

## Presentazione

Il testo nasce come ausilio didattico per il corso di *Logistica di Distribuzione*, offerto agli studenti del terzo anno nei corsi di laurea di primo livello della IV Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino, ovvero *Ingegneria Logistica e della Produzione e Ingegneria dell'Organizzazione d'Impresa*. Dopo un'iniziale esperienza didattica basata sull'assemblaggio di materiale di varia origine, ci siamo rassegnati all'idea di produrre un libro di testo nostro. La ragione fondamentale di questa scelta non indolore è la difficoltà di reperire testi di livello intermedio nella pur ricca bibliografia in lingua inglese. Si nota infatti una certa dicotomia tra alcuni libri di alto livello, tipicamente orientati agli studenti di dottorato, spesso focalizzati su aspetti particolari, e comunque poco accessibili, e diversi manuali didattici che coprono una vasta gamma di argomenti, ma nei quali l'aspetto quantitativo è limitato e non trattato con la necessaria attenzione.

Nell'ambito dei nostri *curricula* il corso di *Logistica di Distribuzione* si posiziona alla fine di una filiera logica che include i corsi di *Statistica*, *Ricerca Operativa* e *Programmazione e Controllo della Produzione*. Data questa collocazione, si comprende il taglio quantitativo che abbiamo dato alla trattazione, come peraltro si conviene ad una scuola di ingegneria. Per quanto riguarda l'ultimo insegnamento citato, nonostante vi sia spesso una significativa interazione tra produzione e distribuzione, abbiamo scelto di trattare la produzione come una sorta di *black box*, per cui esso non è un prerequisito fondamentale per la lettura del testo. Sono invece prerequisiti essenziali i concetti di teoria delle probabilità, statistica e programmazione lineare, che sono oggetto di specifiche appendici, in modo da rendere il testo autocontenuto e fruibile da un pubblico il più vasto possibile. Questo comprende gli studenti delle scuole di *business administration*, delle facoltà di ingegneria, economia, matematica e statistica, nonché, ovviamente, gli utilizzatori finali dei metodi illustrati.

Non è nostra intenzione incoraggiare l'uso acritico di algoritmi e modelli sofisticati a discapito dell'intuizione e del buon senso. Classico è l'esempio dell'approccio giapponese al problema dei tempi di setup in ottica *just in time*: è inutile costruire modelli matematici complessi per la gestione delle scorte, se si possono ridurre i tempi di setup con opportuni interventi a livello tecnologico. Tuttavia, data la varietà e la

complessità dei temi nella logistica di distribuzione, che per di più interagiscono tra di loro in modi complessi, non si può prescindere da una conoscenza adeguata di concetti e strumenti, e dei loro limiti e condizioni di utilizzo. Infatti, avere una conoscenza non casuale dei metodi quantitativi significa prima di tutto conoscerne i limiti. Tali limiti portano spesso ad associare il concetto di *teorico* a quello di *non pratico*. In realtà, come affermato dal fisico scozzese James Clerk Maxwell, non c'è nulla di più pratico di una *buona* teoria. Non c'è alcuna contraddizione tra *buona* teoria e *buone* applicazioni, escludendo quindi quelle cattive “applicazioni” in cui non si capisce *cosa* sarebbe stato applicato. Una buona rappresentazione formale è utile a comprendere la natura dei problemi, dei relativi *tradeoff*, a delineare approcci di soluzione e a creare strategie alternative. Inoltre, esiste una crescente offerta di pacchetti software per la logistica che impiegano approcci quantitativi, per cui è opportuno conoscerne, almeno in prima approssimazione, le basi concettuali ed il funzionamento. D'altro canto la costruzione e l'utilizzo di modelli in grado di cogliere gli elementi essenziali di un problema per proporre ed implementare soluzioni è proprio una delle tipiche attività dell'ingegnere. Naturalmente, questo non vuol dire che l'utilizzo di modelli formali sia di per sé garanzia di successo. Si corre infatti il rischio di porsi il problema sbagliato, di risolverlo sulla base di dati non affidabili, di ricavare una soluzione ottima in teoria ma non implementabile per vincoli organizzativi. Inoltre, solo un decisore esperto e competente è in grado di ottenere un adeguato bilanciamento in termini di obiettivi multipli e tipicamente in conflitto tra di loro o di comprendere come le soluzioni proposte possano essere modificate per prendere in considerazione fattori o variabili non opportunamente modellizzate. Infine, solo chi sa utilizzare modelli anche sofisticati è in grado di comprenderne i difetti e prendere la consapevole decisione, al limite, di non utilizzarli in alcuni contesti. Occorre quindi avere sempre ben chiaro il contesto in cui opera l'azienda ed il suo posizionamento in termini di strategie e leve di competizione. Tutto ciò ha un che di “creativo” che viene spesso considerato in conflitto con il carattere “rigido” degli approcci quantitativi. In realtà si tratta di un falso mito. La matematica, forse, non è un'opinione, ma il modo di applicarla lo è certamente: capire quali sono le variabili rilevanti, gli obiettivi da perseguire, le leve di intervento è certamente tutt'altro che noioso e dipende dalle capacità di analisi e sintesi di chi costruisce il modello. In questo testo, speriamo di poter veicolare almeno parzialmente l'interesse che l'analisi di problemi distributivi, la loro modellizzazione e la loro soluzione possono destare.

