nel 2005<sup>14</sup>) utilizzando rispettivamente la trasformata di Laplace e la trasformata  $z$ . La famiglia IOBPCS è

costituita da una serie di sistemi PIC, cioè microcontrollori, con cinque componenti principali: un meccanismo di previsione, un lead-time, un anello di retroazione dell'inventario, un anello di retroazione del WIP e un'impostazione del livello delle scorte.

Il lead-time rappresenta semplicemente il tempo che intercorre tra l'invio di un ordine e il ricevimento della merce in magazzino.

Il meccanismo di previsione è un ciclo di feed-forward all'interno della politica di rifornimento che dovrebbe essere progettato per ricavare due informazioni: una previsione della domanda nel periodo di lead time e una previsione della domanda nel periodo successivo al lead time. Quanto più accurata è questa previsione, tanto minore sarà la necessità di scorte nella catena di rifornimento.

Il feedback loop dell'inventario è un meccanismo di correzione degli errori basato sui livelli di inventario o di scorte netti. Come è prassi comune nella progettazione di sistemi meccanici elettronici e aeronautici, è stato incorporato un controllore proporzionale nell'anello di retroazione dell'inventario per modellare la sua risposta dinamica. È anche possibile utilizzare un controllore proporzionale in un circuito di retroazione a correzione dell'errore di Work In Progress. Questo ha il vantaggio di aumentare ulteriormente i modi a disposizione del progettista di sistemi per modellare la risposta dinamica. In particolare, l'anello di retroazione WIP consente di disaccoppiare la frequenza naturale e il rapporto di smorzamento del sistema, ma questo va a discapito dell'introduzione di un problema di stabilità in sistemi mal progettati.

IOBPCS è l'algoritmo di revisione periodica di base per l'emissione di ordini in una catena di rifornimento, basato sull'attuale deficit di inventario e sulla domanda in arrivo dal cliente. A intervalli di tempo regolari, gli "stati" del sistema disponibili vengono monitorati e utilizzati per calcolare la successiva serie di ordini.

Secondo Coyle (1977) un sistema di questo tipo è spesso osservato in azione in molti settori di mercato. L'autore ha studiato il comportamento previsto attraverso modelli di simulazione di dinamica industriale. Towill (1982) ha poi riformulato il problema in un formato di ingegneria del controllo, ponendo l'accento sulla previsione del recupero dinamico, del decadimento delle scorte e della larghezza di banda del rumore, il quale porta alla stima della varianza. In questo modo è stato possibile ottenere un'ottimizzazione limitata all'interno dei vincoli imposti dall'aver solo due parametri regolabili che controllano un modello del terzo ordine. Una caratteristica importante di questo lavoro del 1982 è stata quella di mettere in relazione il modello con le "migliori pratiche" consolidate dei sistemi hardware, identificando così progetti validi, praticabili ma conservativi, in grado di essere trasferiti nell'arena del controllo della produzione.

Edghill e Towill (1989) hanno esteso il modello, e quindi l'analisi teorica, consentendo che il livello di inventario sia una funzione della domanda osservata, ottenendo un OBPCS a inventario variabile, il quale è rappresentativo di quella particolare pratica industriale in cui è necessario aggiornare la "copertura dell'inventario" nel tempo. Di solito la posizione del livello di inventario mobile viene stimata a partire dalla domanda prevista moltiplicata per una "copertura".

Quest'ultima è una funzione del lead-time della catena, spesso con un fattore di sicurezza aggiuntivo.

Un successivo lavoro di John et al. (1994) ha dimostrato che l'aggiunta, nella catena, di un ulteriore ciclo di feedback basato sugli ordini, forniva la terza variabile di controllo "mancante". Questo modello di Automatic Pipeline IOBPCS è stato successivamente ottimizzato in termini di prestazioni dinamiche attraverso l'uso di algoritmi genetici (Disney et al., 2000).

Tuttavia, un'altra importante conclusione è emersa da John et al. (1994), che ha dimostrato che il decadimento delle scorte si verificherebbe se la stima del lead time della catena utilizzata come parte dell'algoritmo di controllo fosse diversa dall'attuale lead time effettivo. Ciò è stato riconosciuto dal requisito (ove possibile) di aggiornare le stime dei tempi di consegna in linea, consentendo così l'APIOBPCS regolabile. Infine, se includiamo anche l'obiettivo di inventario variabile all'interno del sistema di ordinazione APIOBPCS, allora comprendiamo anche il modello Order-Up-To (OUT) descritto recentemente da Looman et al. (2002). L'equivalenza dei modelli OUT e APVIOBPCS è stata successivamente stabilita da Dejonckheere et al. (2003).

La figura 1 riassume i componenti della famiglia di modelli IOBPCS.

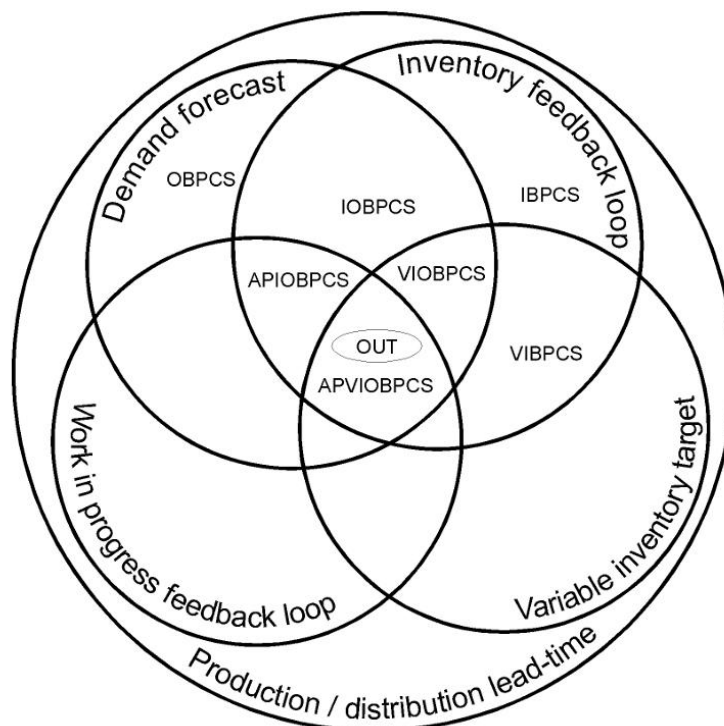


Figura 1. Famiglia IOBPCS

Chiaramente, ciò che è emerso attraverso lo studio della famiglia di politiche di ordinazione IOBPCS è un'architettura in cui i contributi dell'inventario, della catena e della previsione delle vendite sono chiaramente identificabili. Quindi, in termini generali, il tasso d'ordine applicato alla catena di rifornimento può essere scritto come:

$$\text{ORATE} = \text{funzione (deficit di inventario)} + \text{funzione (deficit della catena)} + \text{funzione (previsione delle vendite)}$$

dove il termine di previsione delle vendite include ovviamente la domanda attuale. In genere, ma non obbligatoriamente, il controllore dell'errore di inventario e il controllore dell'errore della catena saranno dispositivi proporzionali e la previsione di vendita sarà una stima esponenzialmente smussata basata sulla domanda effettiva del cliente.

L'architettura della famiglia IOBPCS si è evoluta negli ultimi tre decenni. Originariamente basate su un approccio analogico (tempo continuo), tutte le varianti possono essere espresse in tempo discreto (Disney, 2001). Ciò consente di gestire con precisione i ritardi temporali puri, una considerazione importante quando, ad esempio, si devono determinare analiticamente i limiti di stabilità (Disney e Towill, 2002). Inoltre, questa famiglia non comprende solo i primi modelli di dinamica industriale di Coyle (1977), ma comprende anche molte delle prime applicazioni della teoria del controllo alla produzione e al controllo delle scorte.

Andando nel dettaglio di questi modelli, la nomenclatura utilizzata è la seguente:

AINV	scorte effettive in magazzino (livello di inventario)
AVCON	consumo medio
AWIP	valore effettivo del work in progress (WIP)
COMRATE	tasso di completamento
CONS	consumo o domanda di mercato
DINV	livello di inventario desiderato
DWIP	work in progress (WIP) desiderato
EINV	errore nel livello di inventario
EWIP	errore nel work in progress (WIP)
ORATE	tasso d'ordine

Utilizzando la terminologia del controllo, il livello effettivo delle scorte (AINV) è la variabile controllata, mentre la domanda di mercato (CONS) è un disturbo e l'ORATE è la variabile manipolata.

Ogni membro della famiglia IOBPCS è costruito definendo alcuni o tutti i seguenti componenti<sup>15</sup>:

- il lead time, che rappresenta il tempo che intercorre tra l'invio di un ordine e il ricevimento della merce in magazzino. Nei siti produttivi, il lead time incorpora i ritardi di produzione;
- l'impostazione del livello delle scorte, che può essere fissa o un multiplo dei tassi di vendita medi attuali;
- la politica della domanda, che in sostanza è un meccanismo di previsione che calcola la media della domanda attuale del mercato. Essa è un ciclo di feed-forward all'interno della politica di rifornimento;
- la politica di inventario, che è un ciclo di feedback che controlla la velocità di recupero del deficit di inventario (differenza tra scorte desiderate e AINV);
- la politica della pipeline, che è un ciclo di feedback che determina la velocità di recupero del deficit del WIP (differenza tra il livello di WIP desiderato e il livello di WIP effettivo).

Il lead time è una caratteristica del sistema da controllare. Sebbene il progettista del sistema di controllo non possa manipolare il lead time, è importante modellarlo nel miglior modo possibile.

Il progettista, inoltre, deve decidere come impostare il livello delle scorte (valore fisso o multiplo delle vendite medie) e selezionare le tre politiche (politica della domanda, politica delle scorte e politica della pipeline), al fine di ottimizzare il sistema rispetto ai seguenti obiettivi di performance:

- recupero del livello di inventario;
- attenuazione delle fluttuazioni del tasso di domanda sul tasso di ordinazione.

Il secondo obiettivo mira a ridurre l'effetto "bullwhip". Il termine "bullwhip" è stato introdotto solo di recente, ma il fenomeno per cui una piccola variazione casuale delle vendite sul mercato viene amplificata a ogni livello della catena di rifornimento era già stato individuato dal lavoro di Forrester sulla dinamica industriale<sup>10</sup>.

Per una particolare funzione di trasferimento, i grafici della risposta in frequenza forniscono informazioni precise, poiché quando al sistema viene presentato un ingresso sinusoidale, l'uscita è un'onda sinusoidale della stessa frequenza  $\omega$ .

Il rapporto tra l'ampiezza del segnale d'uscita e l'ampiezza del segnale d'ingresso (rapporto di ampiezza, AR) è uguale alla grandezza  $G(j\omega)$ , mentre lo spostamento di fase è uguale all'angolo di  $G(j\omega)$ . Sulla base delle risposte in frequenza, la metrica della larghezza di banda del rumore può essere facilmente calcolata per quantificare l'amplificazione del rumore (effetto bullwhip). Questo infatti è definito come l'area sotto la risposta in frequenza del sistema al quadrato.

Model		Target stock setting	Demand policy	Inventory policy	Pipeline policy
IBPCS	Inventory based production control system	Constant	$G_a(s) = 0$ $G_a(z) = 0$	$G_a(s) = \frac{1}{T_i}$ $G_a(z) = \frac{1}{T_i}$	$G_w(s) = 0$ $G_w(z) = 0$
IOBPCS	Inventory and order based production control system	Constant	$G_a(s) = \frac{1}{T_a s + 1}$ $G_a(z) = \frac{a}{1 - (1-a)z^{-1}}$	$G_a(s) = \frac{1}{T_i}$ $G_a(z) = \frac{1}{T_i}$	$G_w(s) = 0$ $G_w(z) = 0$
VIOBPCS	Variable inventory and order based production control system	Multiple of average market demand	$G_a(s) = \frac{1}{T_a s + 1}$ $G_a(z) = \frac{a}{1 - (1-a)z^{-1}}$	$G_a(s) = \frac{1}{T_i}$ $G_a(z) = \frac{1}{T_i}$	$G_w(s) = 0$ $G_w(z) = 0$
APIOBPCS	Automatic pipeline, inventory and order based production control system	Constant	$G_a(s) = \frac{1}{T_a s + 1}$ $G_a(z) = \frac{a}{1 - (1-a)z^{-1}}$	$G_a(s) = \frac{1}{T_i}$ $G_a(z) = \frac{1}{T_i}$	$G_w(s) = \frac{1}{T_w}, G_d(s) = T_p$ $G_w(z) = \frac{1}{T_w}, G_d(z) = T_p$
APVIOBPCS	Automatic pipeline, variable inventory and order based production control system	Multiple of average market demand	$G_a(s) = \frac{1}{T_a s + 1}$ $G_a(z) = \frac{a}{1 - (1-a)z^{-1}}$	$G_a(s) = \frac{1}{T_i}$ $G_a(z) = \frac{1}{T_i}$	$G_w(s) = \frac{1}{T_w}, G_d(s) = T_p$ $G_w(z) = \frac{1}{T_w}, G_d(z) = T_p$

Tabella 1. Politica di domanda, inventario e pipeline per diversi modelli della famiglia IOBPCS

È possibile dimostrare matematicamente e sperimentalmente<sup>2</sup> che, utilizzando la componente di feed-forward (politica di domanda), è possibile ottenere un errore di stato stazionario nullo tra il livello di inventario effettivo e quello desiderato quando viene introdotta una variazione graduale nel tasso di consumo, anche se nella



politica di inventario non è inclusa alcuna azione integrale. Tuttavia, se la domanda di mercato viene utilizzata nella componente forward senza alcuna forma di media, si osservano eccessive fluttuazioni nei tassi di completamento della produzione/ordine, non riuscendo così a soddisfare il secondo obiettivo di performance. Questo problema è attenuato utilizzando una misura media dell'attuale domanda di mercato.

La politica di inventario definisce il tasso di recupero dei deficit di inventario manipolando l'ORATE. Essa deve tenere conto della dinamica del sistema e soprattutto del lead time. Una decisione presa in un determinato momento sull'ORATE si tradurrà in una modifica effettiva del livello di inventario solo dopo che sarà trascorso un periodo di tempo pari al lead time. Una politica di inventario che mira a recuperare tutto il deficit di inventario in un unico periodo, risulterà in un eccesso significativo di WIP sull'ingresso dell'officina e, infine, in un comportamento oscillatorio, sia per quanto riguarda il tasso di completamento (COMRATE) che il livello di inventario. Le conseguenze di un tale comportamento dinamico sono: maggiori costi di gestione/produzione (poiché l'ORATE non è regolare), maggiori costi di inventario (quando c'è un'eccedenza di scorte) e un servizio clienti scadente (quando le scorte effettive sono inferiori al livello desiderato). Inoltre, è necessaria una maggiore capacità sia negli impianti di produzione che in quelli di stoccaggio.

La politica della pipeline è un meccanismo di correzione che utilizza informazioni non incluse nell'AINV. In sostanza, il segnale WIP annulla il segnale di inventario e aumenta il contributo di AVCON nel raggiungimento di uno stato stazionario. Il deficit del WIP viene formulato sottraendo il segnale WIP effettivo dal livello WIP desiderato, che viene prodotto in base alla misura media della domanda attuale del mercato. La politica della pipeline mira alla riduzione di questa discrepanza ed è il terzo elemento che, insieme alla politica di domanda ed alla politica di inventario, viene utilizzato nella costruzione di ORATE. Rispetto alla politica di inventario, la politica della pipeline identifica più rapidamente la necessità di aumentare o ridurre l'ORATE, soprattutto quando si osservano cambiamenti improvvisi nella domanda di mercato. In generale, l'inclusione dell'anello di controllo del WIP riduce il tempo di salita e aumenta la percentuale di superamento dell'ORATE, ma aumenta il tempo necessario per raggiungere lo stato stazionario. Nella tabella 2 della pagina seguente (in cui N/A indica che quel particolare controllo non è applicabile) sono presentati alcuni modelli appartenenti alla famiglia IOBPCS, insieme alle rispettive caratteristiche.

IOBPCS system variant	CONTROL "DRIVERS"		
	Customer demand feedforward	Inventory target	Pipeline target
Order Based Production Control System (OBPCS)	Yes	N/A	N/A
Inventory Based Production Control System (IBPCS)	N/A	Fixed	N/A
Inventory and Order Based Production Control System (IOBPCS)	Yes	Fixed	N/A
Variable Inventory and Order Based Production Control System (VIOBPCS)	Yes	Variable	N/A
Pipeline, Inventory, and Order Based Production Control System (PIOBPCS)	Yes	Fixed	Fixed
Pipeline, Variable Inventory, and Order Based Production Control System (PVIOBPCS)	Yes	Variable	Fixed
Automatic Pipeline, Inventory and Order Based Production Control System (APIOBPCS)	Yes	Fixed	Variable
Automatic Pipeline, Variable Inventory and Order Based Production Control System (APVIOBPCS)	Yes	Variable	Variable

Tabella 2. Alcune varianti comuni di IOBPCS

Il modello IOBPCS è stato il primo ad essere studiato estensivamente nel suo formato a tempo continuo da Towill<sup>12</sup>. Dalla tabella 2, possiamo osservare che il ciclo di feedback WIP non è considerato nel modello IOBPCS. Inoltre, il livello di scorte è fisso, in quanto non è influenzato dalle variazioni della domanda dei clienti. La produzione completata (lead-time) è una versione ritardata dell'ORATE ed è modellata da un ritardo del primo ordine (costante di tempo  $T_p$ ), mentre il processo di mediazione della domanda (politica della domanda) è anche essere rappresentato da un ritardo del primo ordine (costante di tempo  $T_a$ ). La produzione ordinata (politica di inventario) è calcolata come somma del consumo medio e di una frazione ( $\frac{1}{T_i}$ ) del deficit di inventario.

