



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

FACOLTA' DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**ANALISI DEI FLUSSI DI SPEDIZIONE DA UN MAGAZZINO DI  
PRODOTTI ALIMENTARI**

**ANALYSIS OF SHIPPING FLOWS FROM A FOOD PRODUCTS  
WAREHOUSE**

Relatore: Chiar.ma  
Prof. **Sara Antomarioni**

Tesi di Laurea di:  
**Matteo Evangelista**

**A.A. 2023 / 2024**

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITOLO 1 – LA TEORIA DELLE CODE .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 DEFINIZIONE E ORIGINI.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 EVOLUZIONE .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 I PRIMI SVILUPPI (ANNI 1900 - 1930) .....	9
1.2.2 L'ESPANSIONE E L'APPROFONDIMENTO (ANNI 1930 - 1950) .....	10
1.2.3 L'ERA DELLA SIMULAZIONE (ANNI 1960 - 1980) .....	10
1.2.4 L'AVVENTO DELLE TECNOLOGIE MODERNE (ANNI 1990 - 2000) .....	11
1.2.5 SISTEMI COMPLESSI E APPROCCI MODERNI (2000 - OGGI) .....	12
<b>1.3 DESCRIZIONE MATEMATICA .....</b>	<b>12</b>
1.3.1 I FONDAMENTI DELLA TEORIA DELLE CODE .....	13
1.3.2 MODELLI DI CODA FONDAMENTALI .....	14
1.3.3 TEOREMA DI LITTLE .....	16
1.3.4 GRAFICO ESEMPLIFICATIVO PER UN SISTEMA M/M/1 .....	17
<b>1.4 UTILIZZI .....</b>	<b>18</b>
1.4.1 GESTIONE DELLE RISORSE NEI SERVIZI CLIENTI.....	18
1.4.2 SISTEMI INFORMATICI E RETI DI COMUNICAZIONE .....	19
1.4.3 PRODUZIONE INDUSTRIALE E LOGISTICA .....	20
1.4.4 TRANSITO E SISTEMI DI TRASPORTO .....	20
1.4.5 SANITÀ .....	21
1.4.6 SISTEMI DI SERVIZIO PUBBLICO E AMMINISTRAZIONE .....	21
1.4.7 CONCLUSIONI SUGLI UTILIZZI DELLA TEORIA DELLE CODE .....	21
<b>1.5 OBIETTIVI .....</b>	<b>22</b>
1.5.1 OTTIMIZZAZIONE DEI TEMPI DI ATTESA.....	22
1.5.2 EFFICIENZA NELL'USO DELLE RISORSE .....	23
1.5.3 MIGLIORAMENTO DELLA QUALITÀ DEL SERVIZIO .....	23
1.5.4 RIDUZIONE DEI COSTI OPERATIVI .....	24
1.5.5 PREVISIONE E PIANIFICAZIONE DELLE DOMANDE .....	24
1.5.6 SOSTENIBILITÀ E IMPATTI AMBIENTALI .....	25
1.5.7 CONCLUSIONI SUGLI OBIETTIVI DELLA TEORIA DELLE CODE .....	25
<b>1.6 SFIDE E LIMITI .....</b>	<b>26</b>

1.6.1 COMPLESSITÀ DEI MODELLI MATEMATICI .....	26
1.6.2 ASSUNZIONI IDEALIZZATE E REALISMO LIMITATO .....	27
1.6.3 VARIABILITÀ DEI DATI E INCERTEZZA .....	27
1.6.4 COMPORTAMENTI NON-LINEARI E INTERAZIONI COMPLESSE .....	28
1.6.5 L'APPLICAZIONE A SISTEMI MULTIDIMENSIONALI E COMPLESSI .....	29
1.6.6 CONCLUSIONI SULLE SFIDE E LIMITI .....	29
<b>1.7 APPLICAZIONI FUTURE.....</b>	<b>30</b>
1.7.1 INTEGRAZIONE CON INTELLIGENZA ARTIFICIALE E MACHINE LEARNING .....	30
1.7.2 AUTOMAZIONE E INDUSTRIA 4.0.....	31
1.7.3 TELECOMUNICAZIONI E RETI 5G .....	31
1.7.4 TRASPORTI E MOBILITÀ URBANA .....	32
1.7.5 SANITÀ E GESTIONE DELLE EMERGENZE.....	33
<b>1.8 IMPATTO ECONOMICO E SOCIALE.....</b>	<b>33</b>
1.8.1 IMPATTO ECONOMICO: EFFICIENZA OPERATIVA E RIDUZIONE DEI COSTI.....	34
1.8.2 IMPATTO SOCIALE: MIGLIORAMENTO DEI SERVIZI E DELLA QUALITÀ DELLA VITA .....	35
1.8.3 SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E RIDUZIONE DELL'IMPATTO ECOLOGICO .....	35
1.8.4 RIDUZIONE DELLE DISUGUAGLIANZE SOCIALI.....	36
1.8.5 CONCLUSIONI SULL'IMPATTO ECONOMICO E SOCIALE .....	37
<b>CAPITOLO 2 – LA LOGISTICA DI MAGAZZINO .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1 DEFINIZIONE E ORIGINI.....</b>	<b>38</b>
2.1.1 LOGISTICA: DEFINIZIONE GENERALE.....	38
2.1.2 LOGISTICA DI MAGAZZINO: COS'È E ORIGINI .....	38
<b>2.2 EVOLUZIONE .....</b>	<b>38</b>
2.2.1 LA LOGISTICA DI MAGAZZINO NELLE ERE PREINDUSTRIALI .....	38
2.2.2 LA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE E I MAGAZZINI MODERNI .....	39
2.2.3 L'ERA DEL MAGAZZINO AUTOMATIZZATO .....	39
2.2.4 LA LOGISTICA 4.0.....	39
<b>2.3 DESCRIZIONE MATEMATICA .....</b>	<b>39</b>
2.3.1 MODELLIZZAZIONE DELLA LOGISTICA DI MAGAZZINO .....	39
2.3.2 TEORIA DELLE CODE APPLICATA AI MAGAZZINI.....	40
2.3.3 FORMULE PRINCIPALI PER L'OTTIMIZZAZIONE .....	40
2.3.4 GRAFICI ILLUSTRATIVI .....	41

<b>2.4 UTILIZZI .....</b>	<b>41</b>
2.4.1 SETTORE INDUSTRIALE .....	41
2.4.2 SETTORE RETAIL .....	41
2.4.3 SETTORE SANITARIO .....	41
<b>2.5 OBIETTIVI .....</b>	<b>42</b>
2.5.1 RIDUZIONE DEI COSTI OPERATIVI .....	42
2.5.2 MIGLIORAMENTO DEL SERVIZIO AL CLIENTE .....	42
2.5.3 SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE .....	42
<b>2.6 SFIDE E LIMITI .....</b>	<b>42</b>
<b>COMPLESSITÀ TECNOLOGICA:.....</b>	<b>42</b>
<b>2.7 APPLICAZIONI FUTURE.....</b>	<b>43</b>
<b>2.8 IMPATTO ECONOMICO E SOCIALE.....</b>	<b>43</b>
<b>CAPITOLO 3 - DATI E ANALISI .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 OBIETTIVO DELL'ANALISI SVOLTA.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2 DESCRIZIONE DEI DATI ORIGINALI .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3 FASE I.....</b>	<b>46</b>
<b>3.4 FASE II .....</b>	<b>50</b>
<b>CAPITOLO 4 – RISULTATI E CONSIDERAZIONI .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1 OBIETTIVO DELLO STUDIO .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2 RISULTATI FASE I .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 RISULTATI FASE II .....</b>	<b>57</b>
<b>CONCLUSIONE .....</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFIA - SITOGRAFIA .....</b>	<b>61</b>

# INTRODUZIONE

La presente tesi si propone di analizzare in modo sistematico il fenomeno delle code e la sua applicazione nel contesto della logistica di magazzino, con un focus particolare su un caso di studio reale sviluppato durante un tirocinio. L'obiettivo principale è quello di individuare criticità e proporre soluzioni basate su un'analisi dettagliata dei dati aziendali.

Nel primo capitolo verrà presentata una panoramica completa sulla teoria delle code: una disciplina che nasce per studiare i fenomeni di attesa nei sistemi complessi e che trova applicazioni in diversi ambiti industriali. Saranno trattate la definizione, le origini e l'evoluzione della teoria, oltre a una descrizione matematica dei suoi principali modelli e delle loro implicazioni pratiche.

Il secondo capitolo si concentrerà sulla logistica di magazzino, delineandone i concetti fondamentali e ponendo l'accento sull'importanza della teoria delle code per l'ottimizzazione dei processi logistici. Pur mantenendo una struttura simile al capitolo precedente, l'attenzione sarà rivolta all'applicazione concreta della teoria al settore in esame.

Nel terzo capitolo verrà descritto il lavoro svolto durante il tirocinio. L'analisi si è basata su un dataset aziendale relativo ai flussi di spedizione di un magazzino alimentare, con l'obiettivo di studiare i tempi di attesa dei prodotti sulla rulliera finale prima della spedizione. Questo capitolo è suddiviso in due fasi principali: nella prima si è analizzato il tempo medio di attesa individuando le ore e i giorni più critici, mentre nella seconda si è approfondito lo studio del numero di arrivi dei prodotti, con rappresentazioni grafiche e una suddivisione più dettagliata degli intervalli temporali.

Infine, nel quarto capitolo, verranno presentati i risultati dell'analisi e le considerazioni conclusive. Saranno discusse le implicazioni pratiche per l'azienda, sottolineando i vantaggi di un approccio data-driven per il miglioramento delle performance logistiche.

Questa tesi intende dimostrare come l'applicazione di modelli teorici a dati concreti possa fornire strumenti utili per affrontare le sfide operative, contribuendo al miglioramento dell'efficienza e alla riduzione dei costi aziendali.

# **CAPITOLO 1 – LA TEORIA DELLE CODE**

## **1.1 DEFINIZIONE E ORIGINI**

La teoria delle code è un ramo della matematica applicata che studia i fenomeni di attesa e gestione delle risorse in vari contesti, dove le richieste per un servizio o una risorsa limitata sono processate in sequenza. Si tratta di un modello che trova applicazione in una vasta gamma di settori, tra cui le telecomunicazioni, la logistica, il traffico urbano, l'assistenza sanitaria, i servizi al pubblico e, in generale, in tutte le situazioni in cui si devono gestire flussi di richieste. L'analisi delle code, infatti, si concentra sul comportamento di sistemi che accolgono richieste (individui, veicoli, pacchetti di dati, ecc.) e le processano in un ordine di arrivo predeterminato, attraverso un processo di servizio che ha una durata variabile e, talvolta, aleatoria.

La storia della teoria delle code risale ai primi decenni del Novecento, con il lavoro pionieristico di Agner Krarup Erlang, un ingegnere telefonico danese. Nel 1909, Erlang sviluppò il primo modello matematico per analizzare i sistemi telefonici, specificamente per studiare le linee telefoniche in grado di gestire il flusso di chiamate in arrivo. Il suo obiettivo era ottimizzare l'allocazione delle risorse, evitando sovraccarichi che avrebbero causato un aumento delle chiamate perse e migliorando l'esperienza dell'utente, riducendo i tempi di attesa per una linea telefonica libera. La sua formula, che si concentra sulla probabilità di occupazione di una centrale telefonica, è ancora oggi una delle basi fondamentali nella teoria delle code.

Il modello originale di Erlang si concentrava su una singola linea telefonica, ma i suoi concetti sono stati successivamente estesi per includere sistemi con più server, descrivendo situazioni più complesse in cui le risorse di servizio sono moltiplicate, come nel caso di una centrale telefonica con più linee attive, o in un supermercato con più casse

disponibili per servire i clienti. Il termine "teoria delle code" si è evoluto e oggi comprende una vasta gamma di modelli matematici che si applicano a qualsiasi tipo di scenario in cui sia necessario gestire l'afflusso di richieste.

L'importanza della teoria delle code è cresciuta notevolmente nel corso del ventesimo secolo e nei decenni successivi, tanto che oggi essa è applicata in numerosi contesti oltre al settore delle telecomunicazioni. Con l'avvento dei sistemi informatici, dei servizi al pubblico e delle reti di trasporto complesse, l'applicazione dei principi delle code si è rivelata fondamentale per l'ottimizzazione delle risorse, per la previsione dei tempi di attesa e per il miglioramento dell'efficienza complessiva dei sistemi. La teoria delle code si è evoluta in maniera tale da permettere una gestione altamente efficiente di risorse limitate e di flussi di richieste che vanno a variare continuamente, come nei sistemi di traffico stradale, nelle reti di comunicazione dati o nel settore sanitario.

Un aspetto centrale della teoria delle code riguarda il concetto di bilanciamento tra la domanda e l'offerta di risorse. In molti contesti pratici, l'obiettivo è quello di ridurre i tempi di attesa e di prevenire i colli di bottiglia che possano compromettere l'efficienza del sistema. Un sistema di coda può essere rappresentato come una sequenza temporale in cui ogni richiesta deve attendere il suo turno per essere processata. Le variabili di arrivo e di servizio determinano la dinamica del sistema di attesa, e i modelli di coda cercano di quantificare il comportamento di questi flussi, identificando il miglior modo per allocare le risorse disponibili e ridurre i tempi di attesa.

Nel contesto delle telecomunicazioni, per esempio, la teoria delle code ha consentito di modellare i flussi di traffico in una rete telefonica o in un data center, determinando come ottimizzare la distribuzione delle risorse per ridurre la congestione e massimizzare l'efficienza. Nei centri di assistenza clienti, i modelli di code sono utilizzati per ottimizzare il numero di operatori e ridurre il tempo di attesa dei clienti. In modo simile, nei sistemi di trasporto, la teoria delle code è impiegata per ottimizzare la gestione del traffico, migliorare la capacità delle strade e ridurre i tempi di attesa nelle stazioni di transito.

Un altro esempio significativo è rappresentato dalla sanità: in ospedali e cliniche, l'analisi delle code aiuta a gestire la capacità delle strutture, ottimizzare il numero di medici o

infermieri necessari e ridurre i tempi di attesa per i pazienti. La teoria delle code è essenziale anche in ambienti ad alta criticità come le emergenze sanitarie, dove l'ottimizzazione del flusso dei pazienti e delle risorse è fondamentale per garantire un'efficace risposta.