Il testo è strutturato su sette capitoli e due appendici.

- Nel capitolo 1 vengono definiti i confini della trattazione, attraverso alcuni esempi introduttivi il cui scopo è familiarizzare il lettore con i temi fondamentali della logistica di distribuzione. Viene offerta una panoramica sui problemi più rilevanti, che si collocano a livello strategico, tattico e operativo.
- Il capitolo 2 tratta il problema strategico del progetto della rete logistica, in termini di localizzazione e dimensionamento di impianti e centri di distribuzione. Attraverso semplici esempi viene illustrato il ruolo potenziale dei centri di distribuzione dal punto di vista del raggiungimento di economie di scala. Si mostra anche l'interazione di tali problematiche con l'ottimizzazione dei trasporti.
- Il capitolo 3 tratta il tema della previsione. I metodi proposti sono quelli classici di analisi di serie temporali e di regressione lineare semplice. Piuttosto che propor-

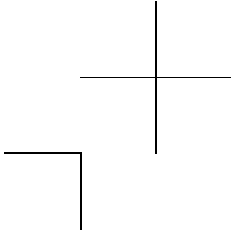
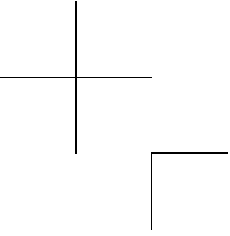
re metodi sofisticati, viene data adeguata enfasi alla collocazione di tali approcci all'interno di *processi di decisione* ed alla valutazione delle loro prestazioni.

- Il capitolo 4 tratta il tema della gestione delle scorte nelle condizioni, spesso solo ideali, di certezza su domanda e tempi di fornitura. Dopo avere illustrato criticamente il classico modello del lotto economico, ne analizziamo successivamente la robustezza a fronte di incertezze sui dati e alcune sue generalizzazioni. Infine, consideriamo i casi di prodotti multipli e di domanda con variabilità prevedibile nel tempo.
- Il capitolo 5 tratta invece la gestione delle scorte in un solo magazzino, in condizioni di incertezza sulla domanda.
- Il capitolo 6 introduce, a livello elementare, i problemi di gestione delle scorte in una catena logistica formata da più livelli.
- Infine, nel capitolo 7, offriamo un cenno ai problemi operativi di ottimizzazione dei trasporti.
- L'appendice A richiama i concetti fondamentali di teoria delle probabilità e di statistica. Questi sono indispensabili per trattare la gestione delle scorte in condizioni di incertezza su domanda e tempi di fornitura, nonché per affrontare alcuni problemi di previsione.
- L'appendice B tratta invece i temi della programmazione matematica. Coerentemente con l'obiettivo del testo, abbiamo dato enfasi non tanto ai metodi di soluzione, quanto alla costruzione pratica di modelli matematici e all'interpretazione di certe grandezze che si ottengono come *output* del processo di soluzione.

Come si vede, il testo non tratta la logistica dal punto di vista impiantistico e del *material handling*. Anche altri temi che possono essere considerati parte del Supply Chain Management, come la gestione dei fornitori, la contrattualistica o la simulazione a eventi discreti, non vengono considerati. Esso è quindi ben lontano dal costituire una trattazione completa dei temi della logistica, cosa impossibile in un numero ragionevole di pagine, se non offrendone una lettura estremamente superficiale. L'obiettivo di questo volume non è certo quello di fornire una trattazione esaustiva di tutti i temi rilevanti per la gestione di una catena logistica ma di discutere con un minimo livello di approfondimento i temi della gestione della distribuzione. Peraltro, nell'ambito dei nostri corsi, il libro viene integrato da discussioni di casi aziendali, tipicamente tratti dalla libreria della *Harvard Business School*, e da attività di laboratorio di calcolo. La natura interattiva di tali integrazioni non si presta però alla loro inclusione in un testo.