Dall'analisi, è emerso che sia il segnale di feed-forward che quello di feedback contribuiscono all'attenuazione delle fluttuazioni del tasso di domanda, aumentando i valori dei parametri di regolazione  $T_a$  e  $T_i$ . Tuttavia, valori più elevati di  $T_i$  sono più efficaci nell'attenuazione dei disturbi. Si è poi riscontrato che entrambi gli obiettivi vengono raggiunti con successo, selezionando il tempo di aggiustamento delle scorte e il tempo di mediazione della domanda di entità paragonabile al tempo di ritardo della produzione.

L'unica differenza del sistema di controllo della produzione basato sull'inventario variabile e sugli ordini (VIOBPCS) rispetto al modello IOBPCS è che, invece di utilizzare un livello di inventario desiderato fisso, il DINV è impostato come multiplo  $k$  dei tassi di vendita medi correnti (AVCON). In questo modo, il livello di scorte viene ridotto in un mercato in calo e viceversa viene aumentato in un mercato in crescita. I due modelli sono stati confrontati con strumenti di analisi della frequenza. È emerso che, per una scelta ragionevole dei parametri di regolazione, il modello IOBPCS mostra AR inferiori e spostamenti di fase maggiori. Queste osservazioni nel dominio della frequenza si traducono in minori requisiti di capacità produttiva e minori rischi di stock-out ma, allo stesso tempo, in risposte più lente del modello IOBPCS rispetto al modello VIOBPCS.

Il modello APIOBPCS<sup>16</sup> utilizza un set point costante del livello di inventario e si serve di tutte e tre le politiche di controllo (domanda, inventario, pipeline) per determinare l'ORATE. Rispetto al modello IOBPCS, l'aggiunta del controllore WIP ci permette di disaccoppiare il rapporto di smorzamento della frequenza naturale. Questo a sua volta porta a risultati migliori, tra cui una più efficace attenuazione del rumore ad alta frequenza presente nei segnali di domanda dei clienti, anche se a scapito di un leggero aumento del COMRATE. Nel modello APIOBPCS, il progettista deve scegliere i valori di tre parametri di regolazione, ovvero  $T_a$ ,  $T_i$  e  $T_w$ . I risultati hanno mostrato che quando l'attenuazione delle fluttuazioni della domanda diventa più importante, si ottengono valori maggiori dei parametri di regolazione  $T_i$  e  $T_w$ , il che significa che le informazioni sull'inventario e soprattutto sul WIP diventano trascurabili. L'opposto accade quando viene data maggiore enfasi all'obiettivo del recupero delle scorte.

Sulla base del modello APIOBPCS, Zhou et al.<sup>17</sup> hanno presentato un sistema ibrido contenente sia la produzione che la rigenerazione. La rigenerazione dei prodotti ha suscitato negli ultimi anni un grande interesse accademico e industriale, grazie ai notevoli risparmi che offre alle aziende e ai significativi benefici ambientali, i quali aiutano a rispettare le severe normative a riguardo. Zhou et al. hanno studiato l'effetto dell'inclusione di un processo di rigenerazione nella dinamica del sistema. Il processo di produzione è stato modellato con un tipico modello APIOBPCS a tempo continuo. In particolare, il lead-time è stato modellato con un ritardo del primo ordine e come meccanismo di previsione è stato utilizzato lo smoothing esponenziale standard. Nel ciclo di rigenerazione è stata utilizzata una politica kanban<sup>18</sup>, cioè un sistema di circolazione delle informazioni sistematizzato in grado di controllare gli ordini di produzione e di approvvigionamento, per rappresentare un sistema pull, ovvero un sistema in grado di ridurre gli scarti del processo produttivo. La politica kanban è stata progettata appositamente per rifornire le scorte nella produzione just-in-time. È stato dimostrato che la politica kanban può essere modellata come un sistema di controllo della produzione basato sull'inventario (vedi Tabella 1).

Si è ipotizzato che i prodotti realizzati dal processo di rigenerazione siano pari al nuovo, in modo da utilizzare un inventario comune di prodotti finiti per immagazzinare la produzione di entrambi i processi.

Il livello di inventario comune è l'innesco per i processi di produzione e di rigenerazione con una probabilità di instradamento predefinita, che per il processo di rigenerazione è pari alla restituzione dei resi. Le prestazioni del sistema sono state analizzate in termini di variazione graduale della domanda del cliente rispetto a tutti i parametri di regolazione che ora contengono quelli del ciclo di rigenerazione.

E' stato riscontrato che le buone impostazioni determinate negli studi precedenti per l'APIOBPCS a loop singolo, forniscono risposte transitorie soddisfacenti. Il risultato più interessante, tuttavia, è stato che, includendo il processo di rigenerazione, è possibile ottenere risposte più rapide alle richieste del mercato e ridurre il rischio di stock-out e over-order. Il sistema ibrido si è dimostrato robusto alle variazioni della resa e dei tempi di consegna dei due processi. Tuttavia, le prestazioni del sistema sono state analizzate solo rispetto al primo obiettivo indicato all'inizio di questa sezione. Non è stato testato in caso di cambiamenti di input diversi da quelli a gradino, come ad esempio gli input casuali, che sono più vicini alle applicazioni del mondo reale.

Dejonckheere et al.<sup>2</sup> hanno studiato l'AR della funzione di trasferimento ORATE/CONS in sistemi a tempo discreto a singolo stadio<sup>19</sup>. Hanno dimostrato che, utilizzando politiche di ordine-rifornimento, l'AR è elevata in tutte le frequenze, indipendentemente dal meccanismo di previsione della domanda, e questo porta alla generazione dell'effetto bullwhip. In particolare, in qualsiasi politica order-up-to, la decisione di ordinare è la seguente:

$$\begin{aligned} ORATE(t) &= S(t) - (AINV(t) + AWIP(t)) && \text{se } AINV(t) + AWIP(t) < S(t) \\ ORATE(t) &= 0 && \text{se } AINV(t) + AWIP(t) \geq S(t) \end{aligned}$$

dove  $S(t)$  è il livello di order-up-to variabile nel tempo e la somma tra parentesi (AINV e WIP effettivo) è la cosiddetta posizione di inventario. Le varie politiche di order-up-to si differenziano per il modo in cui il livello di order-up-to viene aggiornato nel tempo.

È stato dimostrato che la politica order-up-to è un caso speciale del modello APVIOBPCS (Automatic Pipeline Variable Inventory and Order Based Production Control System), in cui i parametri di regolazione sono selezionati pari a 1.

Diversi ricercatori hanno proposto altre modifiche dei diversi componenti che costituiscono la famiglia di modelli IOBPCS. White<sup>20</sup> ha dimostrato che una politica di controllo delle scorte più sofisticata, come l'utilizzo di un controllore di inventario proporzionale-integrale-derivativo (PID), può ridurre i livelli di scorte dell'80% e quindi ridurre i costi. E' importante notare che se si adotta l'approccio PID, l'unità di previsione feedforward non è più necessaria per eliminare la discrepanza tra DINV e AINV. Questo viene ora realizzato dall'azione integrale offerta dal primo elemento del regolatore. Tuttavia, l'approccio PID non ha ricevuto molta attenzione in letteratura, probabilmente perché non corrisponde a ciò che viene effettivamente eseguito nei sistemi reali di produzione-inventario, dove la previsione è presentata in modo esplicito. Inoltre, l'aggiunta degli elementi integrali e derivati complica lo sforzo di regolazione, poiché nel modello sono inclusi altri due parametri di regolazione.

Sia l'APIOBPCS che l'APVIOBPCS danno risultati positivi, partendo dal presupposto che il lead time sia stimato con precisione. In caso contrario, non è possibile ottenere un offset di inventario pari a zero. Tuttavia, questa ipotesi non è realistica in molte situazioni. Esistono diverse fonti di incertezza nella stima del lead time, soprattutto quando il modello descrive le dinamiche di un sito produttivo<sup>21</sup>. Alcuni esempi sono: mancanza di materie prime, incoerenze nel processo decisionale umano, variazioni nel lead time del negozio a causa dell'elevato numero di prodotti che passano attraverso il negozio, ecc. Per eliminare queste ipotesi del modello APIOBPCS, è stato proposto un ciclo di feedback aggiuntivo nel formato a tempo continuo del modello<sup>21,22</sup>. L'anello aggiuntivo di lead time è non lineare e variabile nel tempo e viene utilizzato per fornire stime aggiornate del lead time corrente che, a sua volta, aggiorna il livello desiderato del WIP, DWIP. È stato dimostrato che l'adattamento del sistema alle variazioni del lead time consente di ottenere un vantaggio significativo. Inoltre, è stato dimostrato che, includendo un elemento integrale nella politica di inventario, è possibile evitare derive a lungo termine delle scorte e migliorare le prestazioni del sistema durante un aumento del lead time.

Grubbstrom e Wikner<sup>23</sup> hanno studiato i sistemi tradizionali di rifornimento delle scorte in termini di teoria del controllo. In questi sistemi, l'inventario viene rifornito in lotti dopo un certo periodo di tempo, quando il livello delle scorte raggiunge o scende al di sotto di un livello di attivazione, che corrisponde al punto di riordino. È stato dimostrato che le politiche di controllo dell'inventario possono essere descritte matematicamente da equazioni differenziali o di differenza che coinvolgono funzioni di impulso di Heaviside e Dirac, in grado di riprodurre il tipico andamento a dente di sega dell'inventario.

Un approccio piuttosto diverso dalla famiglia di modelli IOBPCS è stato sviluppato dal gruppo di Grubbstrom per decidere il programma di produzione in un singolo centro di lavoro. A differenza delle tecniche precedentemente menzionate, questo approccio tiene esplicitamente conto dei costi e/o dei ricavi. In particolare, è stato posto il seguente problema: determinare la sequenza ottimale di quantità di produzione su un orizzonte finito, rispetto al numero di lotti, alle dimensioni dei lotti e ai loro tempi, assumendo che:

- a. la produzione avviene in lotti di dimensioni eventualmente diverse;
- b. la domanda esterna è un processo stocastico in cui gli eventi stocastici sono separati da intervalli di tempo stocastici con una data funzione di probabilità;
- c. i tempi di produzione sono deterministici.

Il problema è stato risolto per sistemi a un livello (cioè l'assemblaggio dei prodotti nel centro di lavoro non richiede altri prodotti dallo stesso centro), sotto l'ipotesi che la domanda segue il processo di Poisson, che è il processo stocastico più semplice possibile. La funzione obiettivo da massimizzare è il flusso di rendita, che è una variazione del valore attuale netto (VAN). Più precisamente, si tratta del flusso costante di pagamenti corrispondente a un determinato VAN determinato dal flusso di cassa all'interno di un orizzonte temporale finito. Il flusso di cassa è a sua volta

composto dai pagamenti in entrata per le unità vendute e dai pagamenti in uscita per i costi di avviamento e i costi di produzione variabili.

Questo approccio, però, si è rivelato utile soprattutto per descrivere sistemi più complessi, ovvero sistemi di produzione-inventario multilivello e multistadio (MLMS). Quest'ultimi sono sistemi in cui viene introdotto un ulteriore grado di complessità dovuto al fatto che spesso vi è un elevato grado di comunanza di componenti e materiali tra i prodotti nelle diverse fasi. Pertanto, ogni ordine esterno genera ordini interni che devono essere contabilizzati.

## **2.2 Politica Order-Up-To<sup>24,25</sup>**

In questa tesi, ci si concentra principalmente sulla politica Order-Up-To che, come detto in precedenza, è un caso particolare del modello APVIOBPCS, in cui i parametri di regolazione sono selezionati pari a 1.

Per descrivere la politica OUT, bisogna partire dell'effetto bullwhip, che è uno dei problemi più importanti nella gestione della supply chain<sup>26</sup> e può essere ragionevolmente considerato una delle principali cause delle carenze della supply chain<sup>27</sup>.

Diversi autori hanno dimostrato come la collaborazione tra supply chain consenta di aumentare le prestazioni della stessa<sup>28-36</sup> e di migliorare il livello di servizio al cliente<sup>37,30</sup>, in quanto riduce le scorte in eccesso ed è essenziale per evitare il costoso effetto bullwhip<sup>39-42</sup>, che è ancora prevalente in molti settori<sup>43</sup>. Tuttavia, studi recenti hanno dimostrato che la collaborazione e la condivisione delle informazioni nella supply chain non sono sempre completamente in grado di evitare il fenomeno dell'amplificazione della domanda e gli eventi di instabilità delle scorte<sup>30,31,44-46</sup>. L'effetto bullwhip è attenuato da esponenziale a lineare solo quando le informazioni vengono condivise<sup>30,31</sup>, ma una parte di questo fenomeno deleterio rimane sempre, anche dopo la condivisione delle informazioni<sup>45,46</sup>. Ciò è dovuto al fatto che acquirenti e venditori, nonostante la trasparenza delle informazioni, spesso regolano il loro controllo e il flusso di materiali utilizzando regole decisionali classiche, che creano informazioni distorte nella supply chain<sup>35</sup>.

Dejonckheere et al.<sup>44</sup> hanno dimostrato come, in una supply chain collaborativa, l'effetto bullwhip possa essere ridotto, ma non eliminato, quando gli ordini sono realizzati con le politiche d'ordine attualmente più utilizzate nelle applicazioni pratiche: i vari modelli della politica di revisione periodica Order-Up-To<sup>47</sup>. Data la pratica comune nella vendita al dettaglio di rifornire le scorte frequentemente (giornalmente, settimanalmente, mensilmente) e la tendenza dei produttori a produrre in base alla domanda, queste strategie di rifornimento persistono<sup>48</sup>. Come affermano Chen e Disney<sup>49</sup>, almeno il 60% del valore delle vendite di due dei quattro maggiori rivenditori di generi alimentari del Regno Unito è controllato da questa politica.

Inoltre, la politica Order-Up-To è molto semplice da comprendere. La posizione dell'inventario del sistema (scorte in magazzino + ordini in sospeso + ordini arretrati) viene esaminata ogni periodo e viene emesso un "ordine" per portare la posizione dell'inventario al livello desiderato<sup>49</sup>. Più precisamente, in un OUT classico la quantità di ordini viene aggiornata per soddisfare la domanda e recuperare il divario tra il livello di scorte desiderato e il livello attuale di scorte disponibili<sup>50</sup>.

I sistemi OUT provocheranno sempre l'effetto bullwhip, come affermato da Dejonckheere et al.<sup>51</sup>. Il motivo è principalmente perché il livello di scorte desiderate, le scorte di sicurezza e le previsioni della domanda vengono aggiornate solo a fronte di nuove informazioni o deviazioni dagli obiettivi.

Una variante del modello OUT è la politica di rifornimento Proporzionale Order-Up-To (POUT). Questa politica si riferisce a una generalizzazione del modello Order-Up-To, in cui gli ordini vengono emessi per recuperare parzialmente, anziché totalmente, il divario tra il livello di inventario desiderato e l'inventario attualmente disponibile.

I principali vantaggi della politica POUT derivano dalla sua capacità di far fronte all'effetto bullwhip. In particolare, questa politica consente di attenuare le reazioni eccessive dei membri della supply chain alle variazioni della domanda, riducendo la propagazione a monte del dannoso fenomeno del bullwhip. Tuttavia, la politica POUT ha spesso un impatto negativo sulla variabilità dell'inventario, che può portare a un'elevata frequenza di stock-out e/o grandi esigenze di stoccaggio. Pertanto, è necessario un compromesso tra ordini e variabilità delle scorte.

### 3. Implementazione e risultati

In questa tesi, come detto in precedenza, ci si è concentrati sulla tecnica di controllo Order-Up-To. Sono state eseguite quattro simulazioni, sullo stesso processo, in cui sono state implementate quattro differenti leggi di controllo per poi confrontarle.

Il processo considerato è un sistema di produzione/inventario a revisione periodica con beni deperibili.

In particolare, la deperibilità della merce è definita da un fattore di deperibilità  $p$ , che si suppone appartenga all'intervallo  $[0.85; 0.95]$ . Quanto più il fattore di deperibilità è alto, tanto più la merce si conserva.

Per le simulazioni, è stato considerato un periodo di tempo pari a 200 istanti.