Inoltre, la teoria delle code è un campo che non si limita solo ad analizzare il sistema statico di coda, ma estende anche le sue applicazioni a sistemi dinamici, dove i flussi di richieste possono variare nel tempo in base a diverse condizioni (ad esempio, un flusso di traffico in aumento durante le ore di punta o una richiesta di risorse informatiche che cambia in tempo reale). Negli ultimi anni, i modelli si sono evoluti in modo significativo grazie all'avvento delle tecnologie di simulazione e all'uso dell'intelligenza artificiale. L'integrazione dei modelli predittivi consente di ottimizzare in tempo reale la gestione delle risorse, permettendo una gestione dinamica e adattativa delle code.

Oggi, la teoria delle code è anche alla base di innovazioni tecnologiche come le reti 5G, dove la gestione dei flussi di dati e la minimizzazione dei ritardi sono cruciali per garantire un servizio di alta qualità agli utenti. Un altro esempio recente è l'uso della teoria delle code nel cloud computing, dove è necessario gestire in modo efficiente la richiesta e l'elaborazione di enormi quantità di dati in tempo reale, riducendo i tempi di latenza e ottimizzando l'uso delle risorse.

Nonostante l'ampia diffusione della teoria delle code, essa presenta ancora delle sfide, legate principalmente alla complessità dei sistemi reali e alla difficoltà di descrivere accuratamente tutti gli aspetti di un sistema con modelli matematici. I modelli più semplici, sebbene utili, spesso non riescono a riflettere la variabilità e l'incertezza che caratterizzano i sistemi reali, che necessitano di approcci più sofisticati per affrontare la dinamicità e le condizioni di carico variabile.

La teoria delle code continua a evolversi, ampliando i suoi confini e offrendo nuove opportunità per ottimizzare i flussi di lavoro e migliorare la gestione delle risorse in numerosi settori. In un mondo in cui la richiesta di servizi è in continua crescita, e le risorse sono sempre più scarse, la teoria delle code si conferma uno strumento indispensabile per garantire efficienza, velocità e qualità dei servizi offerti.<sup>1, 2, 3</sup>

## **1.2 EVOLUZIONE**

La teoria delle code ha avuto una lunga e significativa evoluzione, che ha permesso il suo sviluppo da un modello matematico di base a uno strumento sofisticato, applicato in una vasta gamma di settori. La sua evoluzione è stata accompagnata dalla crescente complessità dei sistemi da analizzare e dai progressi tecnologici che hanno permesso di affrontare situazioni sempre più dinamiche e complesse. L'evoluzione della teoria delle code si può suddividere in diverse fasi, che hanno segnato i cambiamenti fondamentali nell'approccio, nelle metodologie e nelle applicazioni.

### **1.2.1 I primi sviluppi (Anni 1900 - 1930)**

La teoria delle code nasce nei primi anni del Novecento, con i primi lavori di Agner Krarup Erlang, un ingegnere danese che, nel 1909, sviluppò il primo modello matematico delle code per analizzare la gestione delle centrali telefoniche. Erlang si trovava di fronte al problema di determinare quante linee telefoniche fossero necessarie per garantire un servizio continuo ed evitare che le chiamate venissero perse, ma senza esagerare, poiché l'infrastruttura avrebbe comportato costi elevati. La sua formula, oggi conosciuta come Formula di Erlang, si concentra sulla probabilità di occupazione di una centrale telefonica, ovvero la probabilità che tutte le linee siano occupate e una chiamata non possa essere effettuata. Questo modello si basava su due principali assunzioni: che le chiamate arrivassero in modo casuale (poissoniano) e che il tempo di servizio fosse esponenziale.

Anche se semplice, questo modello aveva un grande impatto pratico, permettendo a diverse industrie, non solo telefoniche, di ottimizzare la gestione delle risorse. Il modello di Erlang fu successivamente esteso per trattare sistemi più complessi, come quelli con più server, che permisero di gestire meglio situazioni in cui vi erano più risorse di servizio a disposizione. Questi sviluppi iniziali segnarono la nascita della teoria delle code come

disciplina matematica applicata, con implicazioni in numerosi ambiti tecnologici ed economici.

### **1.2.2 L'espansione e l'approfondimento (Anni 1930 - 1950)**

Nei decenni successivi, la teoria delle code si espanse notevolmente, con l'introduzione di nuovi modelli matematici e l'approfondimento di concetti legati alla gestione delle code in sistemi più complessi. Con l'avvento delle tecnologie di calcolo e la crescente disponibilità di computer, si aprirono nuove possibilità per la simulazione di sistemi di coda complessi e per l'analisi statistica dei flussi. Fu in questo periodo che si svilupparono concetti più avanzati, come la teoria delle code multi-server, che descrive situazioni in cui le risorse di servizio sono distribuite su più canali, e la teoria dei processi stocastici, che integra la casualità nell'arrivo delle richieste e nei tempi di servizio.

Durante questo periodo furono sviluppati modelli come il  $M/M/1$  (un singolo server con arrivi Poisson e tempi di servizio esponenziali), che divenne uno dei modelli più utilizzati. L'introduzione di varianti come il  $M/M/c$  (dove  $c$  rappresenta il numero di server) ampliò l'ambito di applicazione, e l'analisi dei sistemi di coda cominciò a interessare anche settori come l'industria, il trasporto e la logistica.

Un passo importante fu l'introduzione del teorema di Little negli anni '60, che dimostrò una relazione fondamentale tra il numero medio di clienti in una coda, il tempo medio di attesa e il tasso di arrivo. Questo risultato è ancora oggi una pietra miliare nella teoria delle code e permette di ottenere informazioni utili per la gestione di sistemi complessi, senza la necessità di simulazioni dettagliate.

### **1.2.3 L'era della simulazione (Anni 1960 - 1980)**

Con l'avvento dei computer e il miglioramento delle tecniche di simulazione, negli anni '60 e '70, si verificò una vera e propria rivoluzione nella teoria delle code. La simulazione permise di analizzare sistemi che erano troppo complessi per essere trattati con i tradizionali modelli analitici. In questo periodo, si cominciò a studiare sistemi con arrivi non Poissoniani, come ad esempio arrivi a burst (con picchi improvvisi di richieste), e tempi di servizio variabili, che non seguivano distribuzioni esponenziali.

L'uso di programmi di simulazione per analizzare i sistemi di coda ha consentito di esaminare sistemi molto più complessi rispetto a quelli trattati nei modelli teorici di base. Le simulazioni permettevano di rappresentare situazioni realistiche come la variabilità nei tempi di arrivo, i tempi di attesa distribuiti in modo non uniforme e l'interazione tra più sistemi di coda. Grazie a questi progressi, le applicazioni della teoria delle code si estesero a settori come la gestione dei dati nelle reti di telecomunicazioni, la logistica, il trattamento dei flussi di traffico e le operazioni bancarie, per citarne alcuni.

Nel frattempo, si svilupparono anche tecniche di ottimizzazione, come la programmazione lineare e la programmazione dinamica, che aiutavano a determinare la configurazione ideale di un sistema di coda per minimizzare i tempi di attesa o massimizzare l'efficienza operativa. In parallelo, si fece un passo importante verso la generalizzazione della teoria, con l'introduzione di modelli di coda che non si limitavano più alla distribuzione esponenziale, ma includevano distribuzioni più generali come la distribuzione di Weibull o la distribuzione normale.

#### **1.2.4 L'avvento delle tecnologie moderne (Anni 1990 - 2000)**

A partire dagli anni '90, la teoria delle code ha subito una rapida evoluzione, alimentata dai progressi nell'informatica, nelle tecnologie di rete e nella gestione del traffico. La diffusione di internet e la crescente complessità delle reti di comunicazione hanno reso necessario lo sviluppo di modelli di coda in grado di gestire sistemi distribuiti e dinamici, come nel caso delle reti di computer, dei sistemi di cloud computing e delle infrastrutture IT.

In questo periodo, la teoria delle code si è arricchita con nuove applicazioni, tra cui la gestione della latency (latenza) nei sistemi di rete e l'ottimizzazione delle risorse nei data center. L'introduzione di tecniche di analisi predittiva e di simulazione avanzata ha permesso ai ricercatori di simulare e ottimizzare i sistemi di coda in tempo reale, adattando continuamente il numero di server o le politiche di gestione delle risorse in base alle condizioni mutevoli del sistema. Ad esempio, nei data center, la gestione delle code ha permesso di ottimizzare il bilanciamento del carico e la gestione dei picchi di traffico, riducendo i tempi di risposta e migliorando l'efficienza complessiva.

### **1.2.5 Sistemi complessi e approcci moderni (2000 - oggi)**

Con l'incremento della digitalizzazione e l'espansione delle applicazioni intelligenti, la teoria delle code ha acquisito un ruolo sempre più rilevante nell'ottimizzazione dei sistemi complessi. Oggi, la teoria delle code viene applicata a contesti ancora più dinamici, come la gestione del traffico urbano, l'assistenza sanitaria e i sistemi di supporto alle decisioni. Si è passati dai modelli statici a modelli altamente dinamici, che integrano intelligenza artificiale, apprendimento automatico e big data.

I progressi tecnologici hanno portato all'adozione di modelli stocastici avanzati, in grado di simulare in modo più preciso i flussi di richieste in scenari altamente incerti. La simulazione Monte Carlo è diventata uno degli strumenti principali per analizzare sistemi complessi, consentendo di ottenere stime più accurate delle performance dei sistemi di coda sotto vari scenari.

Inoltre, la crescente diffusione di tecnologie come il cloud computing e le reti 5G ha comportato l'introduzione di nuovi concetti nella teoria delle code, come la gestione dei flussi di dati attraverso reti ad alte prestazioni e l'ottimizzazione della distribuzione delle risorse informatiche. Oggi, la teoria delle code non solo analizza i flussi di lavoro ma fornisce anche le basi per lo sviluppo di sistemi adattativi, in cui le risorse vengono allocate in tempo reale, ottimizzando continuamente i parametri.<sup>1, 2, 3</sup>

## **1.3 DESCRIZIONE MATEMATICA**

La teoria delle code si basa su un modello matematico che descrive il comportamento di un sistema in cui le richieste (o "clienti") arrivano per essere servite da una o più risorse limitate (chiamate "server"). Ogni richiesta entra in un sistema di coda e attende il suo turno per essere processata. La caratterizzazione matematica di questi sistemi è

fondamentale per comprendere la loro efficienza e per ottimizzare la gestione delle risorse.

### 1.3.1 I Fondamenti della Teoria delle Code

Per comprendere la teoria delle code, è necessario definire alcuni concetti e parametri di base. In generale, un sistema di coda può essere descritto da un triplo di variabili che rappresentano:

- **Processo di arrivo:** Descrive come i clienti (o richieste) arrivano al sistema. L'arrivo di clienti può essere modellato come un processo stocastico, cioè un processo aleatorio in cui gli eventi (arrivi) si verificano in modo casuale. In particolare, si utilizzano modelli che descrivono l'arrivo di richieste secondo una distribuzione di Poisson, che implica che gli arrivi sono indipendenti e avvengono a una media costante nel tempo.
- **Processo di servizio:** Descrive il tempo che un server impiega per servire un cliente. I tempi di servizio sono solitamente modellati con una distribuzione esponenziale, ma in alcuni casi più complessi, si possono usare altre distribuzioni, come quella di Weibull o normale.
- **Numero di server:** Indica quante risorse sono disponibili per servire i clienti. Un sistema può avere uno o più server, e il numero di server impatta direttamente sulla capacità del sistema di ridurre i tempi di attesa.

In modo più formale, un sistema di coda è rappresentato come una tripla  $(A/B/c)$ , dove:

- $A$  è la distribuzione degli arrivi (ad esempio, Poisson, Bernoulli, ecc.),
- $B$  è la distribuzione dei tempi di servizio (ad esempio, esponenziale, deterministica, ecc.),
- $c$  è il numero di server (che può essere 1 per un sistema di coda singolo o maggiore per i sistemi multi-server).

### 1.3.2 Modelli di Coda Fondamentali

La matematica dietro la teoria delle code è in gran parte fondata su modelli specifici che rappresentano scenari di coda comuni. I più importanti modelli di coda sono quelli M/M/1, M/M/c, M/G/1, e G/G/1, che descrivono diverse configurazioni e ipotesi sui tempi di arrivo e di servizio.

#### Modello M/M/1:

Il modello M/M/1 è il modello di base e il più semplice della teoria delle code. La notazione M/M/1 indica:

- M (Markoviano) per la distribuzione degli arrivi, che segue una distribuzione di Poisson,
- M (Markoviano) per la distribuzione dei tempi di servizio, che segue una distribuzione esponenziale,
- 1 per il numero di server, cioè un solo server.

Nel modello M/M/1, le assunzioni principali sono:

- Gli arrivi sono indipendenti e seguono un processo di Poisson con un tasso di arrivo  $\lambda$  (lambda), che indica il numero medio di arrivi per unità di tempo.
- I tempi di servizio seguono una distribuzione esponenziale con un tasso di servizio  $\mu$  (mu), che rappresenta la velocità con cui il server può completare il servizio per un cliente.
- C'è solo un server disponibile per servire i clienti in attesa.

Le principali grandezze calcolabili in un sistema M/M/1 sono:

- Probabilità di occupazione ( $P_0$ ): la probabilità che il sistema sia vuoto, cioè che non ci siano clienti in attesa o in servizio. È data dalla formula:

$$P_0 = 1 - \mu\lambda$$

- Numero medio di clienti nel sistema ( $L$ ): è il numero medio di clienti sia in coda che in servizio. Viene calcolato come:

$$L = \mu - \lambda$$

- Tempo medio di attesa nel sistema (W): è il tempo medio che un cliente trascorre nel sistema, sia in coda che durante il servizio. È dato da:

$$W = \mu - \lambda$$

- Tempo medio di attesa in coda (Wq): è il tempo medio che un cliente trascorre solo in coda, prima di essere servito. La formula è:

$$Wq = \mu(\mu - \lambda)$$

- Numero medio di clienti in coda (Lq): è il numero medio di clienti che si trovano in attesa di essere serviti. La formula è:

$$Lq = \mu(\mu - \lambda)$$

### **Modello M/M/c:**

Il modello M/M/c è una generalizzazione del modello M/M/1, in cui ci sono c server. In questo caso, le assunzioni sugli arrivi e sui tempi di servizio rimangono le stesse, ma ora i clienti possono essere serviti simultaneamente da più di un server.