Il processo considerato è caratterizzato da un ritardo temporale  $n$ , pari a 3 istanti di tempo, ed è descritto dalle seguenti variabili:

$y_{des}(k)$ , livello di inventario desiderato all'istante  $k$ ;

$h(k)$ , quantità di domanda soddisfatta all'istante  $k$ ;

$y(k)$ , livello di inventario all'istante  $k$ ;

$u(k)$ , quantità di prodotti ordinata all'istante  $k$ .

Tutte le quattro tecniche di controllo, come detto, vengono applicate allo stesso processo, in cui la dinamica del livello delle scorte è descritta dalla seguente equazione:

$$y(k + 1) = p \cdot (y(k) + u(k - n) - h(k))$$

dove  $u(k - n)$  è l'ordine di rifornimento effettuato al tempo  $k - n$  e arrivato in magazzino al tempo  $k$ .

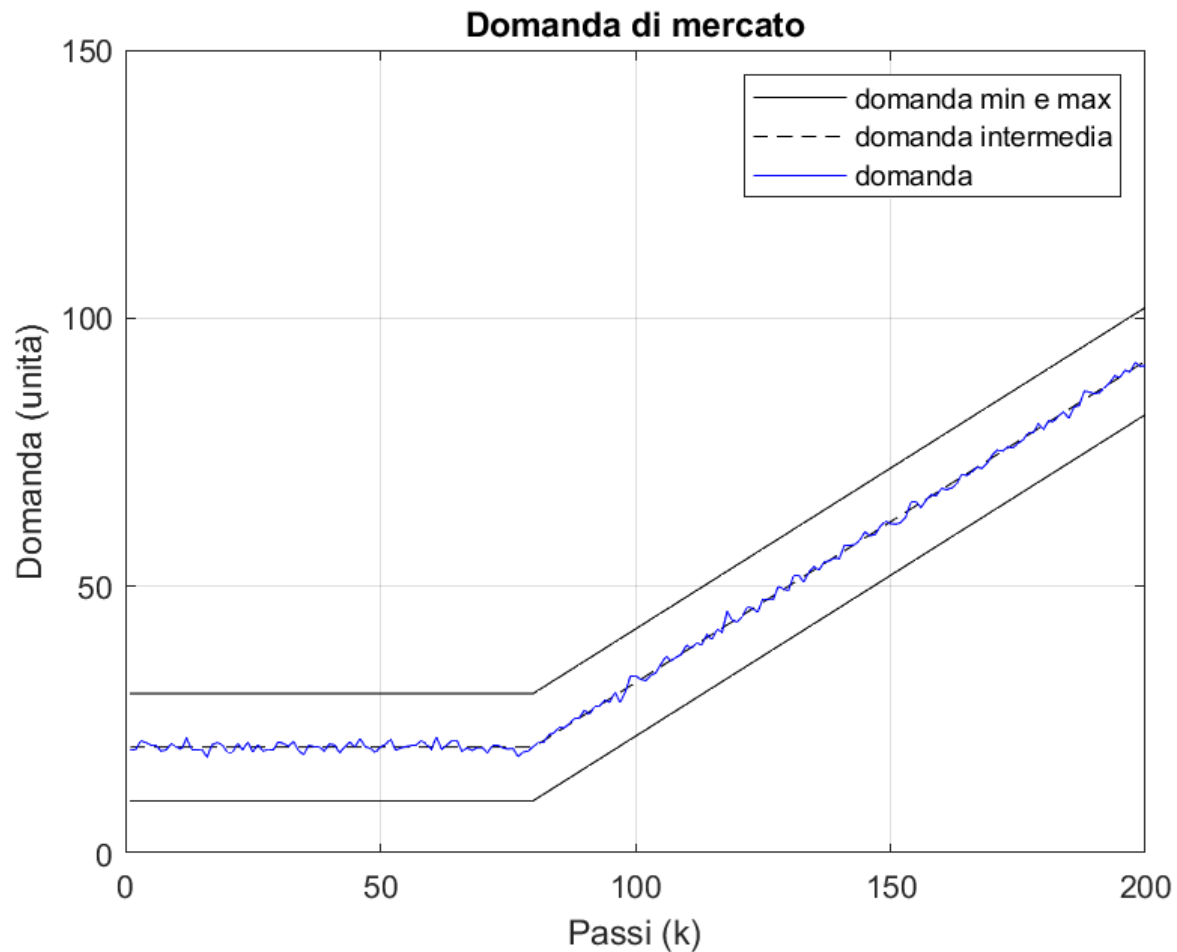
La quantità di domanda soddisfatta, fondamentale per offrire un buon servizio clienti, è definita in questo modo:

$$h(k) = \min[y(k) + u(k - n), d(k)] .$$



Per quanto riguarda la domanda di mercato, è stato assunto che in ogni istante temporale  $k$ , e limitatamente a un orizzonte di previsione di 200 istanti  $[1;200]$ , la domanda futura sconosciuta dei clienti,  $d(k)$ , fluttui all'interno di un insieme compatto e limitato in basso e in alto da due traiettorie limite note,  $d_+(k)$  e  $d_-(k)$ .

Dall'esperienza è stata scelta una funzione di domanda di questo tipo:



Ora verranno analizzate le varie tecniche di controllo implementate.

### 3.1 Prima tecnica di controllo<sup>4</sup>

In questo modello viene implementato un sistema con ritardo temporale, senza però tener conto del decadimento della merce, ovvero si assume che il fattore di deperibilità  $p$  sia pari a 1.

Il livello di scorte desiderato è dato dalla seguente formula:

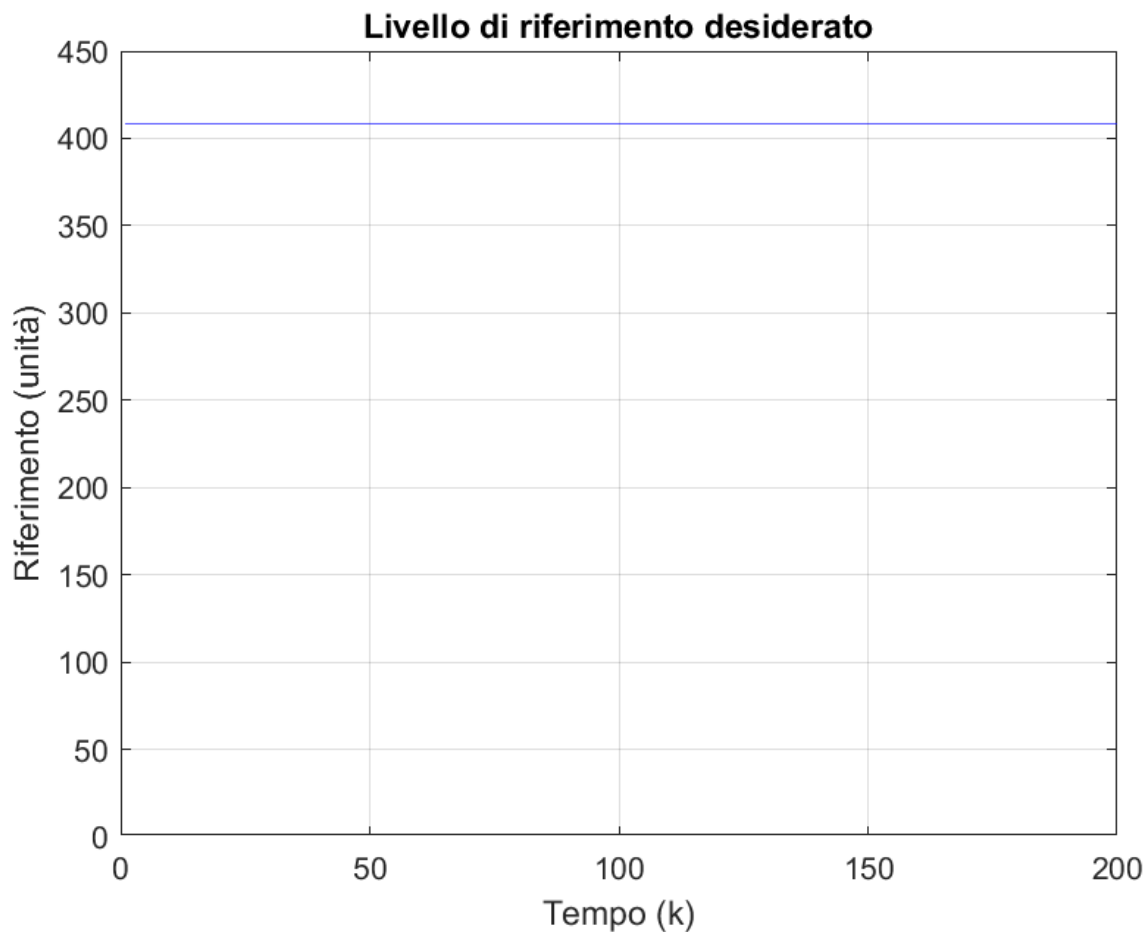
$$y_{des}(k) = d_{max} \cdot \sum_{i=1}^4 p^i$$

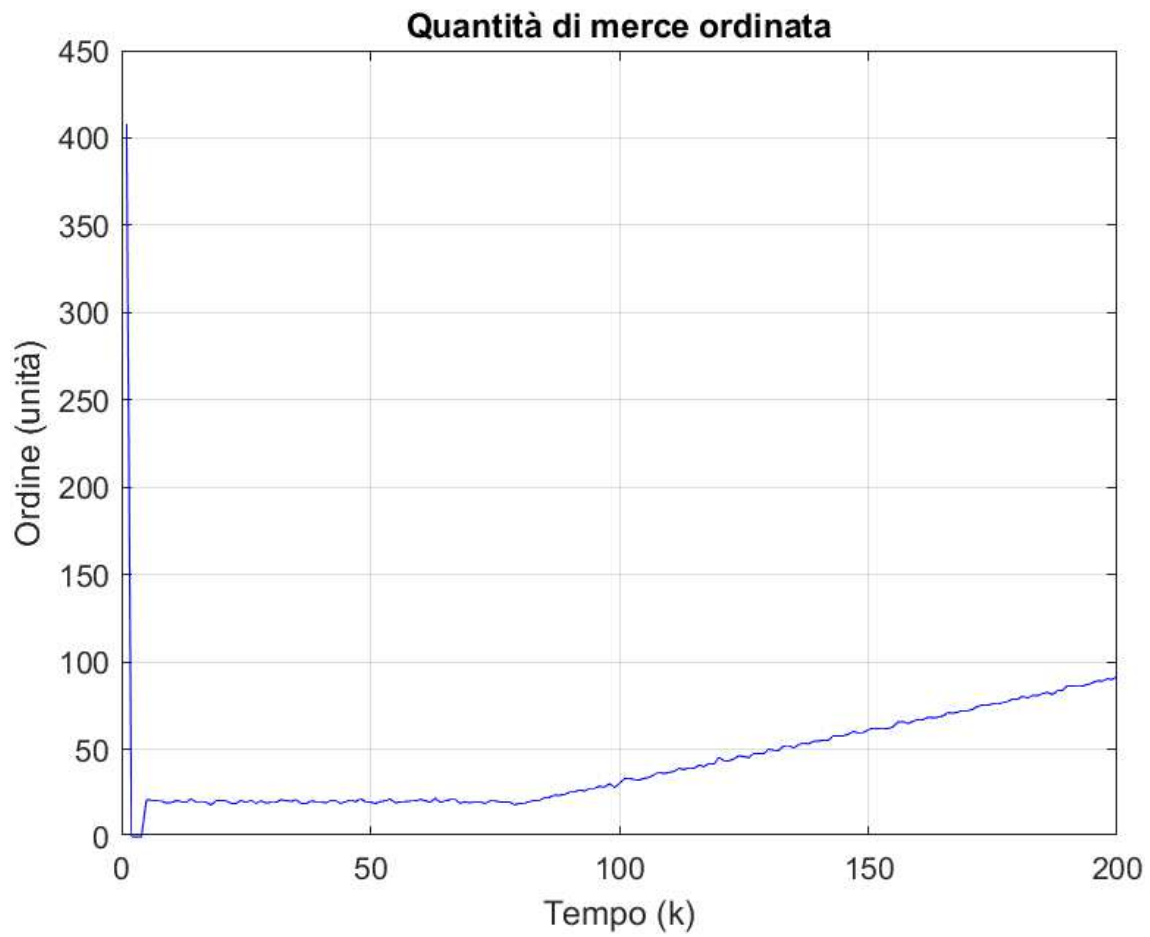
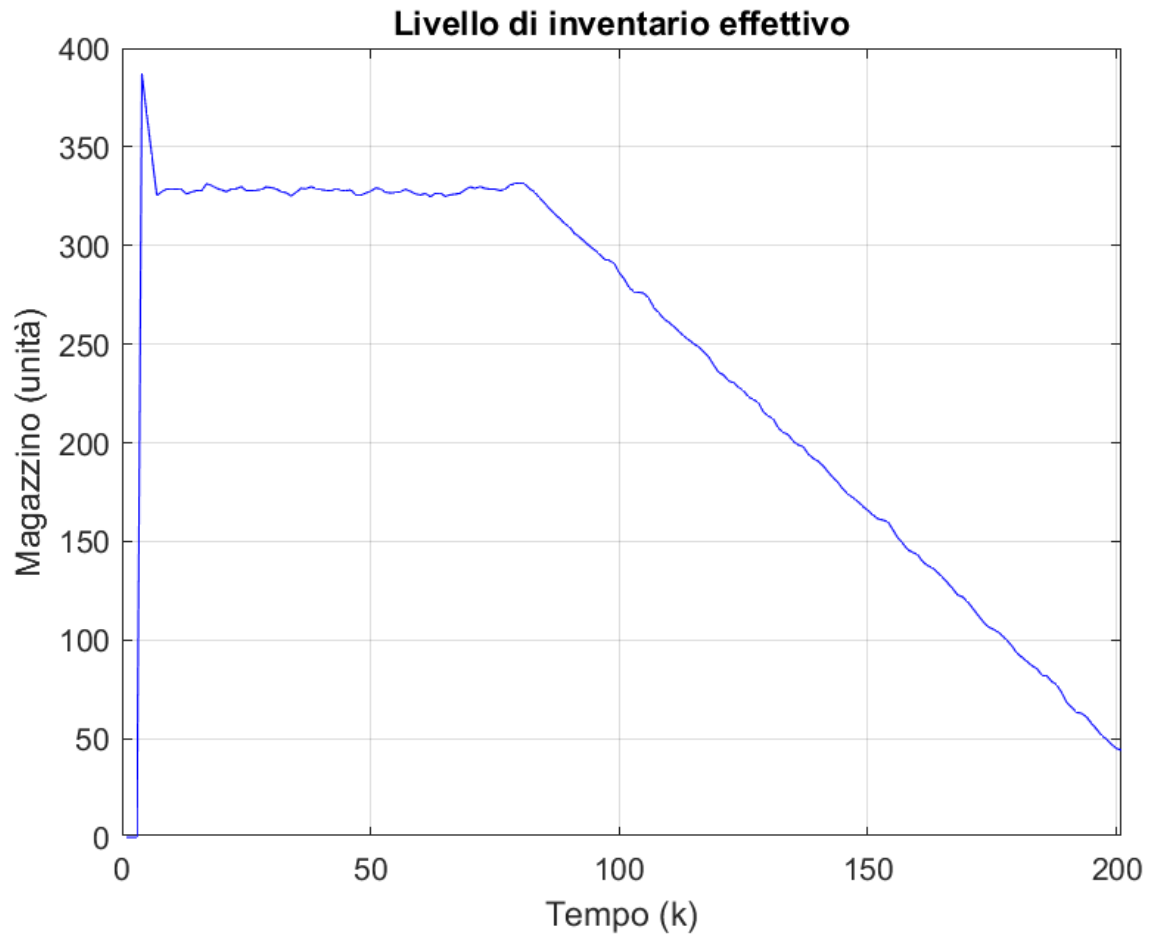
dove  $d_{max}$  è il massimo valore che la traiettoria maggiore  $d_+(k)$  (che definisce la domanda) assume nell'intero periodo  $[1; 200]$  e  $\sum_{i=1}^4 p^i$  è il fattore di sicurezza, in cui 4 è il valore necessario per riuscire a soddisfare l'intera domanda di mercato.