Le principali grandezze calcolabili in un sistema M/M/c includono:

- Probabilità che tutti i server siano occupati (Pc), che rappresenta la probabilità che il numero di clienti nel sistema sia maggiore o uguale al numero di server, e quindi che i clienti debbano aspettare in coda.
- Numero medio di clienti nel sistema (L) e Tempo medio di attesa nel sistema (W): queste grandezze possono essere calcolate, ma le formule sono significativamente più complesse rispetto al modello M/M/1. La generalizzazione implica un'analisi più approfondita delle probabilità di occupazione e della gestione delle risorse.

### **Modello M/G/1:**

Il modello M/G/1 è un altro caso significativo, dove gli arrivi seguono ancora una distribuzione Poisson (M), ma i tempi di servizio possono essere descritti da una distribuzione Generale (G), che non è necessariamente esponenziale. Questo modello è molto utile per descrivere sistemi in cui il tempo di servizio può variare significativamente e non segue una distribuzione esponenziale.

La matematica che descrive questo modello è più complessa, e l'analisi si basa sull'uso di teoremi di Little e di funzioni di probabilità generali, che permettono di derivare le grandezze chiave del sistema, come il numero medio di clienti nel sistema, il tempo medio di attesa e altre metriche di performance.

#### **1.3.3 Teorema di Little**

Una delle relazioni più importanti in teoria delle code è il Teorema di Little, che stabilisce una connessione fondamentale tra il numero medio di clienti nel sistema, il tempo medio di attesa e il tasso di arrivo. Il teorema afferma che, per un sistema in stazionario, la relazione tra questi parametri è sempre valida:

$$L = \lambda W$$

dove:

- $L$  è il numero medio di clienti nel sistema,
- $\lambda$  è il tasso di arrivo,
- $W$  è il tempo medio di attesa nel sistema.

Questa semplice formula è straordinariamente potente e viene utilizzata in tutti i modelli di coda per calcolare uno degli aspetti del sistema conoscendo gli altri due.

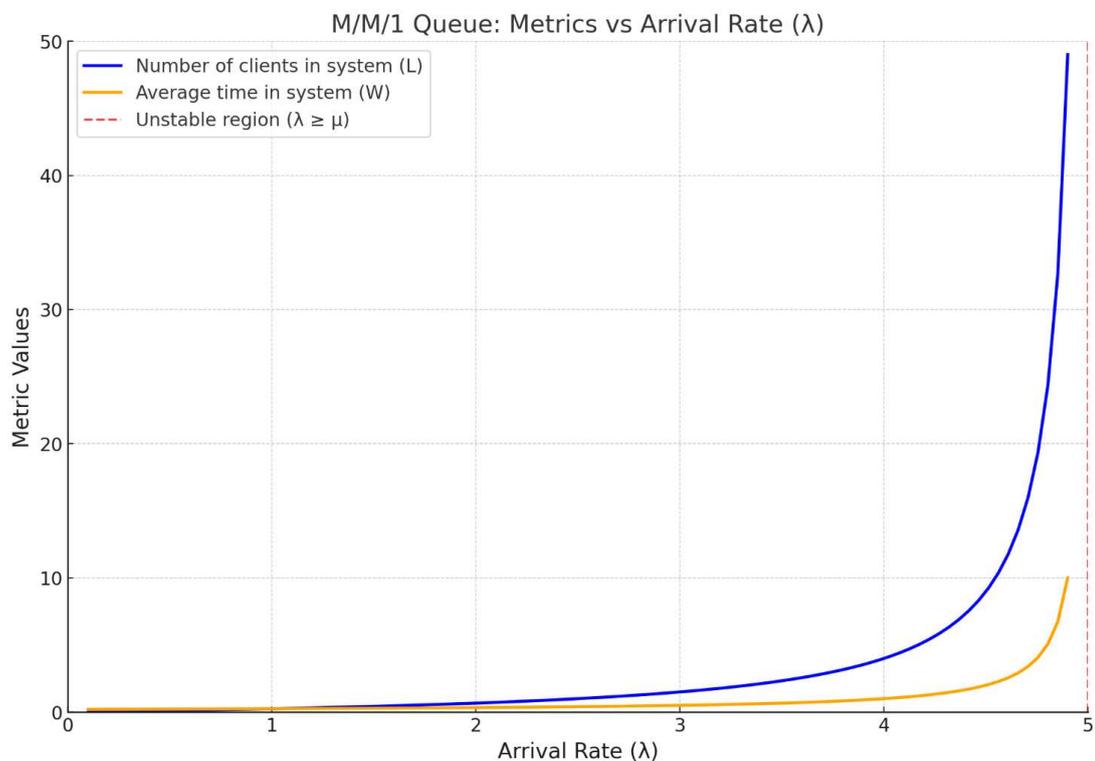
La descrizione matematica della teoria delle code si articola in vari modelli e formule che permettono di affrontare diverse situazioni pratiche, adattando il modello alle specifiche caratteristiche dei sistemi reali. Questi modelli non solo sono utili per l'analisi teorica, ma

trovano anche ampie applicazioni in settori industriali e tecnologici dove l'ottimizzazione del flusso delle risorse è cruciale.

### 1.3.4 Grafico esemplificativo per un sistema M/M/1

Di seguito è rappresentato il comportamento di un sistema M/M/1 tramite un grafico combinato che unisce:

- Curva del numero medio di clienti (L).
- Curva del tempo medio di attesa (W).



Ecco un grafico combinato che rappresenta le principali metriche di un sistema M/M/1:

1. Linea blu: numero medio di clienti nel sistema ( $L$ ).
2. Linea arancione: tempo medio di attesa nel sistema ( $W$ ).
3. Linea rossa tratteggiata: indica il limite di stabilità del sistema ( $\lambda = \mu$ ).

Come si può osservare:

- Quando  $\lambda$  si avvicina a  $\mu$ ,  $L$  e  $W$  crescono rapidamente verso l'infinito.
- Al di sopra di  $\lambda = \mu$ , il sistema diventa instabile e le code aumentano indefinitamente.<sup>1, 4, 5</sup>

## 1.4 UTILIZZI

La teoria delle code trova applicazione in numerosi settori, dalla gestione dei sistemi informatici alla logistica, dai servizi telefonici all'analisi delle reti di comunicazione. La sua versatilità deriva dalla capacità di modellare situazioni in cui è necessario gestire l'afflusso di richieste verso risorse limitate. A tal fine, la teoria fornisce strumenti per analizzare e ottimizzare il flusso di clienti, riducendo i tempi di attesa e migliorando l'efficienza complessiva del sistema. In questa sezione, esploreremo gli ambiti principali in cui la teoria delle code viene applicata, facendo luce sulle sue applicazioni pratiche e sui benefici che apporta.

### 1.4.1 Gestione delle Risorse nei Servizi Clienti

Uno degli ambiti in cui la teoria delle code è ampiamente utilizzata è quello della gestione dei servizi clienti, dove le code rappresentano l'attesa di un cliente per ricevere un servizio. Le aziende devono bilanciare la necessità di servire rapidamente i clienti con la disponibilità limitata di risorse, come personale o infrastrutture.

Un esempio classico di applicazione della teoria delle code è quello dei call center, dove numerosi clienti chiamano per ottenere supporto. Ogni chiamata è un "cliente" che deve essere servito da un operatore, ma il numero di operatori è limitato. Il modello M/M/c (multi-server) viene utilizzato per determinare il numero ottimale di operatori da avere in funzione del tasso di arrivo delle chiamate e della durata media delle conversazioni.

Analizzando la probabilità che ci sia una coda, il numero medio di chiamate in attesa e il tempo medio di attesa, l'azienda può decidere di ottimizzare la gestione delle risorse, riducendo i tempi di attesa per i clienti e migliorando la soddisfazione.

L'applicazione di questi modelli consente anche di determinare la capacità ideale di servizio per evitare lunghe attese o risorse inutilizzate. Inoltre, la teoria delle code permette di simulare scenari differenti e di calcolare i costi associati a un aumento o diminuzione delle risorse, per prendere decisioni strategiche più informate.

#### **1.4.2 Sistemi Informatici e Reti di Comunicazione**

Nel campo delle reti di comunicazione e dei sistemi informatici, la teoria delle code è utilizzata per analizzare e ottimizzare il traffico di dati. I server che gestiscono richieste di dati in un sistema informatico possono essere visti come "server" in un sistema di coda, e le richieste (ad esempio, richieste HTTP, pacchetti di rete, richieste di accesso a database) come "clienti".

Un'applicazione comune della teoria delle code in questo settore è la gestione del traffico nelle reti di telecomunicazione. I modelli di coda possono essere utilizzati per analizzare il flusso di pacchetti di dati attraverso una rete e per prevedere la congestione nelle connessioni di rete. Ad esempio, i router di una rete che devono gestire pacchetti di dati in arrivo da diversi dispositivi possono essere modellati come server in un sistema di coda. La teoria delle code fornisce strumenti per calcolare la probabilità di perdita di pacchetti e il ritardo di trasmissione, ottimizzando così il flusso di dati e migliorando la qualità del servizio per gli utenti finali.

Un altro esempio riguarda la gestione dei sistemi di elaborazione dati, dove le richieste di accesso a database e le operazioni computazionali sono trattate come eventi in coda. Qui, la teoria delle code può essere utilizzata per determinare come distribuire il carico tra più server e ottimizzare il tempo di risposta per l'utente, analizzando la distribuzione delle richieste e la capacità di elaborazione dei server.

### **1.4.3 Produzione Industriale e Logistica**

Nella produzione industriale e nella logistica, la teoria delle code viene utilizzata per ottimizzare le linee di produzione e i sistemi di distribuzione. In un impianto di produzione, ad esempio, le macchine di lavorazione possono essere modellate come server, e le materie prime o i prodotti semi-lavorati come clienti. La teoria delle code permette di calcolare il numero ideale di macchine necessarie per ridurre i tempi di attesa e massimizzare l'efficienza del processo produttivo.

Esempio: Linee di Produzione e Stazioni di Lavoro

Un'applicazione comune in questo contesto è l'analisi delle linee di produzione. In un sistema di produzione, i "clienti" sono i prodotti in lavorazione che passano attraverso varie stazioni di lavoro. La teoria delle code può aiutare a determinare il numero ottimale di stazioni di lavoro o macchinari in funzione del tempo di lavorazione medio e del flusso di prodotti. L'obiettivo è ridurre i tempi di attesa tra una stazione di lavoro e l'altra, evitando congestioni e aumentando l'efficienza dell'intero impianto.

Ù

### **1.4.4 Transito e Sistemi di Trasporto**

La gestione del flusso di persone e beni nel settore del trasporto è un altro ambito importante in cui la teoria delle code trova applicazione. La gestione delle code presso stazioni ferroviarie, aeroporti, fermate degli autobus o anche nei sistemi di traffico urbano può essere modellata utilizzando la teoria delle code. Qui, la "coda" rappresenta il numero di persone in attesa di salire su un mezzo di trasporto, mentre i "server" sono i veicoli che li trasportano.

Un caso emblematico è la gestione delle code nei controlli di sicurezza in aeroporto. Le persone devono passare attraverso i controlli di sicurezza prima di accedere alla zona di imbarco, e la velocità di elaborazione di ciascun passeggero dipende dal numero di addetti alla sicurezza e dalla loro efficienza. Utilizzando la teoria delle code, è possibile prevedere i tempi di attesa in base ai flussi di passeggeri e al numero di operatori disponibili. I modelli di coda aiutano a determinare se è necessario aggiungere risorse o

cambiare la disposizione dei punti di controllo per ottimizzare i flussi di persone e ridurre i tempi di attesa.

#### **1.4.5 Sanità**

Nel settore sanitario, la teoria delle code è utilizzata per ottimizzare la gestione delle risorse ospedaliere, come letti, medici e infermieri. Le sale di pronto soccorso e le cliniche sono esempi di sistemi che beneficiano direttamente delle analisi basate sulla teoria delle code. La gestione dei pazienti in attesa di visita o trattamento può essere ottimizzata mediante modelli di coda che determinano il numero ideale di medici e infermieri, riducendo i tempi di attesa e migliorando la qualità delle cure.

Un esempio pratico di utilizzo della teoria delle code nel settore sanitario è l'ottimizzazione dei flussi di pazienti nei reparti di pronto soccorso. I pazienti che arrivano al pronto soccorso possono essere trattati in base alla gravità del loro stato, e la teoria delle code consente di modellare l'attesa di un paziente per essere visitato, analizzando la distribuzione dei tempi di attesa in base alla disponibilità di medici. In questo modo, è possibile prevedere la saturazione del servizio e allocare le risorse necessarie in modo ottimale.

#### **1.4.6 Sistemi di Servizio Pubblico e Amministrazione**

Un altro campo dove la teoria delle code è ampiamente applicata riguarda i sistemi di servizio pubblico. Le amministrazioni locali e nazionali utilizzano modelli di coda per gestire le code presso gli sportelli pubblici, per esempio nei registri automobilistici, nelle agenzie fiscali o negli uffici postali. La teoria delle code può aiutare a determinare la giusta quantità di personale da assegnare per ridurre al minimo i tempi di attesa senza causare inutili sovraccarichi di risorse.

#### **1.4.7 Conclusioni sugli utilizzi della teoria delle code**

La teoria delle code è un potente strumento di analisi che si applica a una vasta gamma di settori. Le sue capacità di modellare il comportamento dei sistemi in cui le risorse sono limitate e le richieste arrivano in modo casuale permettono di ottimizzare processi complessi, ridurre i tempi di attesa, migliorare l'efficienza e abbattere i costi operativi.