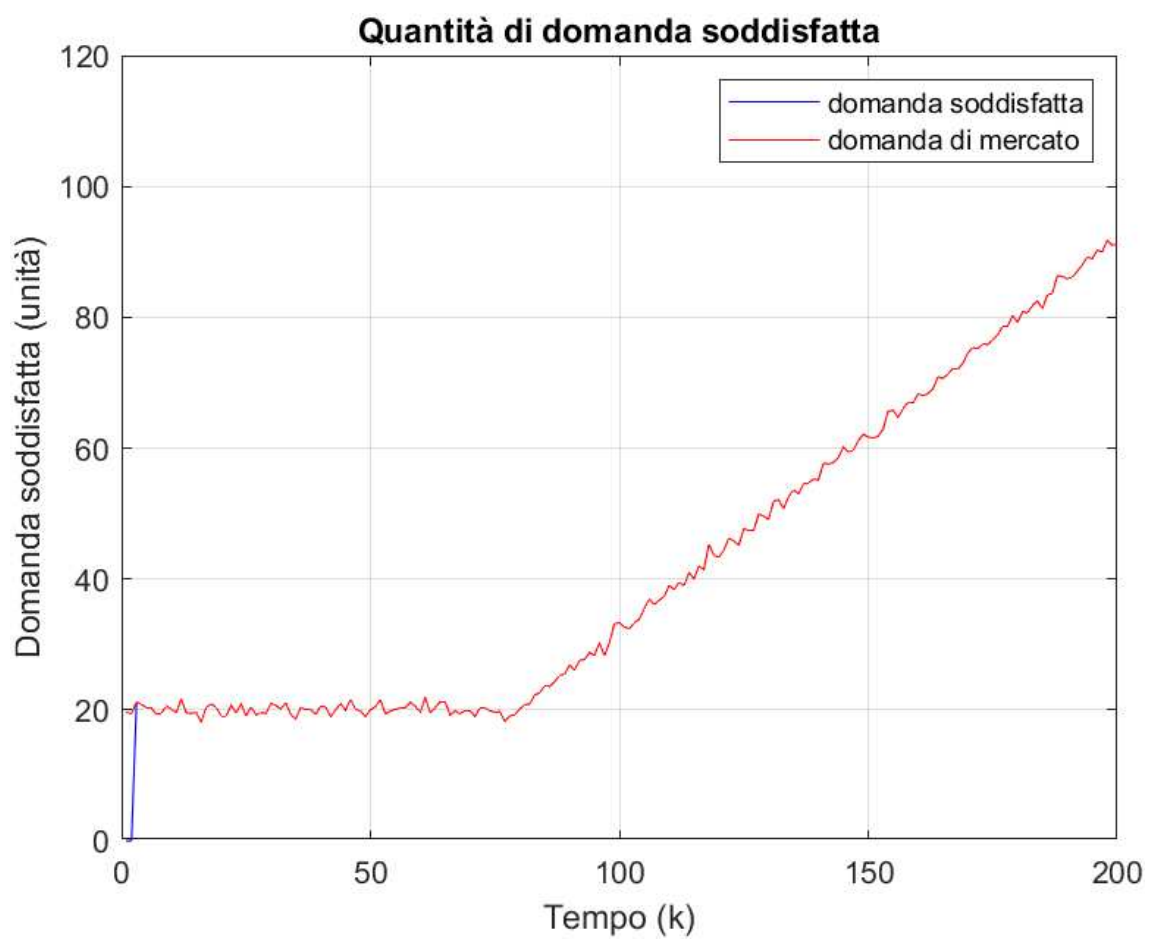
La politica OUT, ovvero la legge di controllo  $u(k)$ , è la seguente:

$$u(k) = y_{des} - y(k) - \sum_{j=k-n}^{k-1} u(j)$$

La simulazione di questo primo modello dà questi risultati:







### 3.2 Seconda tecnica di controllo<sup>4</sup>

In questo secondo modello si è cercato di migliorare le prestazioni del sistema a ritardo temporale applicando un adeguato compensatore del lead time DT.

In particolare viene utilizzata la tecnica del predittore di Smith, SP, nel contesto di un sistema ad inventario deperibile. In questo modello, quindi, viene preso in considerazione il fattore di deperibilità  $p$ .

Vengono definiti due valori:  $p_u = 0.90$  che è il fattore di deperibilità per la legge di controllo e  $p_{sim} = 0.92$  che è il valore del fattore di deperibilità con il quale viene effettuata la simulazione.

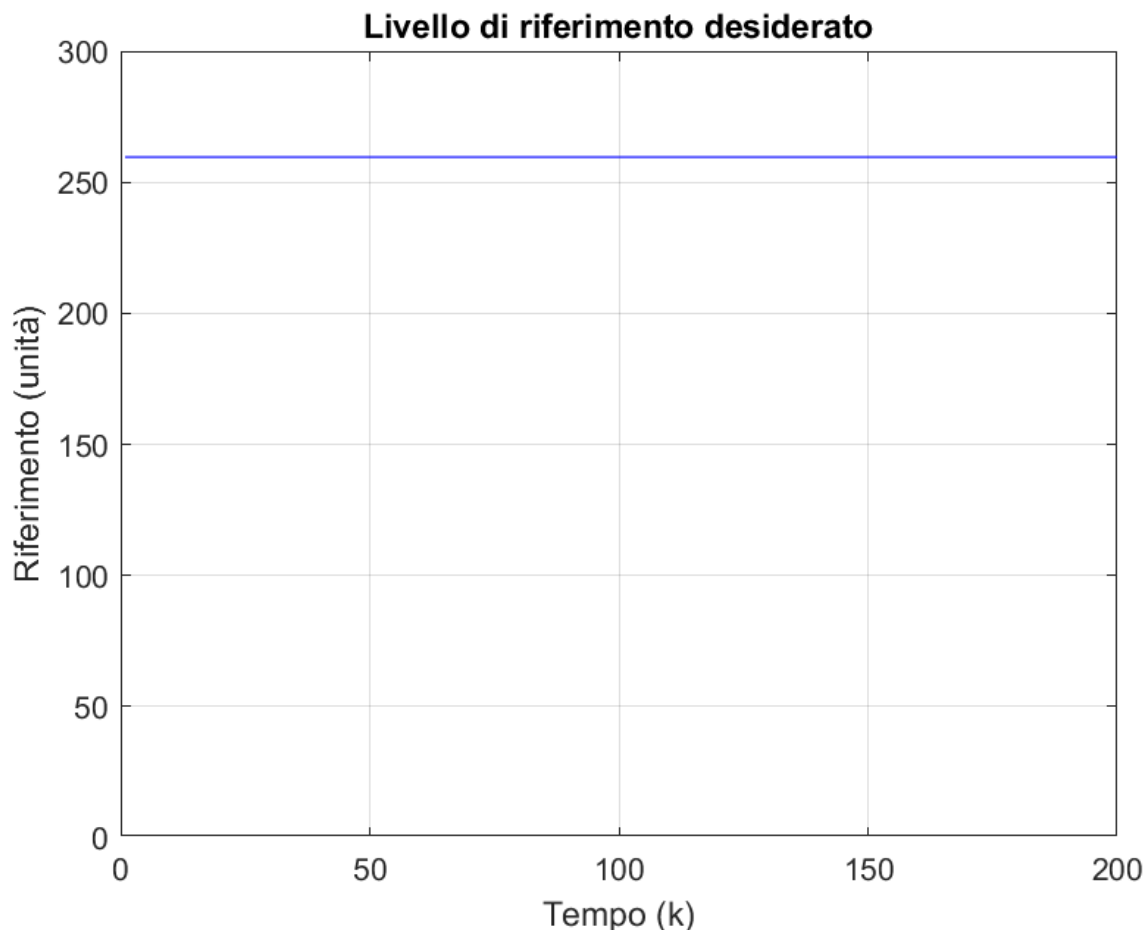
L'equazione che definisce il livello di scorte desiderato è simile a quella del modello precedente ma con un fattore di sicurezza più piccolo, ovvero:

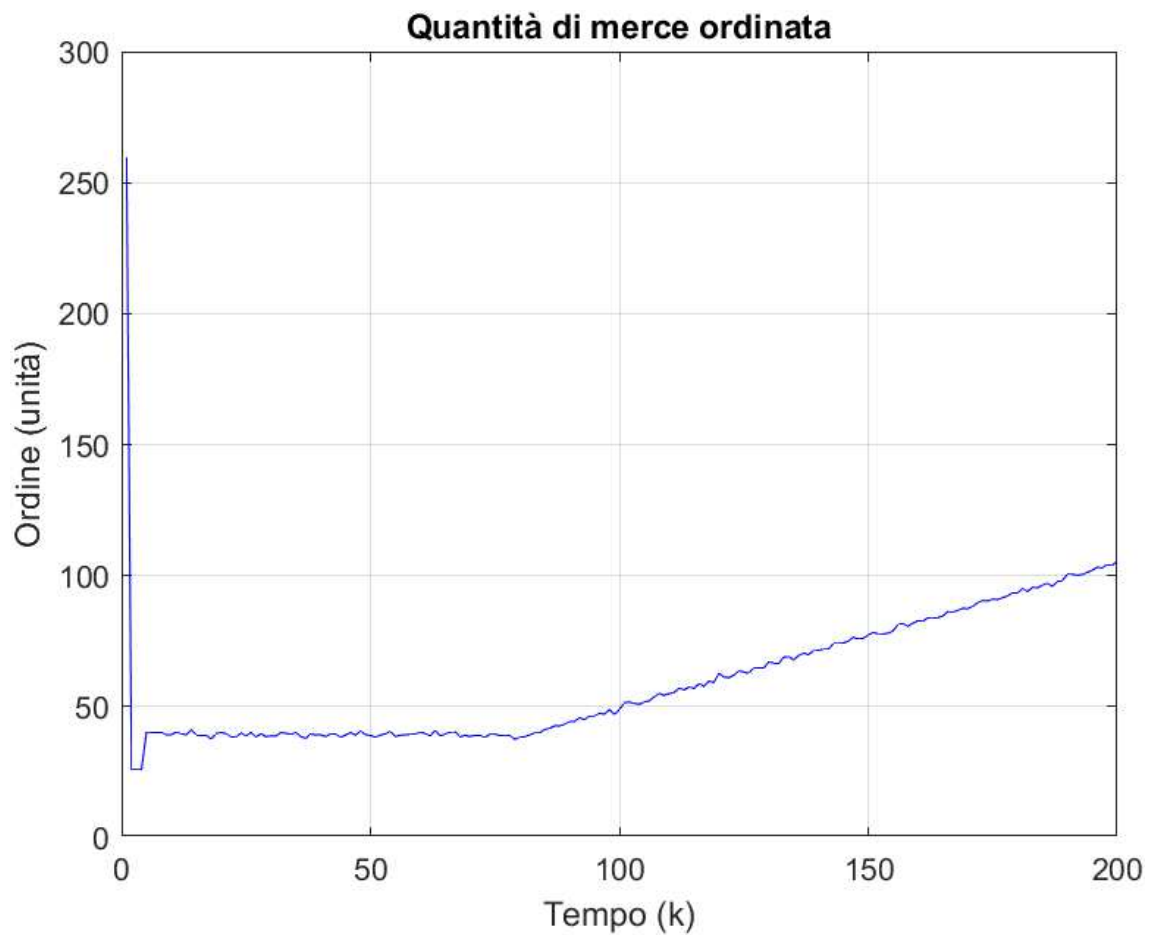
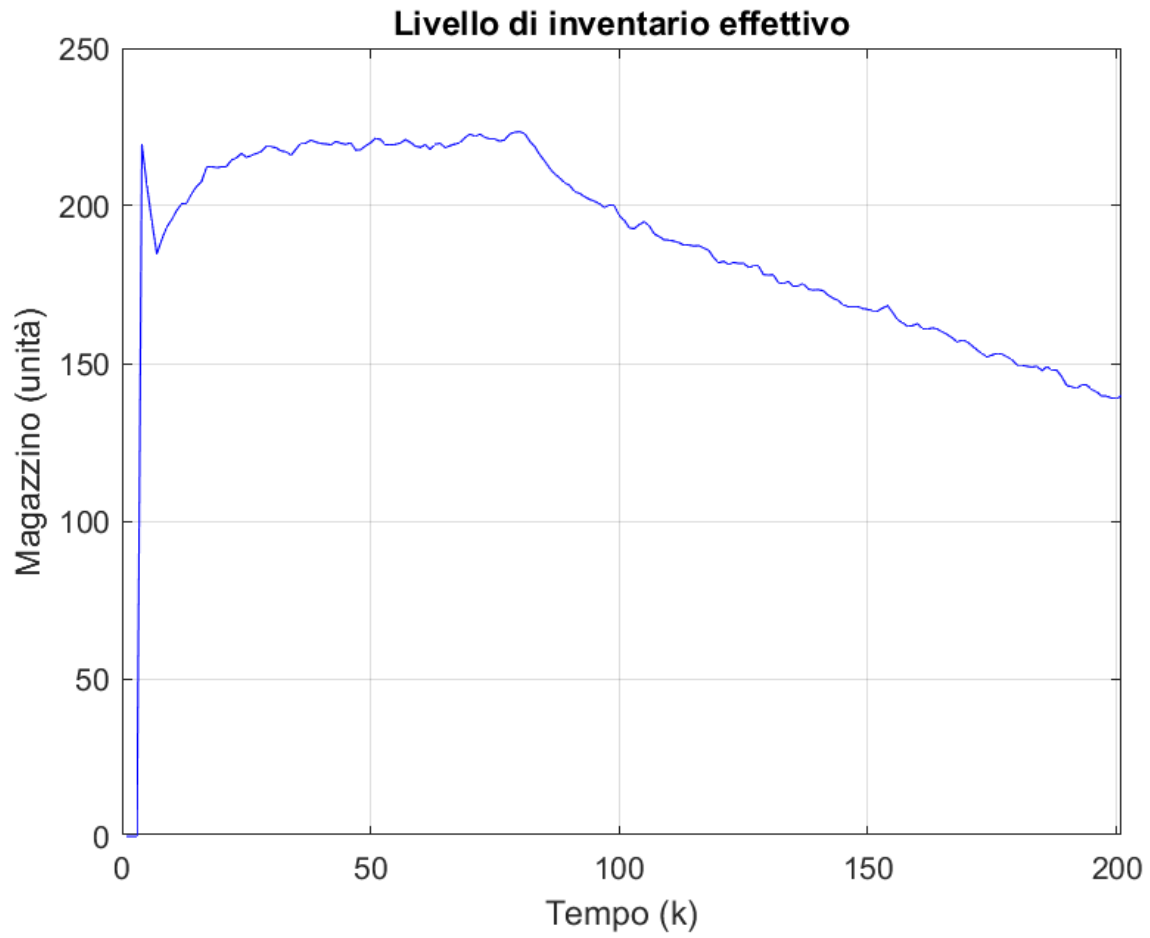
$$y_{des}(k) = d_{max} \cdot \sum_{i=1}^n p_{sim}^i$$

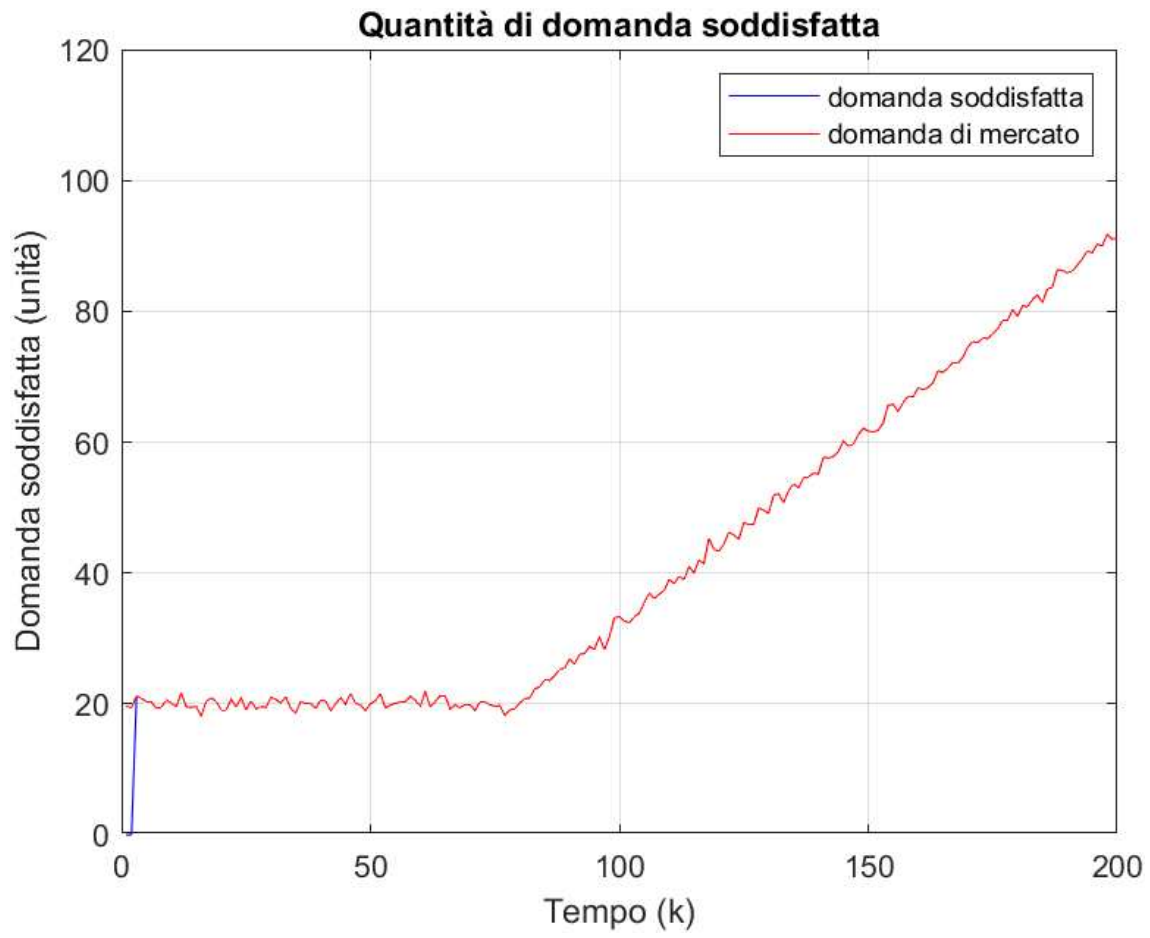
La legge di controllo, invece, è definita come segue:

$$u(k) = y_{des} - y(k) - \sum_{j=0}^{k-1} p_u^{k-j} \cdot u(j) + \sum_{j=0}^{k-n-1} p_u^{k-n-j} \cdot u(j)$$

I risultati di questa seconda simulazione sono i seguenti:







### 3.3 Terza tecnica di controllo

Anche questo terzo modello tiene conto della deperibilità della merce, ma ciò che cambia è il modo in cui viene definito il livello di scorte desiderato. Si considera, infatti, la traiettoria massima  $d_+(k)$ , al di sotto della quale si trova la domanda  $d(k)$ , solamente nell'intervallo  $[k; k + L]$  dove  $L = 20$ . In questo modo il livello di scorte desiderato risulta più preciso e non troppo elevato rispetto alla domanda effettiva:

$$y_{des}(k) = d_{max} \cdot \sum_{i=1}^n p_{sim}^i$$

dove  $d_{max}$  è il valore massimo della domanda  $d(k)$  nell'intervallo  $[k; k + L]$ .

Come in precedenza, vengono definiti due valori del fattore di deperibilità  $p$ :  $p_{sim} = 0.90$  e  $p_u = 0.85$ .

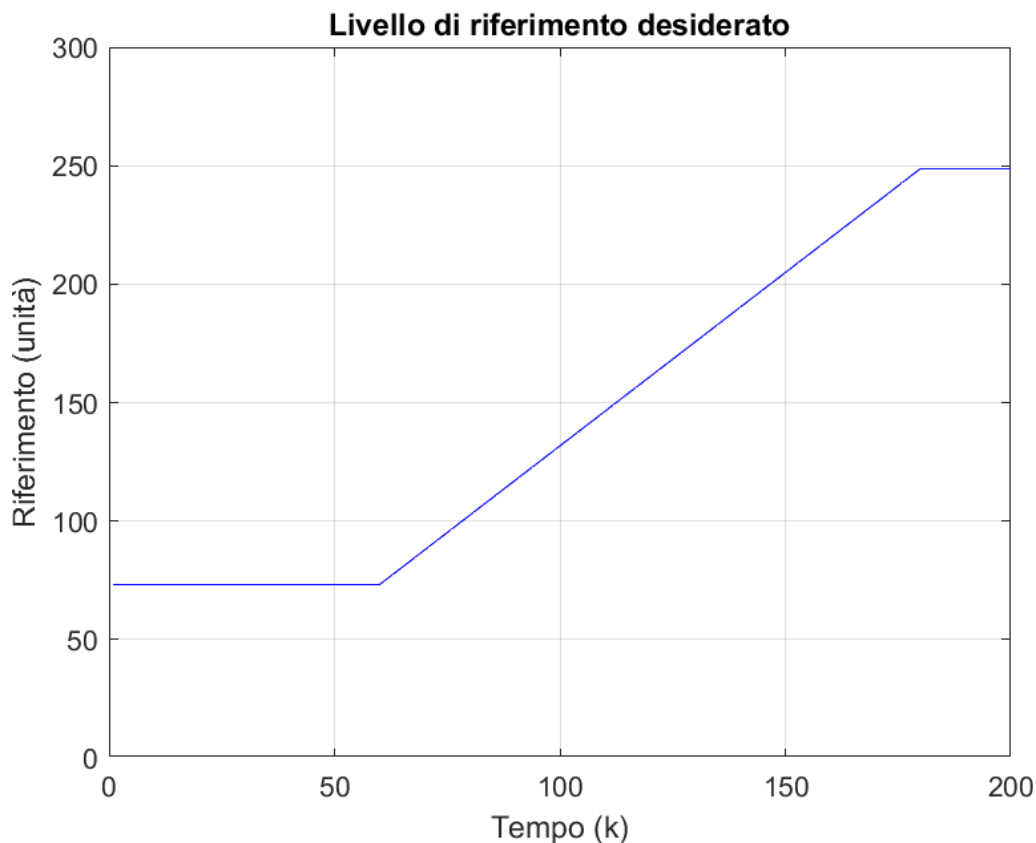
$p_u$  viene scelto pari al minimo valore dell'intervallo di appartenenza in modo tale da ottenere una soluzione robusta, cioè un modello che possa funzionare con tutti i possibili valori di  $p$ .

La nuova legge di controllo, invece, è definita nel seguente modo:

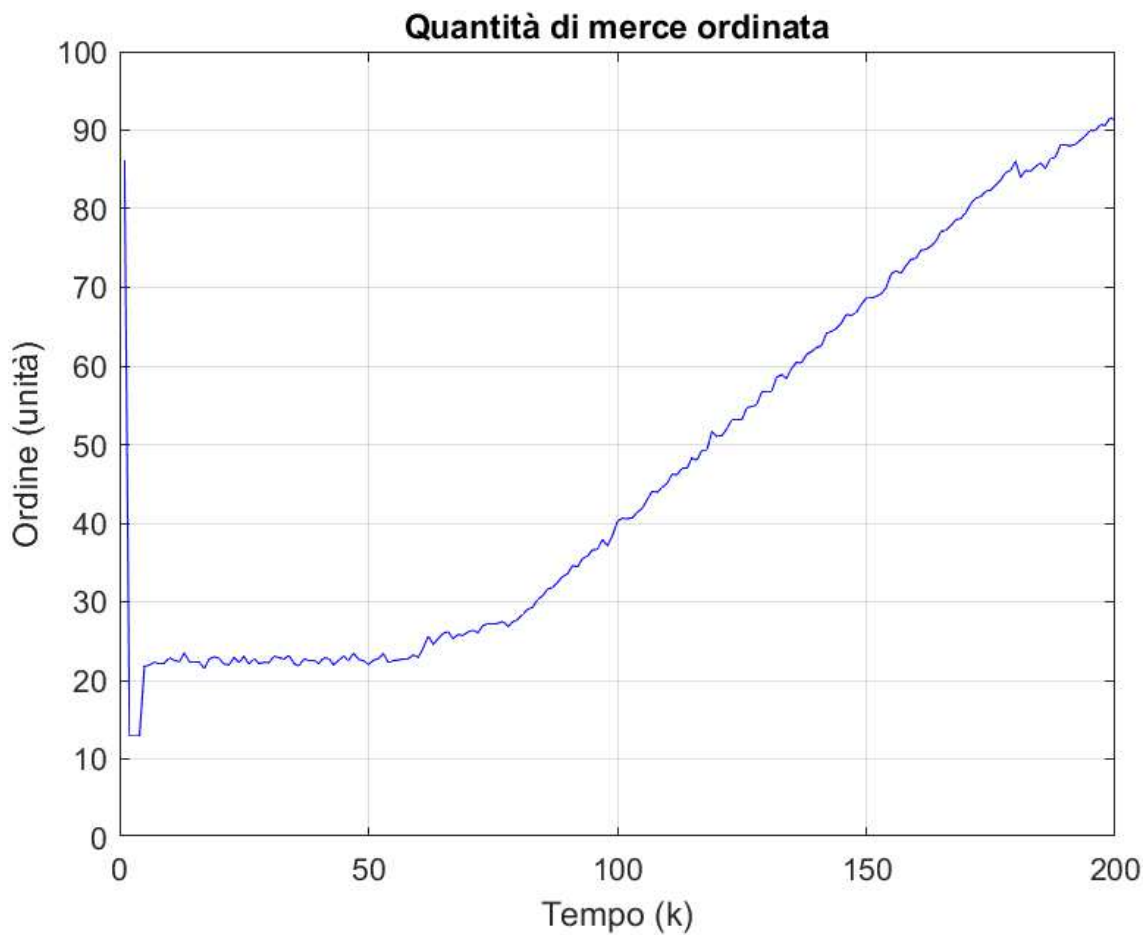
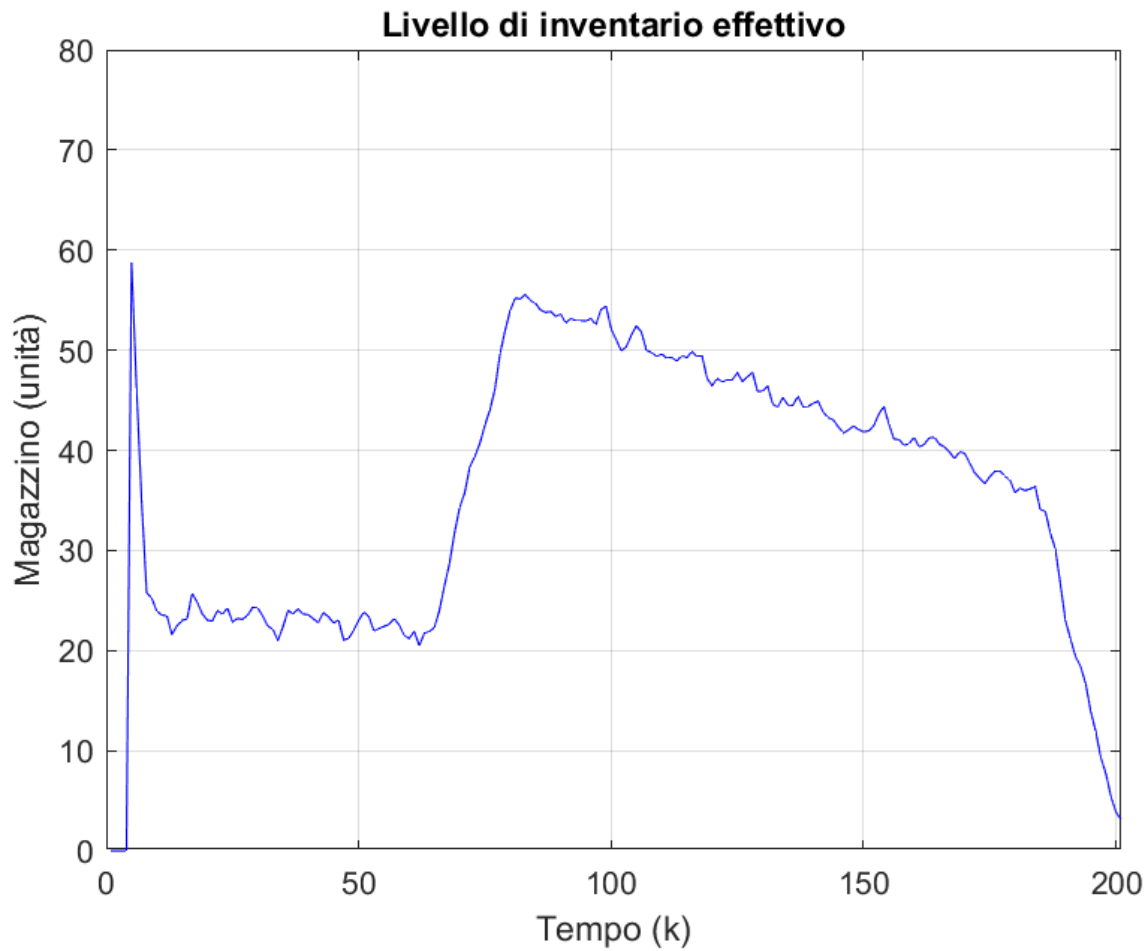
$$u(k) = (y_{des} - p_u^{n+1} \cdot y(k) - \sum_{l=2}^{n+1} p_u^l \cdot u(k - l + 1)) \div p_u$$

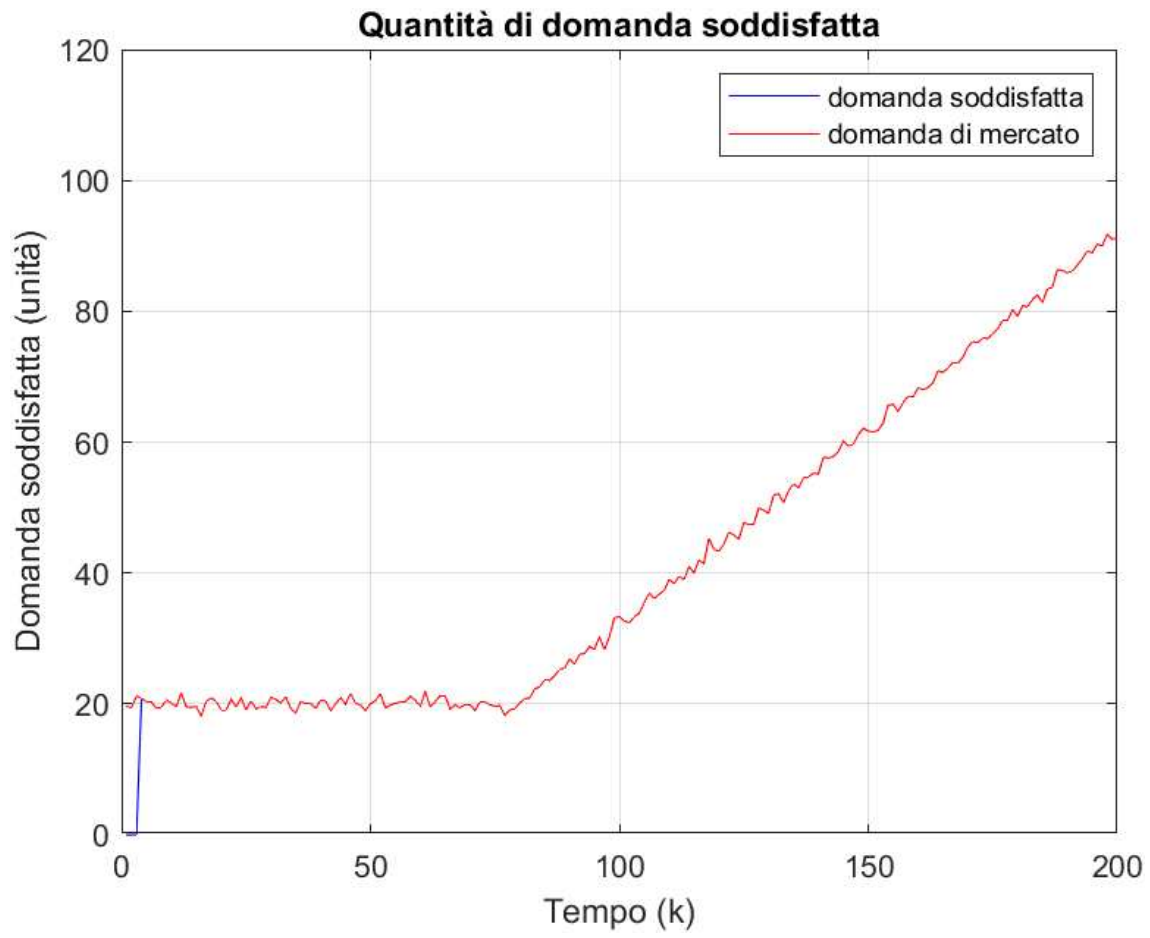
in cui è presente  $p_u$  a denominatore in modo tale che più  $p_u$  è piccolo, cioè la merce si deperisce velocemente, più alta sarà la quantità di merce ordinata, in modo tale da compensare la deperibilità della stessa.

I risultati ottenuti sono i seguenti:









### 3.4 Quarta tecnica di controllo<sup>4</sup>

In questo quarto modello viene presentata una legge di controllo con saturazione non lineare, utilizzata per sistemi a ritardo temporale variabile ma adattata al processo descritto in precedenza.

Anche qui i due valori di  $p$  sono:  $p_u = 0.88$  e  $p_{sim} = 0.90$ .