L'adozione di modelli di coda per analizzare e ottimizzare il flusso di risorse e richieste si rivela, quindi, cruciale per ottenere il massimo risultato da sistemi altamente dinamici e in continua evoluzione.<sup>1, 2, 3</sup>

## **1.5 OBIETTIVI**

La teoria delle code è un ambito disciplinare che si propone di analizzare, descrivere e ottimizzare i flussi di entità (clienti, richieste, pacchetti di dati, ecc.) attraverso sistemi in cui le risorse (server, server virtuali, postazioni di lavoro, ecc.) sono limitate e le richieste si accumulano in attesa di essere soddisfatte. Gli obiettivi principali della teoria delle code sono di migliorare l'efficienza operativa, ridurre i tempi di attesa, ottimizzare l'utilizzo delle risorse e, di conseguenza, migliorare la qualità complessiva del servizio. Questi obiettivi non solo portano a vantaggi economici, ma anche a benefici sociali e organizzativi, aumentando la soddisfazione degli utenti e riducendo i costi associati a inefficienze nel sistema. In questa sezione, esploreremo in dettaglio gli obiettivi principali della teoria delle code, mostrando come ciascuno di essi contribuisca a risolvere problematiche pratiche e teoriche in vari settori.

### **1.5.1 Ottimizzazione dei Tempi di Attesa**

Uno degli obiettivi primari della teoria delle code è minimizzare i tempi di attesa per le entità in coda. In ogni tipo di sistema che prevede l'attesa per un servizio, un elemento fondamentale è il tempo che le entità trascorrono in coda prima di essere servite. Tempi di attesa elevati non solo sono fonte di frustrazione per gli utenti, ma portano anche a inefficienze nei sistemi. Ridurre i tempi di attesa è cruciale, soprattutto quando il numero di richieste o di clienti aumenta esponenzialmente. L'applicazione della teoria delle code aiuta a trovare il giusto equilibrio tra il numero di risorse disponibili (ad esempio, operatori, macchinari, server) e il flusso di richieste in arrivo.

Esempio:

Nel caso di una cassa in un supermercato, se il numero di clienti supera il numero di casse disponibili, si formano lunghe code. La teoria delle code consente di determinare il numero di casse necessarie per ridurre i tempi di attesa, prendendo in considerazione

variabili come il tasso di arrivo dei clienti, la durata media delle transazioni e la variabilità di questi tempi. Un approccio matematico rigoroso consente di ottimizzare i tempi di servizio senza compromettere la qualità dell'esperienza cliente.

### **1.5.2 Efficienza nell'Uso delle Risorse**

Un altro obiettivo fondamentale è quello di ottimizzare l'uso delle risorse. La teoria delle code fornisce gli strumenti per capire come distribuire al meglio le risorse disponibili, sia che si tratti di operatori, server o macchinari. Una cattiva distribuzione o un uso inefficace delle risorse porta a costi elevati e a un servizio scadente. La teoria consente di calcolare quante risorse sono necessarie in ogni momento per gestire il flusso di richieste, evitando sovraccarichi o sottoutilizzo delle risorse stesse.

Esempio:

Nel caso di una rete di call center, la teoria delle code permette di determinare il numero di operatori da avere in funzione del tasso di chiamate in entrata e dei tempi di conversazione. Un numero troppo alto di operatori porta a costi operativi elevati, mentre un numero insufficiente di operatori porta a lunghe code e frustrazione del cliente. Un uso ottimale delle risorse consente alle aziende di bilanciare questi aspetti, riducendo i costi senza compromettere la qualità del servizio.

### **1.5.3 Miglioramento della Qualità del Servizio**

Un altro obiettivo della teoria delle code è il miglioramento della qualità del servizio. Il servizio è il risultato finale di un sistema di code che può essere misurato in vari modi: la velocità di risposta, il tempo di attesa, la probabilità che un cliente debba ritornare per un servizio aggiuntivo. La qualità del servizio è una delle metriche più importanti per le aziende, poiché influisce direttamente sulla soddisfazione del cliente e sulla loro fidelizzazione. La teoria delle code fornisce metodologie per garantire che i sistemi siano progettati in modo tale che la qualità del servizio non venga sacrificata per ridurre i costi o ottimizzare altre metriche.

Esempio:

Nei pronto soccorso ospedalieri, dove le risorse (ad esempio, letti, medici e infermieri) sono limitate, la teoria delle code può essere utilizzata per analizzare e ottimizzare il

flusso di pazienti. L'obiettivo non è solo ridurre i tempi di attesa, ma anche garantire che i pazienti più gravi vengano trattati con la massima priorità, migliorando così la qualità del servizio fornito. In questi casi, la teoria delle code aiuta a progettare sistemi in grado di rispondere in modo tempestivo ed efficace a una varietà di situazioni critiche.

#### **1.5.4 Riduzione dei Costi Operativi**

La riduzione dei costi operativi è un obiettivo strettamente legato all'ottimizzazione delle risorse. Utilizzare troppo personale, troppi macchinari o altre risorse può essere costoso, mentre un uso inefficiente di tali risorse porta a inefficienze economiche. La teoria delle code consente alle organizzazioni di identificare il punto in cui le risorse sono ottimizzate, riducendo al minimo i costi senza sacrificare la qualità del servizio.

Esempio:

Nella gestione dei servizi telefonici (ad esempio, nei call center), è possibile determinare quante linee telefoniche devono essere attive in un dato momento per rispondere al flusso di chiamate, evitando di mantenere linee non utilizzate durante i periodi di bassa attività. Inoltre, una gestione ottimizzata riduce la necessità di risorse aggiuntive, come il personale in esubero, portando a un abbattimento dei costi operativi.

#### **1.5.5 Previsione e Pianificazione delle Domande**

La teoria delle code non solo si occupa della gestione delle code in tempo reale, ma anche della previsione e pianificazione futura delle domande. Comprendere in anticipo quando e come le richieste di servizio aumenteranno o diminuiranno permette alle organizzazioni di adattarsi in modo proattivo, preparando il sistema in anticipo per gestire i picchi di domanda. Una previsione accurata delle code aiuta a evitare il sovraccarico delle risorse, distribuendo meglio il carico di lavoro.

Esempio:

Un'applicazione comune di questo obiettivo è la previsione della domanda in un supermercato. L'analisi della teoria delle code consente di prevedere i periodi di alta affluenza (ad esempio, durante le festività) e pianificare il numero di casse e dipendenti necessari per soddisfare la domanda in modo ottimale. Una pianificazione anticipata

consente di evitare il disservizio e di garantire una risposta adeguata alle fluttuazioni della domanda.

### **1.5.6 Sostenibilità e Impatti Ambientali**

In un contesto più recente, uno degli obiettivi emergenti della teoria delle code è il suo impiego nell'ottimizzazione sostenibile. Ad esempio, l'ottimizzazione dei flussi di traffico o la gestione delle risorse nei centri di elaborazione dati ha anche un impatto sull'ambiente, riducendo l'impronta ecologica. Un uso efficiente delle risorse non solo abbassa i costi economici, ma contribuisce anche a ridurre il consumo energetico e altre risorse naturali.

Esempio:

Nel contesto delle reti di telecomunicazione, l'uso della teoria delle code per gestire il flusso di dati tra i server può contribuire a ridurre il consumo energetico, evitando il sovraccarico dei server e migliorando l'efficienza operativa. Inoltre, nei sistemi di gestione del traffico urbano, l'ottimizzazione delle code ai semafori e nei punti di congestione può portare a una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, migliorando la qualità dell'aria nelle aree urbane.

### **1.5.7 Conclusioni sugli Obiettivi della Teoria delle Code**

Gli obiettivi della teoria delle code sono vari e si intrecciano con quelli delle organizzazioni e dei settori che la utilizzano. Dalla riduzione dei tempi di attesa all'ottimizzazione delle risorse, dalla miglior qualità del servizio alla riduzione dei costi, la teoria delle code rappresenta un approccio fondamentale per garantire l'efficienza in sistemi complessi. Sia nei settori tradizionali, come la produzione e il trasporto, sia nelle nuove tecnologie, come le reti di comunicazione e l'elaborazione dei dati, la teoria delle code fornisce soluzioni che vanno oltre la semplice gestione delle attese, mirando a un miglioramento complessivo delle performance economiche, sociali e ambientali.<sup>1,3</sup>

## 1.6 SFIDE E LIMITI

Nonostante i numerosi vantaggi che la teoria delle code offre nell'ottimizzazione dei sistemi complessi, essa presenta anche diverse sfide e limiti che possono influire sulla sua applicabilità e sull'efficacia delle soluzioni proposte. In questa sezione esploreremo i principali ostacoli teorici e pratici che emergono quando si cerca di applicare la teoria delle code a scenari reali. Questi limiti sono legati a fattori come la complessità dei modelli matematici, le ipotesi semplificative, la variabilità dei dati e la difficoltà di ottenere dati accurati. Sebbene la teoria delle code possa fornire risultati ottimali in contesti ideali, spesso si trova a dover affrontare situazioni in cui le assunzioni teoriche non sono perfettamente rappresentative della realtà.

### 1.6.1 Complessità dei Modelli Matematici

Uno dei principali limiti della teoria delle code è rappresentato dalla complessità matematica dei modelli, che può crescere rapidamente quando i sistemi da analizzare diventano più complessi. I modelli matematici utilizzati per descrivere il comportamento delle code, come il modello di  $M/M/1$ ,  $M/M/c$  o altri modelli estesi, assumono una serie di condizioni semplificative, come la distribuzione esponenziale dei tempi di arrivo e di servizio. Tuttavia, questi modelli si rivelano insufficienti o imprecisi quando si cercano di applicare a scenari reali con comportamenti più complessi e variabili.

I modelli analitici per sistemi multi-server, ad esempio, diventano rapidamente complicati, e i calcoli per determinare la probabilità di attesa o l'efficienza del sistema diventano molto difficili. Sebbene siano stati sviluppati numerosi approcci per risolvere queste difficoltà, come le simulazioni al computer, questi metodi richiedono tempo, risorse computazionali e competenze avanzate in matematica applicata, facendo sì che l'implementazione pratica diventi impegnativa per le organizzazioni che non possiedono queste risorse.

#### Esempio

Consideriamo un sistema di code in una rete di server dove i pacchetti di dati arrivano in modo casuale e devono essere processati da più server con differenti velocità di elaborazione. In questo caso, il modello  $M/M/c$  non riesce a descrivere accuratamente la

situazione, perché non considera la possibilità che alcuni server siano più lenti di altri, né tiene conto delle interazioni tra i diversi server. La modellizzazione di tale sistema richiederebbe l'uso di modelli di code più complessi, con distribuzioni non esponenziali, che richiedono un significativo sforzo matematico e computazionale.

### **1.6.2 Assunzioni Idealizzate e Realismo Limitato**

Molti dei modelli della teoria delle code si basano su assunzioni idealizzate che non riflettono le caratteristiche dei sistemi reali. Per esempio, i modelli di code più semplici, come l'M/M/1, assumono che i tempi di arrivo e di servizio siano distribuiti secondo leggi esponenziali, che non sempre si verificano nella realtà. In contesti reali, i tempi di arrivo possono seguire distribuzioni molto più complesse (come distribuzioni di Poisson o di Pareto), che non sono facilmente modellabili tramite i classici modelli di code.

Inoltre, nella teoria classica delle code, si assume spesso che le risorse siano omogenee e che tutte le entità che si mettono in coda ricevano lo stesso trattamento. Tuttavia, nei sistemi reali, le risorse potrebbero essere eterogenee e le entità in attesa di servizio potrebbero avere priorità differenti, introducendo una variabilità che non può essere facilmente catturata dai modelli più semplici. Questa mancanza di realismo può limitare l'efficacia delle soluzioni fornite dalla teoria delle code, che spesso rischiano di non rispecchiare fedelmente i comportamenti osservati nei sistemi pratici.

Esempio:

Nel contesto di un ospedale, la teoria delle code tradizionale potrebbe suggerire l'uso di una coda unica per tutti i pazienti che necessitano di una visita medica. Tuttavia, in un ospedale vero, i pazienti hanno esigenze molto diverse (ad esempio, emergenze vs. visite programmate), e la loro priorità di trattamento varia. In questo caso, un modello di code tradizionale potrebbe non risultare efficace, richiedendo un approccio più avanzato come le code con priorità o l'uso di modelli multi-coda.

### **1.6.3 Variabilità dei Dati e Incertezza**

Un altro importante limite riguarda la variabilità dei dati. La teoria delle code tradizionale si basa spesso su assunzioni di distribuzioni statistiche stabili e ben definite, ma nei sistemi reali i tassi di arrivo e di servizio possono essere estremamente variabili.

L'incertezza sui tempi di arrivo e di servizio, o la variabilità dei comportamenti degli utenti, può rendere i modelli di code difficili da applicare in modo preciso.

Inoltre, nelle applicazioni pratiche, i dati sui tempi di servizio e sui tassi di arrivo non sono sempre facilmente accessibili, e possono variare nel tempo. Ad esempio, i modelli di code utilizzati nelle catene di montaggio o nelle linee di produzione devono considerare le fluttuazioni nella disponibilità delle materie prime o nel comportamento degli operai, che possono alterare in modo significativo i risultati.

Esempio:

In un call center, i tempi di risposta alle chiamate possono variare non solo in base al volume di chiamate ricevute, ma anche a fattori esterni come le condizioni meteorologiche, eventi imprevisti o cambiamenti nella qualità del servizio. La teoria delle code classica potrebbe non riuscire a prevedere con precisione questi cambiamenti, e potrebbe essere necessario un approccio più flessibile che integri modelli predittivi basati sull'analisi dei dati storici e l'intelligenza artificiale.

#### **1.6.4 Comportamenti Non-Lineari e Interazioni Complesse**

La teoria delle code si trova a dover affrontare anche la difficoltà di modellare comportamenti non-lineari o interazioni complesse tra variabili. In molti casi, il comportamento del sistema non segue una relazione lineare o semplice tra le risorse, i tempi di servizio e i tempi di attesa. La presenza di interazioni tra le variabili può portare a risultati non intuitivi che i modelli tradizionali non sono in grado di catturare.