Il livello di scorte desiderato viene scelto nel seguente modo, ovvero:

$$y_{des}(k) > u_{max} \cdot \sum_{i=1}^n p_{sim}^i$$

E' presente una nuova equazione, la quale descrive la posizione corrente di inventario e su cui si basa la legge di controllo:

$$PIP(k) = p^n \cdot y(k) + \sum_{j=0}^{k-1} p^{k-j} \cdot u(j) - p^n \cdot \sum_{j=0}^{k-1} p^{k-j} \cdot u(j - n)$$

Inoltre, è stata definita una variabile ausiliaria,  $w(k)$ , in modo tale da rendere più comprensibile la legge di controllo, definita come segue:

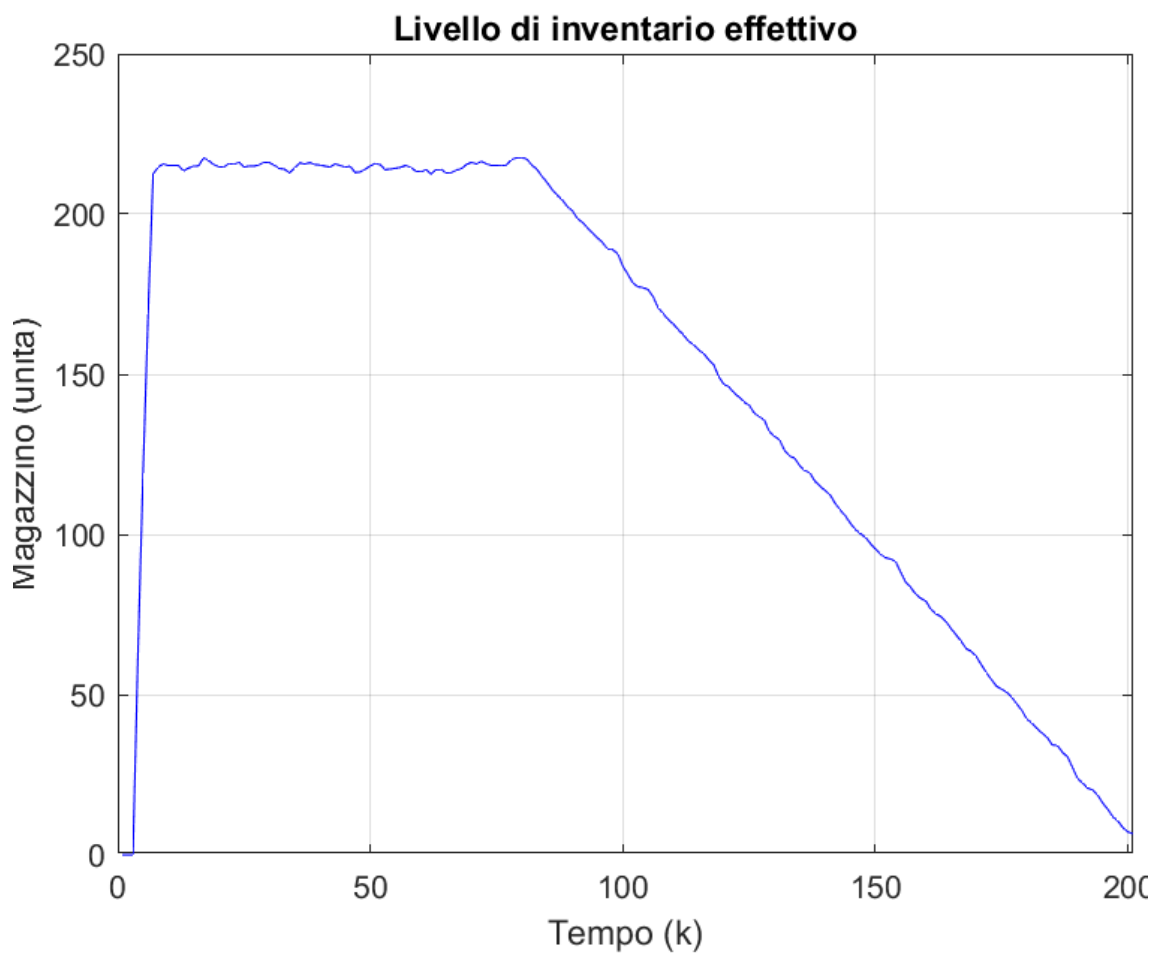
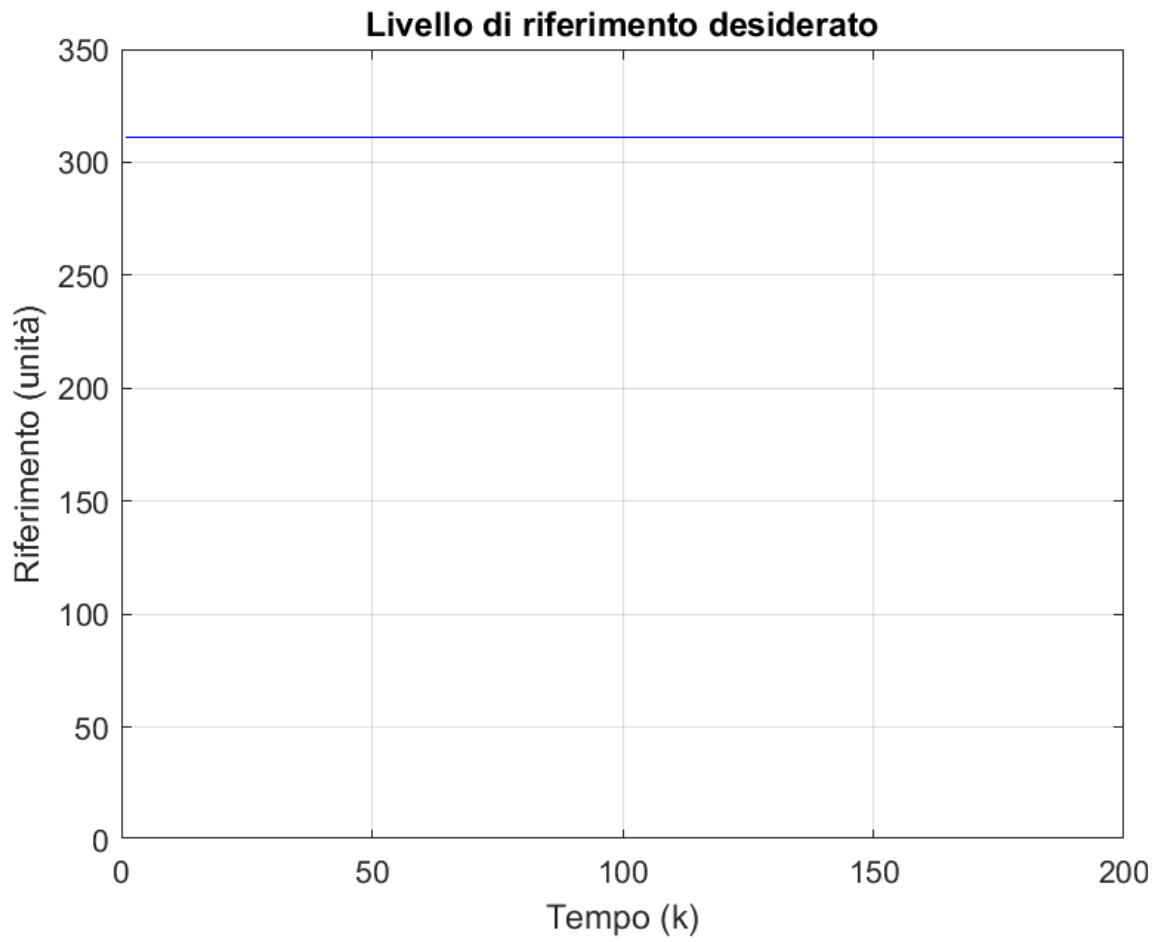
$$w(k) = y_{des}(k) - PIP(k)$$

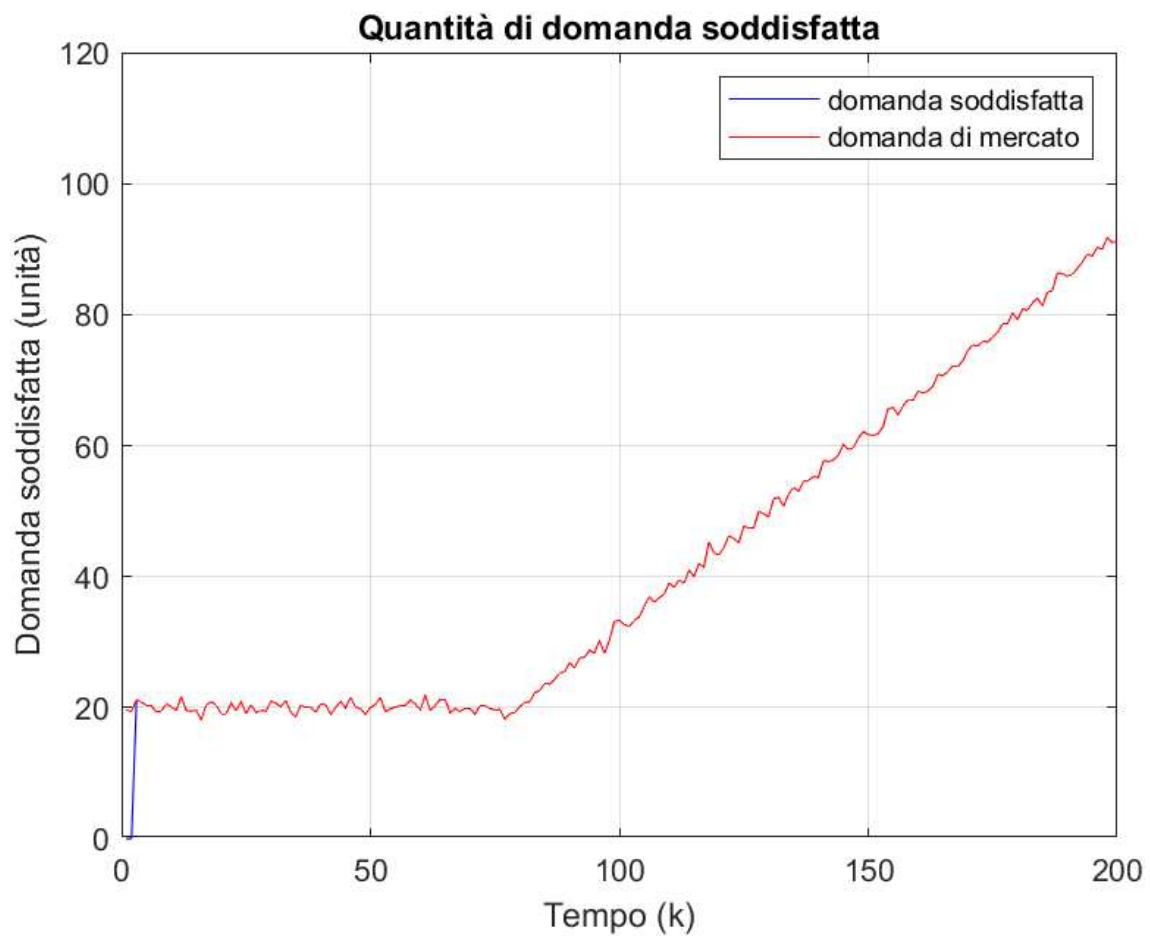
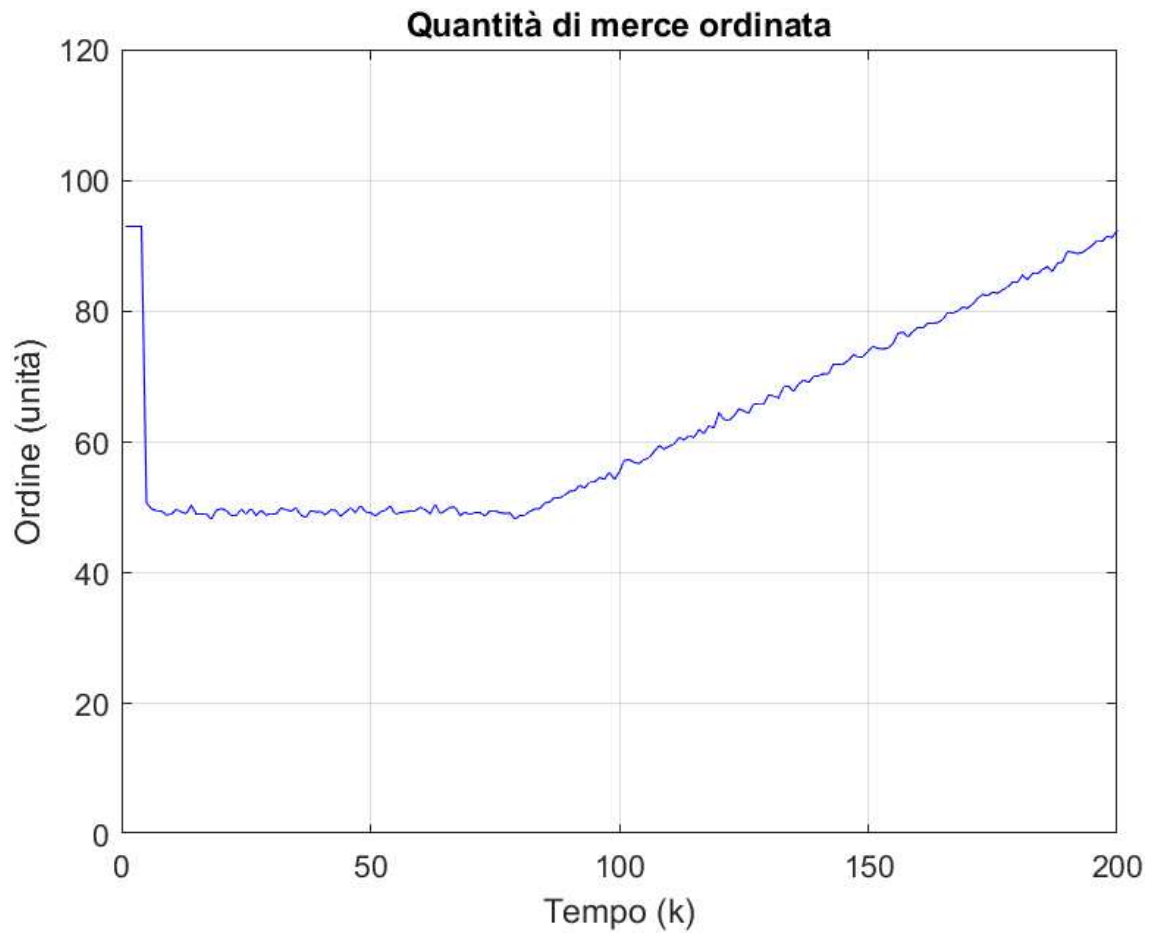
La legge di controllo di questo modello si basa, oltre che sulla posizione di inventario ( $PIP$ ), anche sulla quantità massima di prodotti ordinabili ad ogni istante  $k$ ,  $u_{max}$ , che per la simulazione è stata posta pari a 93, in quanto deve essere maggiore del massimo valore della domanda.

La legge di controllo è definita nel seguente modo:

$$\begin{aligned} u(k) &= w(k) && \text{se } w(k) \in [0; u_{max}] \\ u(k) &= 0 && \text{se } w(k) < 0 \\ u(k) &= u_{max} && \text{se } w(k) > u_{max} \end{aligned}$$

I risultati di questo quarto modello sono riportati nei grafici delle pagine successive.





## 4. Conclusioni e sviluppi futuri

In questo capitolo si confrontano i risultati ottenuti attraverso dei grafici riassuntivi dei quattro modelli della politica Order-Up-To che sono stati implementati.

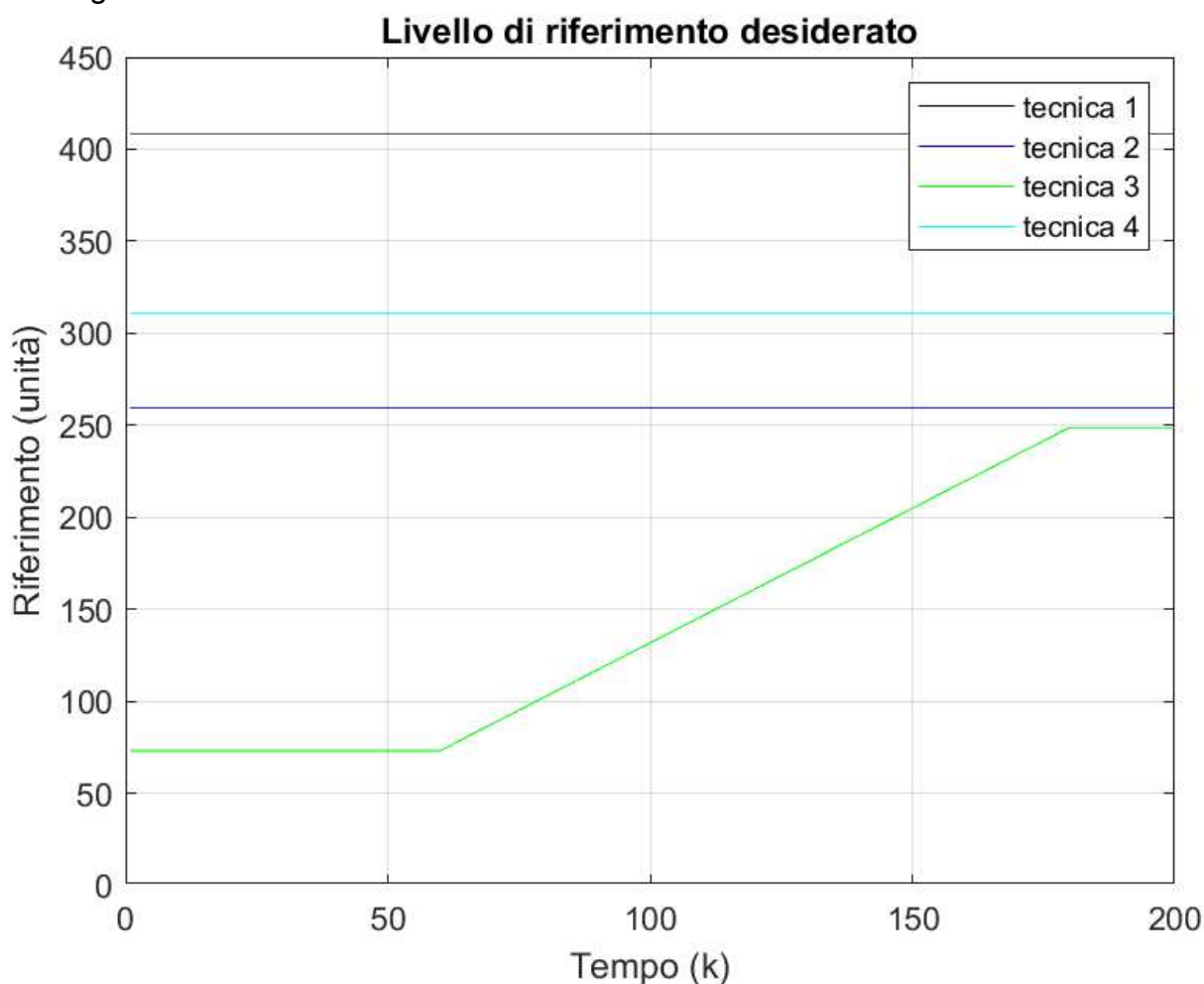
Inoltre verranno suggeriti alcuni metodi di controllo ottimo, come possibili sviluppi futuri per la gestione di una catena di rifornimento.

### 4.1 Confronto tra i risultati

Confrontando i grafici delle variabili di interesse delle varie tecniche, si ottengono dei grafici generali, dai quali è possibile analizzare le diverse prestazioni.

Il principale obiettivo prestazionale è il maggior soddisfacimento della domanda possibile, così da garantire un buon servizio ai clienti. Questo, però, deve essere ottenuto mantenendo un basso livello di inventario, in modo da limitare le spese di magazzino, e un tasso d'ordine perlopiù costante, senza eccessive oscillazioni, al fine di contenere i costi e limitare l'effetto bullwhip.

Una delle differenze tra le varie tecniche, è il modo in cui viene definito il livello di scorte (o di riferimento) desiderato. Queste differenze si possono facilmente notare dal grafico:



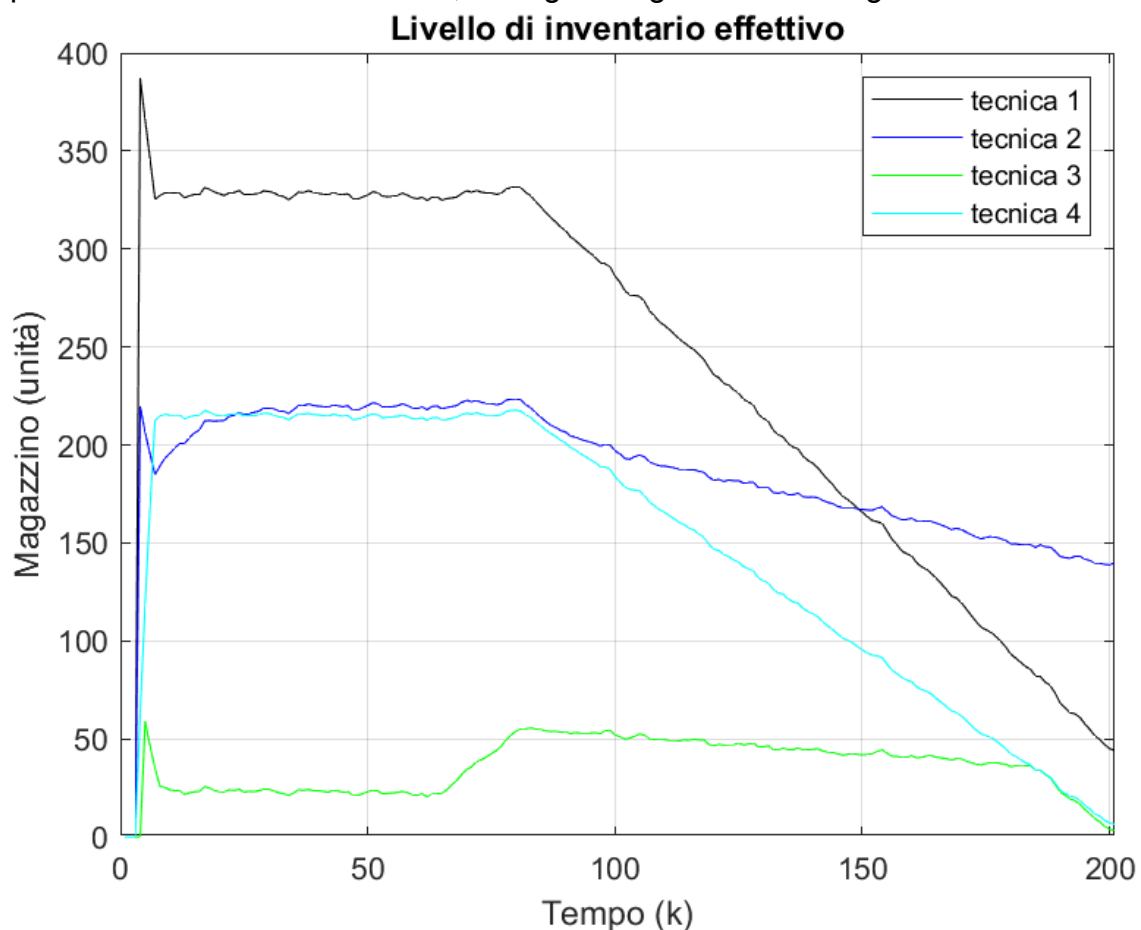
Dal grafico si nota come il livello di riferimento di tutte le tecniche, ad eccezione della terza si mantiene costante durante tutto il periodo, ovviamente con valori diversi in quanto il fattore di deperibilità, che viene utilizzato per calcolare il fattore di sicurezza, è diverso.

Nelle prime due tecniche, il riferimento è costante perché è stato impostato valutando il massimo valore della traiettoria maggiore  $d_+(k)$  nell'intero periodo  $[1; 200]$ , poi moltiplicato per il fattore di sicurezza. Nella prima tecnica, in cui non viene considerata la deperibilità della merce, cioè  $p = 1$ , ovviamente il livello di riferimento è maggiore. In questa tecnica, inoltre, è necessario definire un livello di riferimento abbastanza alto per soddisfare l'intera domanda di mercato.

Nella quarta tecnica, il livello di riferimento è definito in base alla massima quantità di prodotti che si possono ordinare in ogni periodo, ovvero  $u_{max}$ .

Nella terza tecnica, invece, il livello di riferimento è stato definito considerando, di volta in volta, il massimo valore della traiettoria maggiore  $d_+(k)$  non nell'intero periodo ma nel periodo  $[k; k + L]$ , dove  $L = 20$  e  $k$  è l'istante in cui ci si trova.

Dal punto di vista tecnico, la terza tecnica risulta essere la più precisa, poiché il livello di riferimento rispecchia maggiormente la domanda di mercato nei vari istanti. Nelle altre, infatti, essendo il livello di riferimento costante e riferito al massimo valore della traiettoria maggiore, si tende ad avere un livello di scorte troppo elevato per quella che è l'effettiva domanda di mercato e questo aumenta notevolmente le spese di magazzino. Il livello di riferimento influenza poi le altre quantità, in particolare il livello di inventario, il cui grafico generale è il seguente:



Si nota che, come anticipato in precedenza, la prima, la seconda e la quarta tecnica presentano livelli di inventario non molto efficienti.

La prima tecnica, infatti, ha un livello di inventario molto elevato durante l'intero periodo e questo comporta alte spese di magazzino e di mantenimento.

La seconda, invece, ha un livello di inventario perlopiù costante, ma troppo elevato, cioè si avranno alti costi di mantenimento.

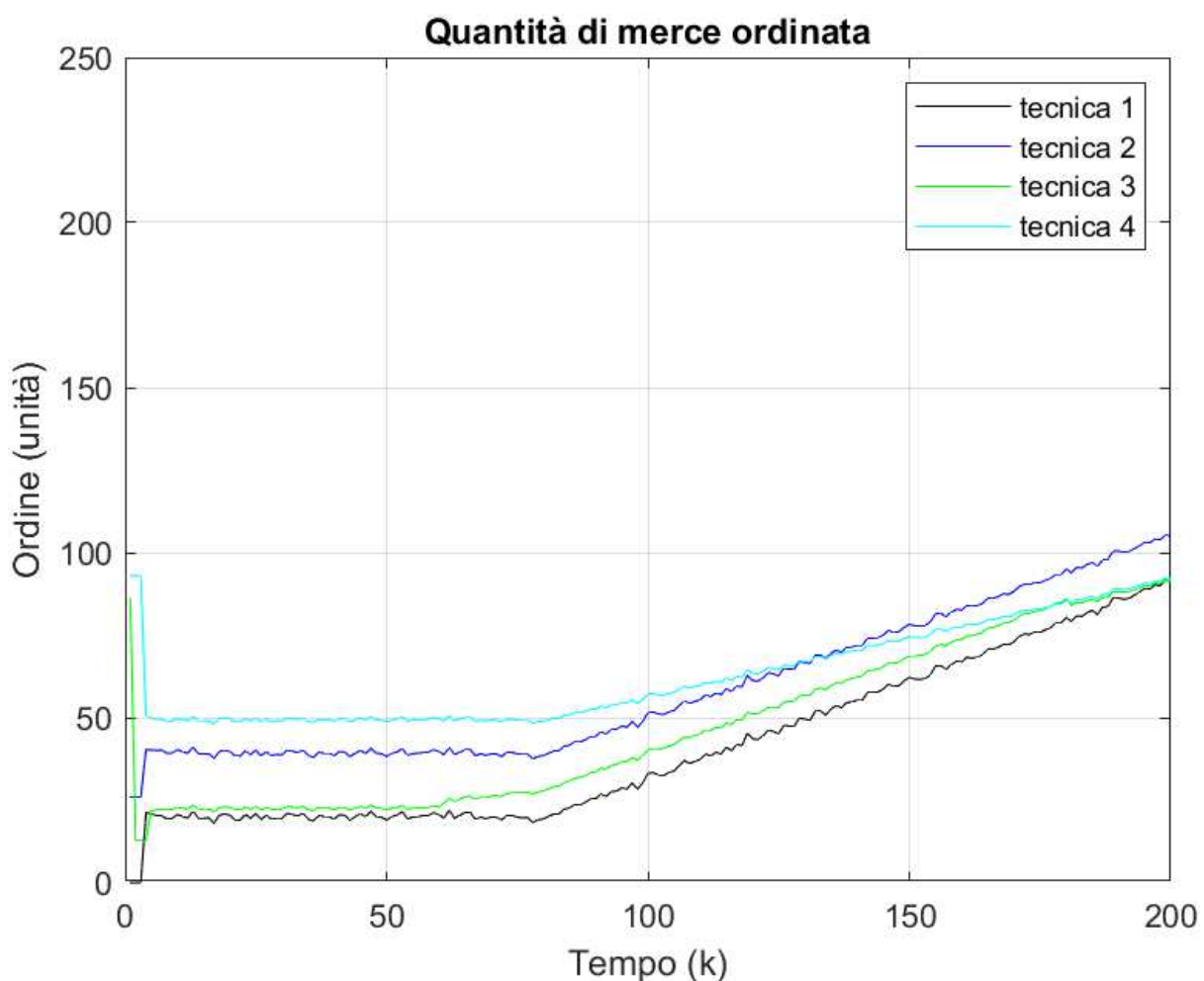
Analogamente, anche la quarta tecnica presenta un livello di inventario elevato ed è quindi soggetta ad elevati costi.

Riassumendo, queste tre tecniche sono poco efficienti dal punto di vista del livello di inventario e questo influenza anche il tasso d'ordine.

La terza tecnica, invece, ha un livello di inventario più basso e costante, e questo implica minori spese di magazzino e mantenimento.

Si può quindi concludere che, anche per quanto riguarda il livello di inventario, la terza tecnica è la più efficace.

Il livello di inventario, a sua volta, influenza il tasso d'ordine, come si può notare dal seguente grafico:

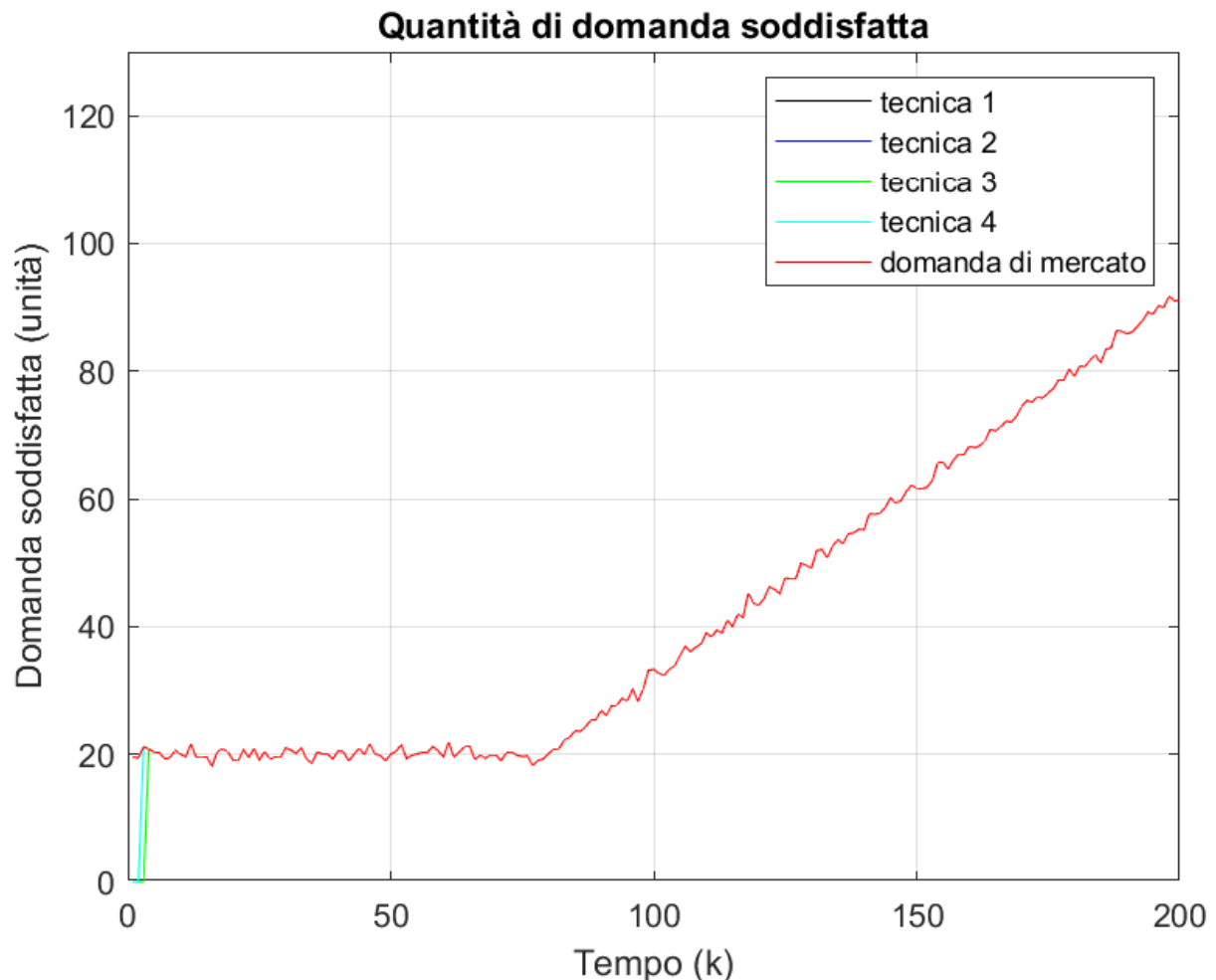




La prima tecnica presenta un tasso d'ordine pressoché costante e non elevato, ma questo è dovuto all'elevato livello di inventario, causato dall'elevato livello di riferimento, che si traduce in altissimi costi di magazzino, ed al fatto che la merce è considerata non deperibile ( $p = 1$ ).

Le altre tre tecniche, invece, sono caratterizzate da un tasso d'ordine leggermente più alto ma comunque relativamente basso e costante, che si traduce in un minor effetto bullwhip e quindi in migliori prestazioni.

L'ultimo obiettivo che si va a considerare è la quantità di domanda soddisfatta dal processo:



Ovviamente, maggiore è la quantità di domanda soddisfatta e migliore è il servizio clienti offerto.

Dal grafico si può notare che tutte le tecniche offrono un ottimo servizio clienti, in quanto soddisfano l'intera domanda di mercato durante l'intero periodo considerato. La terza tecnica, però, riesce a farlo con un livello di inventario ed un tasso d'ordine più bassi rispetto alle altre.

In conclusione, dopo aver analizzato i vari grafici, si può dire che la tecnica più efficiente è la terza. E', infatti, una tecnica di gestione della supply chain che riesce a soddisfare completamente la domanda di mercato, limitando i costi dovuti agli ordini e le spese di magazzino e di mantenimento della merce.