Esempio:

Nel caso di un sistema di trasporto pubblico, l'afflusso di passeggeri in determinati orari può essere influenzato da variabili esterne (come eventi pubblici, meteo, trasporti alternativi disponibili), e non sempre può essere previsto solo tramite i modelli di code classici. Le dinamiche di un sistema così complesso richiedono un approccio che tenga conto delle interazioni dinamiche tra le risorse disponibili (autobus, stazioni, ecc.), le caratteristiche dei passeggeri e i fattori esterni.

### **1.6.5 L'Applicazione a Sistemi Multidimensionali e Complessi**

Alcuni degli utilizzi più avanzati della teoria delle code, come l'analisi di reti di code o la modellizzazione di sistemi multidimensionali (dove ci sono più tipi di risorse e di richieste), pongono altre difficoltà. Nei sistemi complessi, dove sono coinvolte numerose variabili e dove l'interazione tra queste è elevata, i modelli di code tradizionali potrebbero non essere in grado di fornire soluzioni ottimali, richiedendo l'uso di tecniche computazionali avanzate come la simulazione Monte Carlo o l'analisi delle reti di Markov.

Esempio:

Un esempio di sistema multidimensionale è dato dalle reti di telecomunicazioni, dove i pacchetti di dati sono instradati su molteplici router e link. La distribuzione del traffico tra le diverse risorse e la gestione delle congestioni richiedono l'uso di tecniche avanzate di modellazione delle code che possano tener conto di variabili multiple e interagenti in tempo reale.

### **1.6.6 Conclusioni sulle Sfide e Limiti**

In conclusione, la teoria delle code, pur essendo un potente strumento analitico e operativo, presenta numerosi limiti e sfide che possono ridurre l'applicabilità in contesti pratici. La complessità dei modelli, le assunzioni idealizzate, la variabilità dei dati e le difficoltà nel trattare interazioni complesse sono tutte problematiche che richiedono un attento adattamento dei modelli di teoria delle code. Nonostante questi limiti, la continua evoluzione della teoria delle code, l'avvento di metodi computazionali avanzati e l'integrazione con altre discipline (come l'intelligenza artificiale, l'analisi predittiva e l'ottimizzazione) stanno permettendo di affrontare queste sfide, migliorando la capacità di applicare con successo la teoria delle code.<sup>6,9,11</sup>

## **1.7 APPLICAZIONI FUTURE**

La teoria delle code, pur essendo nata come una disciplina matematica applicata a contesti relativamente semplici, ha visto un'evoluzione significativa nel corso degli anni. Con il progresso tecnologico, l'analisi dei dati e l'intelligenza artificiale, le applicazioni future della teoria delle code promettono di espandere notevolmente il suo raggio di azione, abbracciando nuovi settori e affrontando sfide sempre più complesse. Questa sezione esplorerà alcune delle principali applicazioni future della teoria delle code, prendendo in considerazione le tendenze emergenti in vari settori e le potenzialità offerte dall'integrazione della teoria delle code con altre tecnologie avanzate.

### **1.7.1 Integrazione con Intelligenza Artificiale e Machine Learning**

Una delle applicazioni future più promettenti della teoria delle code riguarda l'integrazione con intelligenza artificiale (IA) e machine learning (ML). L'uso dell'intelligenza artificiale consente di affrontare alcune delle limitazioni più gravi dei modelli classici, come la difficoltà di modellare sistemi complessi con incertezze, variabilità e interazioni non-lineari. I modelli di IA, infatti, sono in grado di analizzare enormi quantità di dati, identificare schemi ricorrenti e prevedere comportamenti futuri, consentendo una gestione delle code più dinamica ed efficiente.

L'integrazione di algoritmi di machine learning potrebbe permettere di ottimizzare in tempo reale il funzionamento di un sistema di code, adattando dinamicamente i parametri come il numero di server, la gestione delle priorità, o l'approccio alle risorse disponibili, sulla base delle condizioni correnti. In sostanza, la combinazione della teoria delle code con l'IA permetterebbe di affrontare non solo la gestione delle code, ma anche l'analisi predittiva, ottimizzando le risorse in modo più efficace.

Esempio:

Nel caso di un call center intelligente, l'adozione di algoritmi di machine learning potrebbe prevedere i periodi di picco di chiamate e allocare automaticamente un numero maggiore di operatori o modificare la priorità dei clienti in base alla gravità della loro

richiesta. Inoltre, l'IA potrebbe suggerire soluzioni prima che i clienti arrivino in attesa, riducendo i tempi di attesa complessivi e migliorando l'efficienza del servizio.

### **1.7.2 Automazione e Industria 4.0**

L'Industria 4.0, che prevede l'adozione di tecnologie avanzate come i robot autonomi, i sistemi di produzione interconnessi, e l'Internet delle Cose (IoT), sta creando nuove sfide e opportunità per l'applicazione della teoria delle code. Nei moderni ambienti di produzione, dove la domanda di beni è in costante cambiamento e dove si utilizzano risorse automatizzate, la gestione delle code diventa ancora più critica per garantire che i processi produttivi siano fluidi e che i tempi di attesa per la produzione o la consegna siano ridotti al minimo.

Le tecnologie IoT permettono una tracciabilità in tempo reale delle risorse e dei processi, mentre i robot autonomi e le linee di produzione automatizzate richiedono una gestione ottimizzata delle risorse per evitare sovraccarichi o inaccettabili ritardi. L'applicazione della teoria delle code nell'ambito dell'industria 4.0 richiede la creazione di modelli complessi che considerino il flusso dei dati in tempo reale, la gestione automatica delle risorse e la previsione dei colli di bottiglia in vari punti della catena produttiva.

Esempio:

In un impianto di produzione automatizzato, la gestione delle linee di assemblaggio potrebbe utilizzare un sistema basato sulla teoria delle code per ottimizzare la distribuzione dei compiti tra diversi robot e macchine, considerando variabili come la disponibilità delle risorse, le priorità di produzione, e la velocità di lavorazione. Un approccio predittivo, alimentato da dati in tempo reale, potrebbe ridurre notevolmente i tempi di attesa e migliorare l'efficienza dell'intero sistema produttivo.

### **1.7.3 Telecomunicazioni e Reti 5G**

Un'altra applicazione futura significativa della teoria delle code è nel campo delle telecomunicazioni, in particolare con l'introduzione delle reti 5G. Le reti 5G promettono di rivoluzionare il settore delle telecomunicazioni, offrendo velocità di trasmissione dati molto più elevate, una latenza ridotta e una capacità aumentata per supportare un numero maggiore di dispositivi connessi. La gestione delle code nelle reti 5G diventa cruciale per

evitare congestioni e garantire una distribuzione equa delle risorse tra milioni di utenti e dispositivi connessi simultaneamente.

In questo contesto, la teoria delle code potrebbe essere utilizzata per ottimizzare l'allocazione della larghezza di banda, gestire i picchi di traffico e ridurre i tempi di attesa per la trasmissione dei dati. L'integrazione di algoritmi di gestione delle code con tecnologie avanzate come la tecnologia a commutazione a pacchetto e le architetture di rete ad alta capacità può migliorare ulteriormente l'efficienza della rete e ridurre i costi operativi.

Esempio:

Nel caso di una città intelligente con un'ampia rete di dispositivi IoT (sensori di traffico, telecamere di sicurezza, veicoli autonomi), la gestione delle comunicazioni tra questi dispositivi potrebbe richiedere l'uso di modelli di code avanzati. L'applicazione della teoria delle code nel 5G potrebbe ottimizzare la gestione delle risorse di rete, assegnando dinamicamente la capacità di banda in base alla priorità delle comunicazioni (per esempio, garantendo una maggiore priorità per i segnali di emergenza).

#### **1.7.4 Trasporti e Mobilità Urbana**

Nel settore della mobilità urbana, l'adozione di soluzioni basate sulla teoria delle code potrebbe aiutare a risolvere problemi legati al traffico e ai tempi di attesa nei trasporti pubblici. Con l'aumento della popolazione urbana e l'evoluzione della mobilità condivisa, i sistemi di trasporto devono affrontare sfide legate all'affollamento, alla pianificazione delle risorse e alla gestione ottimale dei flussi di passeggeri.

In futuro, le città intelligenti potrebbero utilizzare la teoria delle code per ottimizzare i flussi di traffico, migliorare l'efficienza delle fermate dei mezzi pubblici e ridurre i tempi di attesa. Ad esempio, i sistemi di trasporto su richiesta (come quelli basati su veicoli autonomi o taxi condivisi) potrebbero beneficiare della teoria delle code per ottimizzare l'allocazione delle risorse in tempo reale, prendendo in considerazione fattori come la posizione degli utenti, la domanda di trasporto e la disponibilità dei veicoli.

Esempio:

In una metropolitana di una grande città, l'utilizzo della teoria delle code potrebbe

ottimizzare l'afflusso di passeggeri nelle ore di punta, prevedendo la domanda e distribuendo i passeggeri sui treni in modo più equilibrato, riducendo il rischio di sovraffollamento nelle stazioni e migliorando l'esperienza complessiva dei passeggeri.

### **1.7.5 Sanità e Gestione delle Emergenze**

Nel settore sanitario, l'applicazione futura della teoria delle code potrebbe avere un impatto significativo, specialmente nella gestione delle emergenze mediche e delle attività ospedaliere quotidiane. La crescente domanda di servizi sanitari e la limitazione delle risorse, in particolare in situazioni di emergenza, rende la gestione delle code un aspetto cruciale per garantire che i pazienti ricevano un trattamento tempestivo ed efficiente.

In futuro, l'uso della teoria delle code, combinata con i big data e le tecnologie predittive, potrebbe aiutare gli ospedali a prevedere i picchi di affluenza e a ottimizzare l'allocazione delle risorse mediche (medici, infermieri, letti, attrezzature), riducendo i tempi di attesa e migliorando i risultati clinici. Le tecniche di ottimizzazione avanzata potrebbero essere integrate anche nei processi di triage per gestire i pazienti in modo più efficace in situazioni di massima urgenza.

Esempio:

Durante una pandemia o un incidente di massa, l'adozione della teoria delle code potrebbe aiutare a distribuire i pazienti nelle strutture ospedaliere in modo efficiente, utilizzando modelli predittivi per anticipare i flussi di pazienti e allocare risorse in tempo reale, riducendo i colli di bottiglia nelle aree di pronto soccorso.<sup>7, 10, 12</sup>

## **1.8 IMPATTO ECONOMICO E SOCIALE**

La teoria delle code non è solo uno strumento matematico ed ingegneristico, ma ha anche un impatto significativo sull'economia e sulla società. La sua applicazione consente di ottimizzare l'uso delle risorse, ridurre i costi e migliorare l'efficienza dei sistemi, portando a effetti positivi sia a livello microeconomico che macroeconomico. La capacità di migliorare la gestione delle risorse e il flusso di beni e servizi attraverso la teoria delle

code si riflette in numerosi settori, come i trasporti, la sanità, il commercio, le telecomunicazioni e l'industria. In questo contesto, la teoria delle code può avere un impatto economico profondo, contribuendo alla crescita, alla competitività e alla sostenibilità delle aziende e delle economie nel loro complesso. Tuttavia, gli effetti sociali sono altrettanto rilevanti, poiché l'efficienza ottenuta attraverso l'ottimizzazione delle code può influenzare la qualità della vita delle persone, ridurre le disuguaglianze e migliorare l'accesso ai servizi essenziali.

### **1.8.1 Impatto Economico: Efficienza Operativa e Riduzione dei Costi**

Uno degli impatti principali della teoria delle code è la sua capacità di migliorare l'efficienza operativa. Applicando modelli di code alle operazioni aziendali, è possibile ridurre i tempi di attesa, ottimizzare l'uso delle risorse e ridurre gli sprechi. Questo si traduce in riduzione dei costi operativi e miglioramento della produttività. I modelli di code sono utilizzati in una vasta gamma di settori industriali, come la manifattura, il commercio al dettaglio, e le reti di distribuzione, per ottimizzare i flussi di produzione e minimizzare i tempi di inattività. L'ottimizzazione dei sistemi di code consente anche una migliore gestione dei flussi di cassa e una riduzione dei costi legati alla gestione delle risorse umane.

Nel settore dei trasporti, ad esempio, l'analisi delle code può portare a una distribuzione più equilibrata delle risorse (come il numero di autobus, treni, o aerei disponibili), riducendo la necessità di risorse aggiuntive durante i periodi di picco e minimizzando l'impatto dei colli di bottiglia, migliorando così l'efficienza complessiva del sistema di trasporto. Ciò si traduce in risparmi economici per le aziende di trasporto, che possono ottimizzare la capacità di veicoli e infrastrutture in modo più preciso, e ridurre i costi associati alla congestione e alle inefficienze operative.

Esempio:

Nel contesto della logistica e della gestione dei magazzini, l'uso della teoria delle code permette di migliorare la gestione delle operazioni di carico e scarico. Ottimizzare il

flusso delle merci e minimizzare i tempi di attesa dei camion per il carico/scarico consente alle aziende di ridurre i costi operativi, velocizzare la distribuzione e incrementare i margini di profitto, specialmente per le grandi catene di distribuzione e i centri logistici.

### **1.8.2 Impatto Sociale: Miglioramento dei Servizi e della Qualità della Vita**

Oltre all'impatto economico, la teoria delle code ha anche un impatto sociale significativo, in particolare nel miglioramento dei servizi pubblici e delle infrastrutture. Un aspetto fondamentale della teoria delle code è il suo impatto nel migliorare l'accesso ai servizi essenziali per la popolazione, come i trasporti pubblici, la sanità, l'istruzione, e i servizi di emergenza. La riduzione dei tempi di attesa, l'ottimizzazione delle risorse e l'aumento dell'efficienza operativa contribuiscono ad una maggiore soddisfazione degli utenti, migliorando la qualità della vita delle persone.

Nel settore sanitario, ad esempio, l'applicazione della teoria delle code permette di ridurre i tempi di attesa per i pazienti, ottimizzando le risorse disponibili come medici, infermieri, sale operatorie e attrezzature. Ciò non solo migliora la qualità delle cure, ma riduce l'inefficienza e i costi legati a lunghe attese per le visite mediche o gli interventi chirurgici, contribuendo a garantire un servizio sanitario più equo e accessibile per tutti i cittadini, indipendentemente dalla loro condizione economica o geografica.

Esempio:

Durante le ore di punta nei pronto soccorso, l'applicazione della teoria delle code può ottimizzare l'allocazione delle risorse mediche, migliorando il flusso dei pazienti e riducendo i tempi di attesa. La capacità di rispondere rapidamente e in modo ottimale alle emergenze non solo migliora l'efficienza del sistema sanitario, ma ha anche un impatto diretto sulla salute pubblica, riducendo i rischi associati a ritardi nel trattamento.

### **1.8.3 Sostenibilità Ambientale e Riduzione dell'Impatto Ecologico**

L'impatto sociale della teoria delle code non si limita solo alla qualità dei servizi, ma si estende anche alla sostenibilità ambientale. Ottimizzare i flussi attraverso sistemi di code ben progettati consente di ridurre il consumo energetico e le emissioni di gas serra, specialmente in settori come il trasporto, la logistica, e la produzione industriale. Ad esempio, una gestione più efficiente delle risorse nei sistemi di trasporto pubblico e nelle

linee di produzione può ridurre la congestione del traffico e l'uso inefficiente di energia, abbattendo così l'impatto ambientale.

Nel caso del trasporto pubblico, l'applicazione della teoria delle code può portare a una migliore pianificazione dei percorsi e una gestione ottimizzata delle frequenze dei veicoli. Questo non solo riduce i tempi di attesa per i passeggeri, ma limita anche il numero di veicoli inutilizzati in circolazione, contribuendo a diminuire le emissioni inquinanti e migliorando l'efficienza complessiva del sistema di trasporto.

Esempio:

Nel caso dei veicoli autonomi, l'ottimizzazione delle code attraverso l'analisi predittiva dei flussi di traffico può contribuire a ridurre il traffico urbano, diminuendo le emissioni di CO<sub>2</sub> e migliorando la qualità dell'aria. Inoltre, la riduzione del consumo energetico legato a una gestione più intelligente delle risorse è cruciale per la sostenibilità dei sistemi di trasporto.

#### **1.8.4 Riduzione delle Disuguaglianze Sociali**

Un altro aspetto importante dell'impatto sociale della teoria delle code riguarda il suo potenziale nel ridurre le disuguaglianze sociali. Una gestione ottimizzata delle code e delle risorse può garantire che tutti i membri della società abbiano pari opportunità di accesso a beni e servizi, indipendentemente dalla loro condizione socio-economica. Ad esempio, nell'ambito della sanità, l'applicazione della teoria delle code può portare a una distribuzione più equa delle risorse e a un miglioramento dell'accesso ai servizi sanitari per le persone in situazioni di vulnerabilità, come gli anziani o i meno abbienti.

Inoltre, una maggiore efficienza nei servizi pubblici e nei trasporti può contribuire a migliorare l'accessibilità dei servizi per le persone che vivono in aree più remote o svantaggiate. L'adozione della teoria delle code in questi contesti potrebbe ridurre la discriminazione legata a colli di bottiglia nei servizi essenziali, come i trasporti, il che favorisce una mobilità sociale più fluida e inclusiva.

Esempio:

Nel caso delle scuole o dei servizi pubblici destinati a persone con disabilità, la gestione

delle code può ottimizzare l'accesso alle risorse, permettendo a tutti i cittadini di fruire in modo equo e senza attese eccessive delle opportunità educative o dei servizi di supporto.

### **1.8.5 Conclusioni sull'Impatto Economico e Sociale**

In conclusione, la teoria delle code ha un impatto significativo sia a livello economico che sociale. L'ottimizzazione delle risorse attraverso modelli avanzati di gestione delle code può ridurre i costi operativi delle aziende, migliorare la produttività, e aumentare l'efficienza dei sistemi. Parallelamente, a livello sociale, la teoria delle code contribuisce a migliorare l'accesso ai servizi essenziali, ridurre i tempi di attesa, abbattere le disuguaglianze sociali e promuovere la sostenibilità ambientale. In questo modo, la teoria delle code non solo crea valore economico, ma ha anche un impatto positivo sul benessere della società nel suo complesso.<sup>8,9,12</sup>

## **CAPITOLO 2 – LA LOGISTICA DI MAGAZZINO**

### **2.1 DEFINIZIONE E ORIGINI**

#### **2.1.1 Logistica: Definizione Generale**

La logistica è il processo di pianificazione, implementazione e controllo del flusso e dello stoccaggio efficiente ed efficace di beni, servizi e informazioni, dal punto di origine al punto di consumo, al fine di soddisfare le esigenze del cliente. Nata in ambito militare, la logistica si occupava del trasporto, approvvigionamento e distribuzione delle risorse necessarie alle truppe durante le campagne belliche.

#### **2.1.2 Logistica di Magazzino: Cos'è e Origini**

La logistica di magazzino è una branca della logistica che si concentra sulla gestione delle attività all'interno dei magazzini, comprendendo operazioni come ricezione, stoccaggio, movimentazione, picking e spedizione. Le sue origini risalgono alla Rivoluzione Industriale, quando l'aumento della produzione richiese una gestione più strutturata dei beni, passando da semplici depositi a magazzini organizzati.<sup>13, 14, 15</sup>

### **2.2 EVOLUZIONE**

#### **2.2.1 La Logistica di Magazzino nelle Ere Preindustriali**

Prima della Rivoluzione Industriale, la logistica di magazzino era limitata al semplice stoccaggio dei beni in depositi rudimentali. Questi erano utilizzati principalmente per conservare derrate alimentari e merci non deperibili, spesso in prossimità di porti, mercati o centri urbani. La gestione era manuale, e il concetto di ottimizzazione del magazzino era praticamente inesistente.

### **2.2.2 La Rivoluzione Industriale e i Magazzini Moderni**

Con la Rivoluzione Industriale, il rapido incremento della produzione portò alla necessità di spazi dedicati per lo stoccaggio di materie prime e prodotti finiti. Si svilupparono sistemi di scaffalature e vennero introdotte le prime tecniche di organizzazione dei flussi di materiali, basate su principi empirici.

### **2.2.3 L'Era del Magazzino Automatizzato**

A partire dalla metà del XX secolo, con l'avvento della tecnologia, la logistica di magazzino subì una trasformazione radicale. L'introduzione di sistemi di movimentazione automatizzati, come carrelli elevatori e nastri trasportatori, permise una gestione più efficiente. Negli anni '80 e '90, i sistemi di gestione informatizzata (WMS - Warehouse Management Systems) consentirono di ottimizzare le operazioni logistiche in tempo reale.

### **2.2.4 La Logistica 4.0**

Oggi, con l'avvento della Logistica 4.0, i magazzini utilizzano tecnologie avanzate come robotica, intelligenza artificiale (AI) e Internet of Things (IoT). Queste innovazioni hanno reso possibile la gestione automatica e integrata delle operazioni, migliorando la velocità, l'accuratezza e la flessibilità dei processi logistici. <sup>13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21</sup>

## **2.3 DESCRIZIONE MATEMATICA**

### **2.3.1 Modellizzazione della Logistica di Magazzino**

La logistica di magazzino può essere rappresentata matematicamente attraverso modelli che descrivono i flussi di materiali, l'organizzazione degli spazi e l'ottimizzazione dei processi. Tra i più comuni troviamo i modelli di allocazione degli spazi, i sistemi di teoria delle code e gli algoritmi di ottimizzazione per la gestione delle risorse.

### 2.3.2 Teoria delle Code Applicata ai Magazzini

La teoria delle code è ampiamente utilizzata per analizzare i processi di ingresso e uscita dei materiali nei magazzini. Un esempio tipico è la gestione delle aree di picking, dove gli operatori prelevano articoli richiesti. Qui i parametri chiave includono:

- **Tasso di arrivo ( $\lambda$ ):** rappresenta il numero di richieste per unità di tempo.
- **Tasso di servizio ( $\mu$ ):** definisce la velocità con cui un operatore o un sistema completa le richieste.
- **Utilizzazione ( $\rho = \lambda/\mu$ ):** indica il carico di lavoro relativo al sistema.

Nei magazzini, è fondamentale progettare il sistema in modo che  $\rho < 1$ , garantendo che il servizio possa gestire i flussi senza accumuli.

### 2.3.3 Formule Principali per l'Ottimizzazione

- **Costo Totale (CT):**

$$CT = Cs \cdot Q + Ch \cdot 2Q$$

Dove  $Cs$  è il costo di ordinazione,  $Ch$  il costo di mantenimento per unità, e  $Q$  la quantità ordinata.

Questa formula, derivata dal modello EOQ (Economic Order Quantity), aiuta a determinare la quantità ottimale di riordino.

- **Tempo Medio di Attesa (W):**

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

Questa formula della teoria delle code è essenziale per calcolare i tempi di attesa nelle diverse aree del magazzino.

### **2.3.4 Grafici Illustrativi**

Grafici come le curve di utilizzo ( $\rho$ ) o la rappresentazione delle distanze di movimentazione possono aiutare a visualizzare i punti critici del sistema logistico. Ad esempio:

- Grafico della distribuzione delle distanze percorse dai picker, che spesso segue una curva a campana.
- Diagrammi di flusso che rappresentano i movimenti all'interno del magazzino.<sup>13</sup>  
, 18 , 19 , 20

## **2.4 UTILIZZI**

### **2.4.1 Settore Industriale**

La logistica di magazzino è cruciale per l'industria manifatturiera, dove viene utilizzata per stoccare materie prime e semilavorati, garantendo una produzione continua. Ad esempio, le industrie automobilistiche sfruttano magazzini just-in-time per ridurre i costi di mantenimento delle scorte.

### **2.4.2 Settore Retail**

Nel commercio al dettaglio, i magazzini supportano l'approvvigionamento costante dei punti vendita. Con l'e-commerce, l'importanza di magazzini dedicati alla preparazione e spedizione di ordini (fulfillment center) è cresciuta esponenzialmente.

### **2.4.3 Settore Sanitario**

Gli ospedali e i centri medici utilizzano la logistica di magazzino per gestire forniture critiche come medicinali e strumenti chirurgici, dove precisione e tempi rapidi sono vitali.

<sup>13</sup>, 18 , 19 , 21 , 22

## **2.5 OBIETTIVI**

### **2.5.1 Riduzione dei Costi Operativi**

Un magazzino ottimizzato riduce gli sprechi e i costi associati al mantenimento delle scorte, minimizzando il capitale immobilizzato.

### **2.5.2 Miglioramento del Servizio al Cliente**

Tempi di consegna più rapidi e una gestione accurata degli ordini migliorano la soddisfazione del cliente, un fattore decisivo nell'era dell'e-commerce.

### **2.5.3 Sostenibilità Ambientale**

Con l'adozione di tecnologie verdi, come sistemi di stoccaggio automatizzati e magazzini a basso consumo energetico, le aziende riducono il loro impatto ambientale.<sup>16, 18, 20, 21, 22</sup>

## **2.6 SFIDE E LIMITI**

### **Complessità Tecnologica:**

L'integrazione di tecnologie avanzate può essere costosa e richiedere formazione specifica per gli operatori.

### **Variabilità della Domanda:**

Fluttuazioni nella domanda possono portare a inefficienze nella gestione delle scorte, creando problemi di sovra- o sotto-stoccaggio.

### **Problemi Logistici Globali:**

Interruzioni nella supply chain globale, come durante la pandemia di COVID-19, possono creare ritardi significativi.

## **2.7 APPLICAZIONI FUTURE**

### **Automazione Totale:**

L'adozione di robot autonomi e droni potrebbe portare all'automazione completa delle operazioni di magazzino.

### **Intelligenza Artificiale:**

L'uso di algoritmi predittivi basati sull'IA potrebbe migliorare l'accuratezza nella previsione della domanda e nell'allocazione delle risorse.

### **Magazzini Sostenibili:**

I magazzini del futuro saranno progettati per essere sostenibili, con un focus sull'energia rinnovabile e la riduzione delle emissioni.<sup>17, 18, 19, 20, 21, 22</sup>

## **2.8 IMPATTO ECONOMICO E SOCIALE**

### **Benefici Economici:**

La logistica di magazzino efficiente contribuisce alla riduzione dei costi operativi, aumentando la competitività delle imprese.

### **Effetti sul Mercato del Lavoro:**

Se da un lato l'automazione potrebbe ridurre i posti di lavoro manuali, dall'altro creerà nuove opportunità in ambiti tecnologici e gestionali.

### **Influenza sulla Vita Quotidiana:**

L'efficienza dei magazzini è essenziale per garantire una distribuzione rapida e accessibile di beni di prima necessità, migliorando il tenore di vita generale.<sup>16, 19, 20, 21, 22</sup>

## **CAPITOLO 3 - DATI E ANALISI**

### **3.1 OBIETTIVO DELL'ANALISI SVOLTA**

L'analisi è partita da un dataset esportato dai database aziendali, all'interno del quale si trovano informazioni relative alla produzione di casse contenenti carne che possono essere di dimensione differente.

Lo studio effettuato si basa sui tempi di attesa dei prodotti dal momento in cui arrivano sulla rulliera finale a quando vengono prelevati dall'operatore e posizionati successivamente sui pallet che li porteranno alla spedizione.