## 4.2 Sviluppi futuri<sup>52</sup>

La gestione di una catena di rifornimento (supply chain management, SCM) studia le decisioni sull'integrazione aziendale orientata al cliente, la collaborazione tra aziende e i processi di coordinamento per trasformare e utilizzare le risorse nel modo più efficiente possibile lungo l'intera catena. L'integrazione ed il coordinamento di questi processi, tra loro e con la produzione, richiedono un'analisi delle dinamiche e, soprattutto, delle incertezze.

Infatti, gli effetti delle varie fonti di incertezza dovrebbero essere anticipati durante la pianificazione di una supply chain (Dolgui e Louly, 2002<sup>53</sup>; Dolgui e Pashkevich, 2008<sup>54</sup>; Dolgui e Prodhon, 2007<sup>55</sup>) e questa pianificazione dovrebbe essere garantita durante il controllo dell'esecuzione (Kleindorfer e Saad, 2005<sup>56</sup>; Klibi, Martel, e Guitouni, 2010<sup>57</sup>; Kouvelis, Chambers, e Wang, 2006<sup>58</sup>; Sarimveis, Patrinos, Tarantilis, e Kiranoudis, 2008<sup>59</sup>).

Una parte importante dei problemi del supply chain management è, appunto, legata ai cambiamenti dell'ambiente ed alla reazione a questi cambiamenti, cioè alle dinamiche della supply chain. Il raggiungimento delle prestazioni pianificate dei sistemi di controllo può essere ostacolato da questi cambiamenti e dalle perturbazioni nelle situazioni reali.

I cambiamenti pongono dei limiti alle prestazioni della supply chain, i quali richiedono l'analisi della stabilità e della robustezza ed anche l'adattamento della supply chain ad un ambiente di esecuzione reale.

Nel settore del supply chain management, l'applicazione della teoria del controllo si è sviluppata sempre di più a partire dagli anni '80. Tuttavia, gli studiosi sottolineano alcuni limiti dell'analisi lineare della teoria del controllo. Ad esempio, la linearità richiede forti assunzioni per quanto riguarda il backordering della domanda e gli ordini negativi, cioè i resi fisici, ed impone pesanti oneri sulle possibili relazioni tra i parametri.

Queste limitazioni possono essere eliminate grazie ai vantaggi della teoria della dinamica dei sistemi (SD), come dimostrato da Villegas e Smith (2006)<sup>60</sup> sull'analisi del trade-off tra inventario e oscillazioni degli ordini. Uno dei vantaggi degli approcci SD è quello di affrontare le questioni non lineari della dinamica dei sistemi.

La progettazione, la pianificazione e la programmazione ottimali sono un'altra applicazione della teoria del controllo, e in particolare del controllo ottimo (OPC), alla gestione della supply chain.

Il controllo ottimo è un metodo per la risoluzione di problemi di ottimizzazione dinamica, quando tali problemi sono espressi in tempo continuo ed i valori del vettore  $J$  dei criteri di obiettivo sono accumulati nel tempo in base ai cambiamenti di un vettore di stato  $x(t)$  sotto l'influenza di azioni di controllo vincolate  $u(t)$ . Il controllo ottimo è un metodo di controllo deterministico, opposto al controllo ottimale stocastico (Fleming e Rishel, 1975<sup>61</sup>).

Sebbene l'applicazione dell'OPC sia stata ampiamente compresa a livello di pianificazione tattica, la ricerca sull'OPC per la programmazione dinamica dettagliata

della produzione e dei trasporti nel contesto della supply chain integrata è piuttosto recente. Nonostante ciò, esiste una grande quantità di pubblicazioni su questi argomenti. Questo campo emergente della pianificazione integrata e orientata al cliente (Chen, 2010<sup>62</sup>; Ivanov e Sokolov, 2011<sup>63</sup>) può diventare una nuova area di applicazione dell'OPC per il supply chain management.

Un'altra area molto ampia delle applicazioni della teoria del controllo alla gestione della supply chain è quella relativa all'adattamento e al controllo in tempo reale. In realtà, questa è l'area di riferimento di molti studiosi e professionisti della supply chain quando si parla di teoria del controllo.

Una tecnica popolare di pianificazione adattiva della supply chain è il controllo predittivo del modello (MPC). Nell'MPC, un modello di sistema e le misure, sia attuali che storiche, del processo vengono utilizzati per prevedere il comportamento del sistema in istanti futuri. Una funzione obiettivo rilevante per il controllo viene quindi ottimizzata per calcolare una sequenza di controllo che soddisfi i vincoli del sistema. L'approccio MPC non consiste semplicemente nell'eseguire frequentemente la pianificazione, ma piuttosto nello sviluppare politiche decisionali (Wang et al., 2007<sup>64</sup>).

Quando si applica il controllo predittivo del modello alla gestione della supply chain, il controllore centralizzato e le sue funzioni sono essenziali. Nei sistemi tecnici, il controllore è un dispositivo tecnico (ad esempio, un sensore) che adatta il comportamento del sistema in base all'identificazione degli errori entro pochi millisecondi. Il controllore del sistema di gestione è un manager o, più precisamente, una serie di manager con possibili interessi contrastanti. Anche se una deviazione nell'esecuzione del sistema di controllo è stata identificata (ad esempio, l'identificazione del ritardo di un binario), il controllore MPC non sarà in grado di cambiare nulla in questa situazione. Pertanto, i modelli sono necessari per identificare le deviazioni e informare i responsabili della supply chain. Questo serve a stimare l'impatto di quel particolare disturbo sulle prestazioni della supply chain e a produrre raccomandazioni sugli adattamenti da apportare. Per questo motivo sono necessarie ulteriori ricerche per analizzare l'applicabilità dell'MPC ai sistemi della supply chain.

# ***Bibliografia***

In questa tesi sono presenti i seguenti riferimenti:

1. Ivanov, Dmitry, Suresh Sethi, Alexandre Dolgui, and Boris Sokolov. "A Survey on Control Theory Applications to Operational Systems, Supply Chain Management, and Industry 4.0" ScienceDirect, October 11, 2018.
2. Sarimveis, Haralambos, Panagiotis Patrinos, Chris D. Tarantilis, and Chris T. Kiranoudis. "Dynamic Modeling and Control of Supply Chain Systems: A Review" ScienceDirect, February 7, 2007.
3. Riddalls, C.E., S. Bennett, and N. Tipi. "Modelling the Dynamics of Supply Chains" 1999.
4. Ignaciuk, Przemysław. "Discrete Inventory Control in Systems with Perishable Goods – a Time-Delay System Perspective" IET Control Theory and Applications, September 4, 2013.
5. Advanced Solutions International, Inc. The Importance of Supply Chain Management, December 2, 2022.
6. Lee HL, Padmanabhan V, Whang S. The bullwhip effect in supply chains. Sloan Management Review 1997;38(3):93–102.
7. Towill DR, McCullen P. The impact of agile manufacturing programme on supply chain dynamics. International Journal of Logistics Management 1999;10(1):83–96.
8. Simon HA. On the application of servomechanism theory in the study of production control. Econometrica 1952;20:247–68.
9. Forrester JW. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. Harvard Business Review 1958;36:37–66.
10. Forrester JW. Industrial dynamics. Cambridge, MA: MIT Press; 1961.
11. Ansof HI, Slevin DP. An appreciation of industrial dynamics. Management Science 1968;14:91–106.
12. Towill DR. Dynamic analysis of an inventory and order based production control system. International Journal of Production Research 1982;20:671–87.
13. Coyle RG. Management system dynamics. London: Wiley; 1977.
14. Disney, S.M., and D.R. Towill. "Eliminating Drift in Inventory and Order Based Production Control Systems" International Journal of Production Economics, 2005.
15. Lalwani CS, Disney SM, Towill DR. Controllable, observable and stable state space representations of a generalized order-up-to policy. International Journal of Production Dynamics 2006;101:172–84.
16. John S, Naim MM, Towill DR. Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system. International Journal of Manufacturing System Design 1994;1:283–97.
17. Zhou L, Naim MM, Tang O, Towill DR. Dynamic performance of a hybrid inventory system with a Kanban policy in remanufacturing process. Omega 2006;34:585–98.
18. Lai CL, Lee WB, IpWH. A study of system dynamics in just-in-time logistics. Journal of Materials Processing Technology 2003;138:265–9.

19. Dejonckheere J, Disney SM, Lambrecht MR, Towill DR. Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach. *European Journal of Operational Research* 2003;147:567–90.
20. White AS. Management of inventory using control theory. *International Journal of Technology Management* 1999;17:847–60.
21. Towill DR, Evans GN, Cheema P. Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system. *Production Planning & Control* 1997;8:545–57.
22. Evans GN, Naim MM, Towill DR. Application of a simulation methodology to the redesign of a logistical control system. *International Journal of Production Economics* 1998;56–57:157–68.
23. Grubbström RW, Wikner J. Inventory trigger policies developed in terms of control theory. *International Journal of Production Economics* 1996;45:397–406.
24. Cannella, Salvatore. “Order-Up-To Policies in Information Exchange Supply Chains” *ScienceDirect*, April 23, 2014.
25. Cannella, Salvatore, Borja Ponte, Roberto Dominguez, and Jose M. Framinan. “Proportional Order-up-to Policies for Closed-Loop Supply Chains: The Dynamic Effects of Inventory Controllers” *International Journal of Production Research*, 2021.
26. C. Li, Controlling the bullwhip effect in a supply chain system with constrained information flows, *Appl. Math. Model.* 37 (4) (2013) 1897–1909.
27. A. Hassanzadeh, A. Jafarian, M. Amiri, Modeling and analysis of the causes of bullwhip effect in centralized and decentralized supply chain using response surface method, *Appl. Math. Model.* 38 (9–10) (2013) 2353–2365.
28. Y.F. Chen, Z. Drezner, J.K. Ryan, D. Simchi-Levi, Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead times, and information, *Manage. Sci.* 46 (3) (2000) 436–443.
29. S.M. Disney, D.R. Towill, A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain, *International Journal of Production Research* 40 (1) (2002) 179–204.
30. D.C. Chatfield, J.G. Kim, T.P. Harrison, J.C. Hayya, The bullwhip effect - Impact of stochastic lead time, information quality, and information sharing: a simulation study, *Prod. Oper. Manage.* 13 (4) (2004) 340–353.
31. J.G. Kim, D. Chatfield, T.P. Harrison, J.C. Hayya, Quantifying the bullwhip effect in a supply chain with stochastic lead time, *Eur. J. Oper. Res.* 173 (2) (2006) 617–636.
32. T. Kelepouris, P. Miliotis, K. Pramataris, The impact of replenishment parameters and information sharing on the Bullwhip effect: a computational study, *Comput. Oper. Res.* 35 (11) (2008) 3657–3670.
33. P.J. Byrne, C. Heavey, The impact of information sharing and forecasting in capacitated industrial supply chains: a case study, *Int. J. Prod. Econ.* 103 (1) (2006) 420–437.
34. T.T. Niranjan, S.M. Wagner, V. Aggarwal, Measuring information distortion in real-world supply chains, *Int. J. Prod. Res.* 49 (11) (2011) 3343–3362.
35. E. Ciancimino, S. Cannella, M. Bruccoleri, J.M. Framinan, On the bullwhip avoidance phase: the synchronised supply, *Eur. J. Oper. Res.* 221 (1) (2012) 49–63.
36. M.M. Ali, J.E. Boylan, A.A. Syntetos, Forecast errors and inventory performance under forecast information sharing, *Int. J. Forecast.* 40 (6) (2012) 738–747.

37. T. Hosoda, M.M. Naim, S.M. Disney, A. Potter, Is there a benefit to sharing market sales information? Linking theory and practice, *Comput. Ind. Eng.* 54 (2) (2008) 315–326.
38. S. Cannella, E. Ciancimino, J.M. Framinan, Inventory policies and information sharing in multi-echelon supply chains, *Prod. Planning Control* 22 (7) (2011) 649–659.
39. H.L. Lee, V. Padmanabhan, S. Whang, Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect, *Manage. Sci.* 43 (4) (1997) 546–558.
40. C. Li, S. Liu, A robust optimization approach to reduce the bullwhip effect of supply chains with vendor order placement lead time delays in an uncertain environment, *Appl. Math. Model.* 37 (3) (2013) 707–718.
41. J.R. Trapero, N. Kourentzes, R. Fildes, Impact of information exchange on supplier forecasting performance, *Omega* 40 (6) (2012) 738–747.
42. R. Domínguez, J.M. Framinan, S. Cannella, Serial versus divergent supply chain networks: a comparative analysis of the bullwhip effect, *International Journal of Production Research* 52 (7) (2014) 2194–2210.
43. M. Holweg, S.M. Disney, J. Holmström, J. Småros, Supply chain collaboration: making sense of the strategy continuum, *Eur. Manage. J.* 23 (2) (2005) 170–181.
44. J. Dejonckheere, S.M. Disney, M.R. Lambrecht, D.R. Towill, The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: a control engineering perspective, *Eur. J. Oper. Res.* 153 (3) (2004) 727–750.
45. S. Agrawal, R.N. Sengupta, K. Shanker, Impact of information sharing and lead time on bullwhip effect and on-hand inventory, *Eur. J. Oper. Res.* 192 (2) (2009) 576–593.
46. Y. Barlas, B. Gunduz, Demand forecasting and sharing strategies to reduce fluctuations and the bullwhip effect in supply chains, *J. Oper. Res. Soc.* 62 (3) (2011) 458–473.
47. A.C. Hax, D. Candea, *Production and Inventory Management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984.
48. S.M. Disney, M.R. Lambrecht, On replenishment rules, forecasting, and the bullwhip effect in supply chains, *Found. Trends Technol. Inf. Oper. Manage.* 2 (1) (2008) 1–80.
49. Y.F. Chen, S.M. Disney, The myopic order-up-to policy with a proportional feedback controller, *Int. J. Prod. Res.* 45 (2) (2007) 351–368.
50. S. Cannella, E. Ciancimino, On the bullwhip avoidance phase: supply chain collaboration and order smoothing, *Int. J. Prod. Res.* 48 (22) (2010) 6739–6776.
51. J. Dejonckheere, S.M. Disney, M.R. Lambrecht, D.R. Towill, Measuring and avoiding the bullwhip effect: a control theoretic approach, *Eur. J. Oper. Res.* 147 (3) (2003) 567–590.
52. Ivanov, Dmitry, Alexandre Dolgui, and Boris Sokolov. “Applicability of Optimal Control Theory to Adaptive Supply Chain Planning and Scheduling.” *ScienceDirect*, February 18, 2012.
53. Dolgui, A., & Louly, M.-A. (2002). A model for supply planning under lead time uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 78(2), 145–152.
54. Dolgui, A., & Pashkevich, M. (2008). On the performance of binomial and betabinomial models of demand forecasting for multiple slow-moving inventory items. *Computers & Operations Research*, 35(3), 893–905.

55. Dolgui, A., & Prodhon, C. (2007). Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 269–279.
56. Kleindorfer, P. R., & Saad, G. H. (2005). Managing disruption risks in supply chains. *Production and Operations Management*, 14(1), 53–68.
57. Klibi, W., Martel, A., & Guitouni, A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 283–293.
58. Kouvelis, P., Chambers, C., & Wang, H. (2006). Supply chain management research and production and operations management: Review, trends, and opportunities. *Production and Operations Management*, 15(3), 449–469.
59. Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2008). Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review. *Computers & Operations Research*, 35, 3530–3561.
60. Villegas, F. A., & Smith, N. R. (2006). Supply chain dynamics: Analysis of inventory vs. order oscillations trade off. *International Journal of Production Research*, 44(6), 1037–1054.
61. Fleming, W. H., & Rishel, R. W. (1975). *Deterministic and stochastic optimal control*. Berlin, Heidelberg: Springer.
62. Chen, Z.-L. (2010). Integrated production and outbound distribution scheduling: Review and extensions. *Operations Research*, 58(1), 130–148.
63. Ivanov, D., & Sokolov, B. (2011). Dynamic supply chain scheduling. *Journal of Scheduling*.
64. Wang, W., Rivera, D., & Kempf, K. G. (2007). Model predictive control strategies for supply chain management in semiconductor industry. *International Journal of Production Economics*, 107, 56–77.

## **Ringraziamenti**

Vorrei riservare questo spazio finale della mia tesi di laurea ai ringraziamenti verso tutti coloro che hanno contribuito, ognuno a suo modo, alla realizzazione della stessa.

*Un sentito ringraziamento va al mio relatore, il Professor **Leopoldo letto**, che mi ha seguito, con disponibilità e gentilezza, in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento.*

*Ringrazio immensamente le due persone che hanno avuto più influenza nel mio percorso: i miei genitori, in particolare mia madre, il mio punto di riferimento, che mi ha sempre sostenuto nell'affrontare ogni difficoltà, mi ha consigliato nelle scelte più difficili, mi ha incitato a rialzarmi dopo le sconfitte, e spronato a dare il massimo, sempre!*

*Infine, grazie ai miei amici di sempre, per avermi sostenuto con costanza, per aver condiviso con me esperienze importanti e per essere sempre al mio fianco nonostante tutto.*