Il lavoro è stato suddiviso principalmente in due fasi che seguono due procedimenti differenti:

- I) Analisi dei tempi di coda dei prodotti sulla rulliera, in modo da identificare, in media, i momenti della giornata e più in generale i giorni della settimana in cui le attese sono maggiori;
- II) Analisi sulla distribuzione degli arrivi dei prodotti su rulliera. L'obiettivo è simile, cercare i momenti critici, ma in questo caso invece del tempo di attesa prendiamo come dato principale il numero di arrivi dei prodotti in un determinato intervallo di tempo, che può essere maggiore o minore a seconda del livello di precisione che vogliamo avere;

### **3.2 DESCRIZIONE DEI DATI ORIGINALI**

I dati originali esportati sono rappresentati in tabella all'interno di un foglio excel. La descrizione parte da quelli che non necessariamente verranno presi in considerazione durante l'analisi, ma che possono essere comunque utili per osservazioni successive:

- "BATCHNR": rappresenta il lotto di riferimento;
- "CUSTOMER\_SEQUENCE": divide i prodotti a seconda dei diversi ordini e quindi dei clienti a cui devono arrivare. Possono comprendere più lotti (BATCHNR);
- "TRUCK\_ID": codice ID del camion che effettuerà la spedizione dei rispettivi prodotti;
- "CX": ci dice se la cassa del prodotto di riferimento è doppia (2) o singola (1);
- "LOWERLC": presente solo dove la cassa è doppia, ci mostra il codice della cassa che si trova sotto;
- "UPPERLC": come per "LOWERLC" ma ci mostra il codice della cassa che si trova sopra;
- "TipoCassa": ci dice se la cassa è GRANDE o PICCOLA;

Andando più nello specifico, per quanto riguarda la prima fase i dati principali presi in considerazione sono:

- “TIME\_FINISHED”: questo dato mi fornisce data e orario del momento in cui l’operatore preleva il prodotto dalla rulliera. Il formato della colonna di riferimento è gg/mm/aa hh/mm/ss;
- “TIMEOUTBOUNDED”: data e orario del momento in cui il prodotto arriva alla rulliera, il formato è lo stesso del precedente;

Questi due dati sono poi stati ripresi nella tabella, in modo da avere una suddivisione tra data e orario. Inoltre l’orario è stato poi diviso in “Step” di pochi minuti per avere intervalli più generali che non vadano quindi a considerare anche i secondi, in particolare:

- “GIORNO”: formula che prende solo la data del “TIMEOUTBOUNDED”, formato aaaa/mm/gg;
- “ORA”: formula che prende la data e solo l’ora del “TIMEOUTBOUNDED”, formato aaaa/mm/gg hh;
- “Step 5 Minuti”: formula che riporta solo i minuti del “TIMEOUTBOUNDED”, considerando intervalli di 5 minuti, formato mm (esempio: 5, 5, 5, 10, 10, 10, in colonna);
- “Minuti”: formula che prende la data, l’ora e i minuti del “TIMEOUTBOUNDED”, formato aaaa/mm/gg hh/mm;
- “Minuti Step 5”: come per “Step 5 Minuti” ma invece di mostrare solo i minuti mostra anche la data e l’ora, formato aaaa/mm/gg hh/mm;

Tutti questi dati possono esserci utili per effettuare future analisi per giorni, ore o minuti ad intervalli specifici.

Considerando invece la seconda fase del lavoro, il dato principale su cui lavorare è stato solamente il “TIMEOUTBOUNDED”, da cui sono stati tratti tutti gli elementi necessari alla descrizione della distribuzione degli arrivi, che verrà descritta quando parleremo dello svolgimento della seconda fase.

### **3.3 FASE I**

In questo punto verrà descritto lo svolgimento della prima fase del lavoro, ovvero un’analisi sui tempi di attesa dei prodotti sulla rulliera.

Per prima cosa c'è da dire che il foglio-dati originale era di notevoli dimensioni, trattandosi di oltre 600.000 righe per 23 colonne, quindi la prima cosa da fare per poter lavorare fluidamente è stata ridurre il quantitativo di dati, creando quindi un nuovo foglio su cui riportare solo le colonne di dati necessarie all'analisi e di cui è stato ridotto notevolmente il quantitativo di righe, arrivando ad avere solo 75.000 righe (per necessità di un numero inferiore alle 100.000, in modo da ridurre i tempi di calcolo e i problemi di bloccaggio).

Considerando quindi questo quantitativo di righe è stata svolta un'analisi preliminare solamente sui primi tre giorni, rispettivamente venerdì, sabato e domenica.

Uno strumento fondamentale utilizzato durante l'analisi è stato quello delle "Tabelle di Pivot", che permettono di ricavare numerosi risultati partendo da una tabella di dati originale.

Inizialmente sono state aggiunte delle colonne per completare la tabella di dati che andrà presa come riferimento per la tabella di pivot:

- "ORA (BOUND)": mostra solo l'ora del "TIMEOUTBOUNDED", formato hh;
- "WAITING": formula che calcola la differenza di tempo tra l'arrivo del prodotto sulla rulliera (TIMEOUTBOUNDED) e il momento in cui viene prelevato (TIME\_FINISHED). Sostanzialmente l'attesa di ogni prodotto sulla rulliera;
- "GIORNO (BOUND)": formula che fa corrispondere ad ogni data del "TIMEOUTBOUNDED" il rispettivo giorno della settimana, da Lun a Sab (di domenica la fabbrica non è in produzione);

Partendo da questi dati è stata inserita la tabella di pivot, la cui struttura dati è suddivisa in quattro riquadri:

- 1) Righe: riquadro nel quale riporto i valori che andranno posizionati nelle righe della tabella;
- 2) Colonne: riquadro nel quale riporto i valori che andranno posizionati nelle colonne della tabella;
- 3) Sommatoria Valori: riportando dei valori in questo riquadro, lo strumento ti permette di effettuare diversi tipi di calcoli, modificando le impostazioni di "campo\_valore" (esempio: Sommatoria, Media, Conteggio etc.);

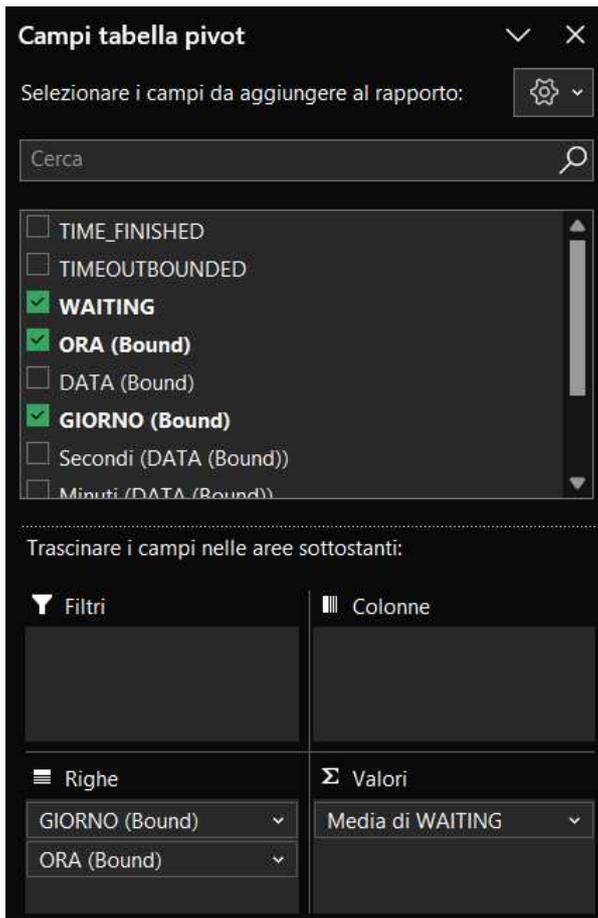
- 4) Filtri: i valori riportati in questo riquadro non saranno direttamente visibili in tabella ma verranno mostrati in un'altra riga che ti permetterà di filtrare i valori mostrati in tabella (esempio: filtrando per il lunedì verranno mostrati solo i risultati relativi a quel giorno della settimana);

Ai fini dell'analisi, per ottenere una media dei tempi di attesa per ogni ora di ogni giorno è stata riportata prima la colonna "GIORNO (BOUND)" e poi la "ORA (BOUND)" nel riquadro delle righe, posizionandole in questo modo si ottiene una tabella che nelle righe mostra i diversi giorni della settimana e selezionando un giorno specifico vengono mostrate anche tutte le ore relative a quel giorno.

Infine la colonna "WAITING" è stata posizionata nel riquadro della Sommatoria Valori, scegliendo come impostazione del campo\_valore la Media. Facendo ciò si ottiene una tabella che mostra la media dei tempi di attesa per ogni giornata (in questo caso, a causa del numero di dati limitato, prenderà in considerazione il singolo giorno. Se invece prendessimo l'intero foglio dati come input, verrebbe fatta una media anche tra i diversi giorni della settimana), e selezionando il giorno specifico, viene mostrata anche la media dei tempi di attesa per ogni ora del giorno (quelle in cui la fabbrica è effettivamente in produzione).

Da questi dati è quindi possibile osservare quali sono le giornate e le ore della giornata con tempi di attesa maggiori.

Ottenute queste informazioni l'azienda potrà capire quali sono i momenti in cui si crea una coda maggiore ed agire direttamente su quelli per trovare una possibile soluzione.



*Figura 1. Struttura dati della tabella di pivot (presa direttamente dal foglio di lavoro)*

*Figura 2. Tabella riportata sul foglio di lavoro (In rosso l'ora critica)*

Etichette di riga	Media di WAITING
<b>Lun</b>	<b>00:36:38</b>
16	00:31:50
<b>17</b>	<b>00:50:03</b>
18	00:31:41
19	00:31:57
20	00:43:19
21	00:32:22
22	00:13:32
<b>Ven</b>	<b>00:43:20</b>
<b>Sab</b>	<b>00:45:22</b>
<b>Totale complessivo</b>	<b>00:42:44</b>

### **3.4 FASE II**

Come è stato già detto, la seconda fase rappresenta sostanzialmente un procedimento differente per la ricerca dei momenti critici, che si basa sulla distribuzione degli arrivi.

In questo caso è stato possibile lavorare con la tabella dati originale, considerando quindi tutte le righe.

Il dato originario preso in considerazione è stato solamente il “TIMEOUTBOUNDED” da cui sono stati ricavati i giorni della settimana (DAY\_WEEK), l’ora (HOUR) e una nuova colonna chiamata “Step\_10min” che, come per la colonna originale “Minuti Step 5”, suddivide i tempi di arrivo in intervalli di 10 minuti, senza considerare i secondi. Questa colonna servirà ad effettuare un’ulteriore analisi nelle ore critiche della giornata, andando quindi più nello specifico.

A differenza della fase precedente il dato principale su cui basare questa analisi è il numero di arrivi, per ottenere questo dato è stata utilizzata una nuova impostazione campo\_valore nella tabella di pivot, ovvero il Conteggio, che permette di riportare in tabella il numero di arrivi dei prodotti attraverso il semplice conteggio delle volte in cui, nella tabella dati originale, viene ripetuto lo stesso valore (l’ora nel caso dell’analisi più generale e i minuti per quella più approfondita).

Una volta inserita la nuova tabella di pivot che prende in considerazione i dati appena elencati, la colonna “HOUR” è stata posizionata nel riquadro delle righe e la “DAY\_WEEK” in quello dei filtri, così facendo è possibile selezionare attraverso un filtro il giorno della settimana specifico che si vuole prendere in considerazione (questo ulteriore passaggio è stato fatto per facilitare poi la rappresentazione della distribuzione degli arrivi attraverso dei grafici a linee).

Infine per ottenere il numero di arrivi la colonna “HOUR” è stata posizionata anche nel riquadro della Sommatoria Valori, modificando le impostazioni campo\_valore in modo da ottenere il conteggio delle ore. Si ottiene così una tabella che mostra il numero di arrivi dei prodotti per ogni ora della giornata, con la possibilità di selezionare giornate diverse attraverso i filtri.

**Figura 3. Tabella riportata sul foglio di lavoro con filtro impostato sul giovedì**

DAY_WEEK	Gio
Etichette di riga	Conteggio di HOUR
6	1815
7	4981
8	2509
9	2769
10	3781
11	4615
12	4634
13	4837
14	4832
15	5441
16	5168
17	5522
18	2325
19	4988
20	4743
21	4647
22	3257
23	1284
<b>Totale complessivo</b>	<b>72148</b>

DAY_WEEK	Sab
Etichette di riga	Conteggio di HOUR
6	4831
7	9561
8	9897
9	10549
10	4601
11	9211
12	7725
13	9979
14	9557
15	8554
16	4674
17	1759
18	115
<b>Totale complessivo</b>	<b>91013</b>

**Figura 4. Tabella con filtro impostato sul sabato**

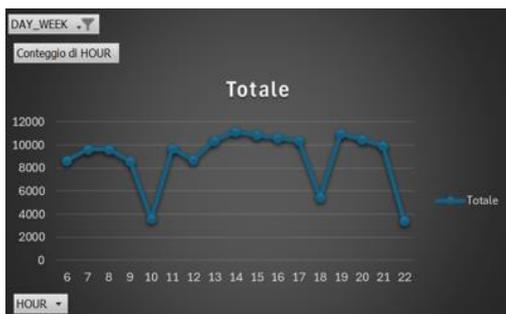
**NOTA:** L'orario arriva fino alle 18:00 poiché di sabato la produzione si arresta prima.

Ottenuti gli arrivi non resta che rappresentarli attraverso dei grafici.

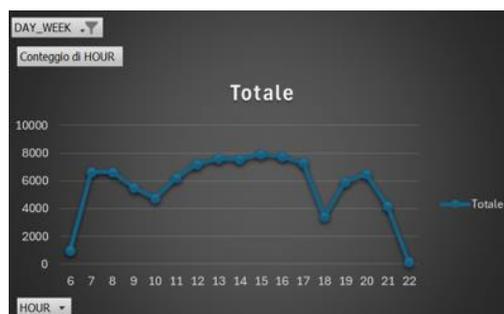
È stato inserito un grafico a linee che prende come dati i valori riportati nella tabella di pivot, più precisamente si hanno le ore sull'asse delle ascisse e i conteggi sull'asse delle ordinate.

Per avere i grafici relativi alle varie giornate basterà selezionare il giorno desiderato attraverso il filtro e il grafico verrà modificato di conseguenza. Per far sì che tutti i grafici vengano mostrati contemporaneamente sono stati semplicemente copiati e incollati in un unico foglio separato, questo è il risultato:

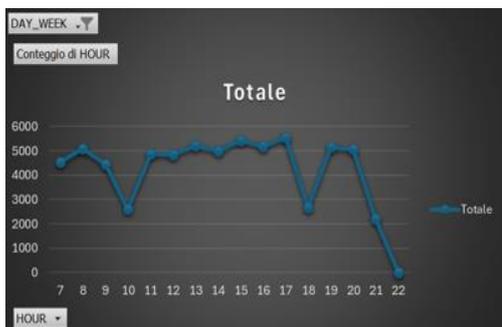
**Lunedì**



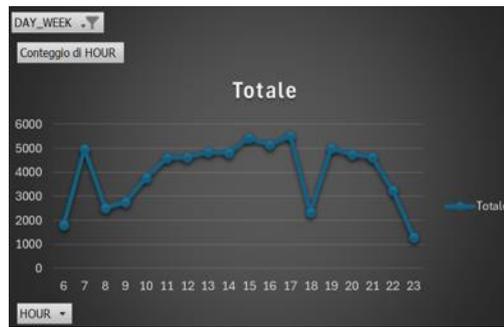
**Martedì**

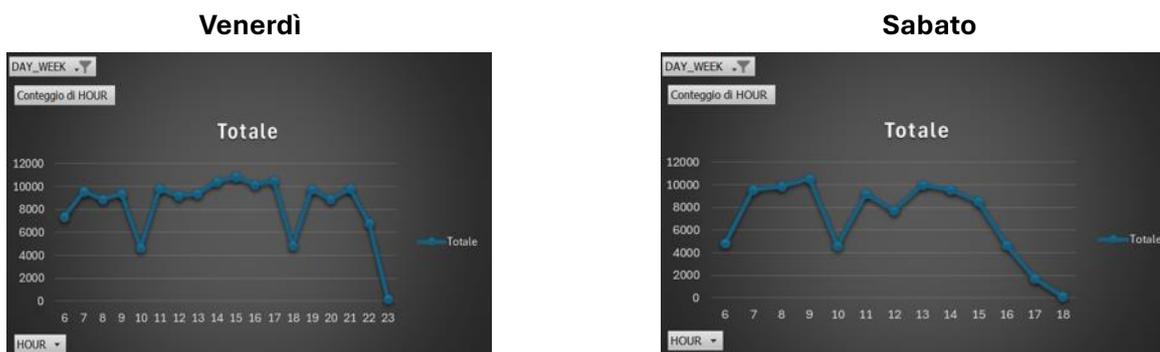


**Mercoledì**



**Giovedì**





**Figure 5,6,7,8,9,10. Grafici sulla distribuzione degli arrivi.**

L'osservazione e lo studio dei grafici rende semplice l'individuazione delle fasce orarie con numero di arrivi maggiore, dove quindi sarà presente più coda, e di quelle invece con meno coda.

Per trovare esattamente qual è l'orario critico per ciascun giorno è sufficiente cercare il massimo della distribuzione, così come è possibile trovare l'orario più "leggero" cercando il minimo. A tal proposito è stata creata una tabella che mostra proprio questi valori e anche la media di arrivi nell'arco di ciascuna giornata:

	Media_Arrivi	Max_Arrivi	Min_Arrivi
Lunedì	8955	11162 (Ore 14)	3447 (Ore 23)
Martedì	5670	7963 (Ore 15)	153 (Ore 22)
Mercoledì	4246	5554 (Ore 17)	17 (Ore 22)
Giovedì	4088	5522 (Ore 17)	1284 (Ore 23)
Venerdì	8370	10850 (Ore 15)	227 (Ore 23)
Sabato	7001	10549 (Ore 9)	115 (Ore 18)

**Figura 11. Tabella Media/Max/Min**

**NOTA:** Massimi e Minimi vengono presi come media nell'orario considerato

Il prossimo passo dell'analisi effettuata consiste nello studio della distribuzione degli arrivi all'interno degli intervalli di tempo critici, che in questo caso sono le ore, per ciascuna giornata, in cui abbiamo il massimo numero di arrivi (in media).

Ai fini di tale studio è stata creata una nuova tabella di pivot che, a differenza della precedente, non conterrà la colonna dati "HOUR" nelle righe e nella sommatoria valori, bensì la "Step\_10min". Così facendo verranno mostrati i conteggi degli arrivi per ogni 10 min della giornata. A questo punto è bastato estrapolare dalla nuova tabella di pivot i valori che interessano la nostra analisi, ovvero i conteggi solo per le ore critiche di ogni giornata, ottenendo così sei nuove tabelle (una per giornata) che descrivono la distribuzione degli arrivi nelle ore critiche ad intervalli di 10 min.

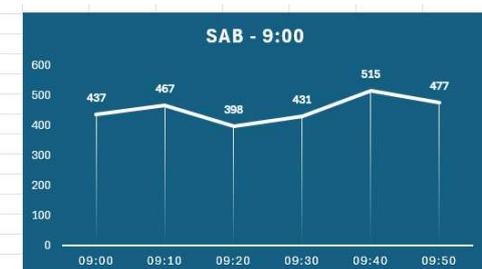
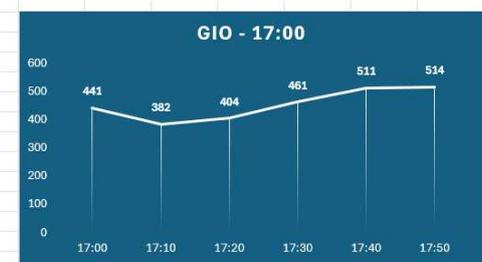
LUN		MAR		MER	
Min	Conteggio	Min	Conteggio	Min	Conteggio
14:00	325	15:00	366	17:00	488
14:10	380	15:10	488	17:10	466
14:20	468	15:20	607	17:20	475
14:30	571	15:30	492	17:30	545
14:40	535	15:40	337	17:40	426
14:50	499	15:50	459	17:50	371

GIO		VEN		SAB	
Min	Conteggio	Min	Conteggio	Min	Conteggio
17:00	441	15:00	401	09:00	437
17:10	382	15:10	296	09:10	467
17:20	404	15:20	494	09:20	398
17:30	461	15:30	422	09:30	431
17:40	511	15:40	473	09:40	515
17:50	514	15:50	552	09:50	477

**Figura 12. Tabelle con conteggio degli arrivi nelle ore critiche (10 min)**

Partendo da queste tabelle sono stati inseriti i rispettivi grafici a linee come per lo studio precedente:



**Figure 13,14,15: Grafici con distribuzione degli arrivi (10 min)**

Quest'ultime ci mostrano quindi quanti prodotti arrivano a rulliera ogni 10 min nell'orario in cui la media di arrivo è maggiore, per ogni giornata.

Lo svolgimento dell'analisi termina qui, nel prossimo capitolo verranno descritti i risultati ottenuti.

## **CAPITOLO 4 – RISULTATI E CONSIDERAZIONI**

### **4.1 OBIETTIVO DELLO STUDIO**

L'obiettivo delle analisi svolte sul dataset esportato è stato quello di individuare quali sono i momenti critici della fase finale di produzione di un'azienda, in particolare dal momento in cui i prodotti arrivano sull'ultima rulliera a quando vengono prelevati dall'operatore per essere poi spediti ai consumatori.

Nella prima fase del lavoro sono stati considerati come momenti critici quelli in cui il tempo di attesa dei prodotti sulla rulliera è peggiore, mentre nella seconda fase quelli in cui il numero di arrivi per intervallo di tempo è maggiore.

In entrambi i casi per svolgere l'analisi sono state utilizzate nozioni di teoria delle code e più in particolare, per la seconda fase, di distribuzione degli arrivi.

## **4.2 RISULTATI FASE I**

Con la prima fase, attraverso lo studio descritto nel capitolo precedente, sono state ricavate informazioni molto importanti per l'azienda (consideriamo lo studio ampliato su tutto il dataset):

- Tempo di attesa di ogni prodotto su rulliera;
- Media dei tempi di attesa;
- Qual è l'ora della giornata in cui la media di attesa per i prodotti è maggiore (estendibile poi anche a step di pochi minuti);
- Qual è il giorno della settimana in cui la media di attesa per i prodotti è maggiore;
- Seguendo lo stesso schema con più dati è possibile anche ricavare le settimane o i mesi con più code, per un'analisi più generale del carico di lavoro annuale;

Quest'ultime danno all'azienda la possibilità di individuare facilmente i momenti di coda maggiori ed agire direttamente su questi per minimizzare o annullare il problema.

## **4.3 RISULTATI FASE II**

In questa fase lo studio è stato direttamente applicabile a tutto il dataset quindi la maggior parte delle informazioni che si volevano ottenere sono già a disposizione, come mostrato nel capitolo precedente.

I risultati sono simili, ma in questo caso l'oggetto di studio era diverso. Osservare i problemi attraverso metodologie diverse può rendere più chiara anche la risoluzione degli stessi.

In particolare abbiamo ricavato:

- Media del numero di arrivi di prodotti per ogni giorno della settimana;
- Media del numero di arrivi di prodotti per ogni ora della giornata;

- Grafici che mostrano distribuzione degli arrivi in media per ogni giorno della settimana;
- Ora in cui si ha, in media, il massimo numero di arrivi per ogni giorno della settimana;
- Ora in cui si ha, in media, il minimo numero di arrivi per ogni giorno della settimana;
- Conteggio del numero di arrivi ad intervalli di 10 minuti per le ore critiche di ogni giorno della settimana;
- Grafici che mostrano la distribuzione degli arrivi in media per ogni ora critica della giornata (con intervallo di 10 min);

#### **4.3.1 Considerazioni**

Dall'osservazione dei risultati ottenuti (mostrati nel capitolo precedente) si possono fare diverse considerazioni:

- Il numero di arrivi maggiore occorre sempre nella fascia pomeridiana (tra le 14 e le 17), tranne per il sabato a causa tempo di produzione più breve (fino alle 18). Ciò lo osserviamo dalla tabella che mostra l'ora con il numero massimo di arrivi per giornata (*Figura 11*);
- Il numero di arrivi minore occorre sempre nell'ultima ora di produzione della giornata, a causa dell'arresto della produzione che avviene durante l'ora e diminuendo così il numero di prodotti che arrivano a rulliera (*Figura 11*);
- Il giorno della settimana più critico è il lunedì mentre il più "leggero" è il giovedì (in media);
- In tutte le ore critiche delle varie giornate abbiamo un flusso di materiali abbastanza costante, che rimane quindi alto durante tutta l'ora considerata e non solo per un intervallo preciso di pochi minuti (*Figure 13,14,15*);

Attraverso lo studio di tutte queste informazioni l'azienda, come nel caso precedente, è in grado di individuare facilmente i momenti critici, ovvero quelli in cui ci sarà un maggiore arrivo di prodotti su rulliera, e prepararsi di conseguenza.

## CONCLUSIONE

La tesi presentata offre una panoramica teorica e applicativa della teoria delle code e del suo utilizzo nell'ambito della logistica di magazzino, culminando in un'analisi approfondita dei flussi di spedizione di un magazzino di prodotti alimentari. Attraverso lo studio dei tempi di attesa e del numero di arrivi dei prodotti, è stato possibile individuare momenti critici e proporre spunti utili per l'ottimizzazione dei processi.

L'analisi svolta dimostra come un approccio basato sui dati possa fornire informazioni preziose per la gestione operativa, consentendo di individuare inefficienze e programmare interventi mirati. Ad esempio, la possibilità di riconoscere le ore e i giorni della settimana caratterizzati da picchi di attività o lunghi tempi di attesa permette di pianificare meglio le risorse, migliorare la produttività degli operatori e ridurre i tempi morti. Questo tipo di ottimizzazione non solo aumenta l'efficienza operativa, ma può anche ridurre i costi, migliorare il servizio offerto ai clienti e garantire una gestione più sostenibile delle risorse.

L'importanza di questa analisi si estende oltre il caso specifico trattato. Le metodologie adottate, infatti, possono essere applicate in numerosi contesti industriali e logistici, offrendo un approccio sistematico per affrontare le sfide dell'era moderna, dove i volumi di dati sono in costante crescita. Le aziende che scelgono di adottare strumenti analitici avanzati e di investire in tecnologie per il monitoraggio e l'interpretazione dei dati hanno la possibilità di acquisire un vantaggio competitivo significativo, non solo migliorando i propri processi interni, ma anche rispondendo in modo più efficace alle esigenze di un mercato sempre più dinamico.

In conclusione, il lavoro svolto dimostra come l'integrazione tra teoria e pratica, unita a un'attenta analisi dei dati, possa rappresentare un potente strumento per le aziende moderne. Questo approccio non solo favorisce la risoluzione di problemi operativi, ma offre anche la base per decisioni strategiche più informate e sostenibili. L'analisi sviluppata nel contesto di questa tesi rappresenta quindi non solo un contributo specifico al caso studiato, ma anche un esempio di come la scienza dei dati possa trasformare il modo in cui le organizzazioni affrontano le sfide quotidiane, tracciando la strada verso un futuro più efficiente e competitivo.

## **BIBLIOGRAFIA - SITOGRAFIA**

1. *Wikipedia, Teoria delle code.*
2. *Università Roma Tre, Inf. Matematica.*
3. *INFN Trieste, Teoria delle code e processi nascita-morte.*
4. *Gross, D., & Harris, C. M. (1998). Fundamentals of Queueing Theory. Wiley.*
5. *MathWorks, Queueing Theory Examples.*
6. *Stanford University, History of Queueing Theory.*
7. *Journal of Operations Research, "Applications of Queueing Models in Healthcare Systems", vol. 12, no. 3, 2021.*
8. *ACM Digital Library, "Big Data Analytics and Queueing Models", vol. 45, no. 8, 2020.*
9. *Transportation Research Board, "Queueing Theory Applications in Public Transit", 2020.*
10. *Springer, "Queueing Theory in Traffic Management", 2023.*
11. *Logistics Management Journal, "Warehouse Optimization through Queueing Theory", vol. 22, no. 3, 2022.*
12. *IEEE Xplore, "Queueing Models for IoT Networks", 2021.*
13. *Punti di vista sulla logistica*
14. *Digitale della catena di approvvigionamento*
15. *ScienzaDiretta*
16. *Consiglio dei professionisti della gestione della catena di approvvigionamento (CSCMP)*
17. *Logistica in entrata*
18. *Sistemi di gestione del magazzino*
19. *i-SCOOP - Innovazioni Logistiche*
20. *EY - Automazione Logistica*
21. *Forbes - Logistica e Catena di Fornitura*
22. *McKinsey & Company - Approfondimenti sulle Operazioni*

**NOTA:** Le citazioni bibliografiche sono riportate come apici in fondo ad ogni paragrafo.