Gli studenti del Politecnico di Torino potranno reperire materiale integrativo sul portale della didattica (<http://didattica.polito.it/>). Lo stesso materiale verrà reso disponibile alla pagina <http://staff.polito.it/paolo.brandimarte/>. Saremo grati a quanti vorranno segnalarci eventuali errori di stampa, che verranno inclusi in un'*errata corrige* disponibile su web.

L'opera è frutto del lavoro congiunto dei due autori. Tuttavia al primo autore (PB) sono attribuibili i capitoli 1, 2, 7 e le appendici A e B; al secondo autore (GZ) sono attribuibili i capitoli 3, 4, 5 e 6.



*Presentazione*

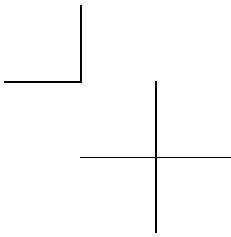
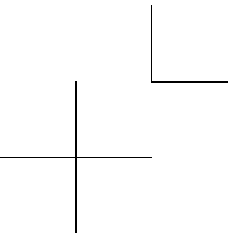
---

Ringraziamenti. Gli autori desiderano ringraziare la Fondazione CRT per il supporto dato alla loro attività di ricerca sulla gestione della supply chain in condizioni di incertezza.

PAOLO BRANDIMARTE  
paolo.brandimarte@polito.it

GIULIO ZOTTERI  
giulio.zotteri@polito.it

*Politecnico di Torino*  
*settembre 2004*



# Indice

<b>1</b>	<b>Supply chain management</b>	<b>1</b>
1.1	Cosa si intende per logistica . . . . .	2
1.2	Un esempio classico: lotto economico e punto di riordino . . . . .	4
1.3	Il ruolo dell'incertezza . . . . .	15
1.3.1	Scorte di sicurezza . . . . .	16
1.3.2	Un esempio di processo decisionale a due stadi: pianificazione della produzione in ambiente assemble to order . . . . .	18
1.4	Struttura delle reti logistiche . . . . .	24
1.5	Costi, leve gestionali e fattori di competizione . . . . .	31
1.6	Approcci <i>push</i> e <i>pull</i> . . . . .	33
1.7	Il ruolo della simulazione ad eventi discreti . . . . .	35
1.8	Considerazioni riassuntive . . . . .	37
1.9	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	38
<b>2</b>	<b>Progetto di reti logistiche e trasporti</b>	<b>39</b>
2.1	Funzioni dei nodi intermedi in una rete di distribuzione . . . . .	40
2.1.1	Riduzione dell'incertezza . . . . .	41
2.1.2	Il ruolo dei nodi intermedi nell'ottimizzazione dei trasporti . . . . .	43
2.2	Modelli di localizzazione e ottimizzazione dei flussi . . . . .	50
2.2.1	Il problema del trasporto . . . . .	51
2.2.2	Il problema del flusso a minimo costo . . . . .	53
2.2.3	Il problema della localizzazione di stabilimenti di produzione . . . . .	55
2.2.4	Un esempio riassuntivo: rilocalizzazione ed espansione della capacità di centri di distribuzione . . . . .	57
2.3	Modelli con costi non lineari . . . . .	60
2.4	Considerazioni riassuntive . . . . .	65
2.5	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	65
<b>3</b>	<b>Previsione</b>	<b>67</b>
3.1	L'oggetto della previsione . . . . .	68
3.2	Il processo di previsione . . . . .	70

*Indice*

---

3.3	Le misure dell'errore di previsione . . . . .	74
3.3.1	Il BIAS . . . . .	75
3.3.2	La Mean Absolute Deviation . . . . .	75
3.3.3	Il Root Mean Square Error . . . . .	76
3.3.4	Il Mean Absolute Error ed il Mean Absolute Percentage Error . . . . .	77
3.3.5	BIAS%, MAD%, RMSE% . . . . .	79
3.3.6	La statistica U di Theil . . . . .	81
3.3.7	Gli utilizzi degli indicatori di performance . . . . .	82
3.4	Una classificazione dei metodi di previsione . . . . .	83
3.5	La media mobile . . . . .	85
3.5.1	Il modello della domanda . . . . .	85
3.5.2	L'algoritmo . . . . .	86
3.5.3	La scelta dei parametri . . . . .	86
3.5.4	I limiti . . . . .	88
3.6	Lo smorzamento esponenziale semplice . . . . .	88
3.6.1	Il modello della domanda . . . . .	88
3.6.2	L'algoritmo . . . . .	88
3.6.3	La scelta dei parametri . . . . .	95
3.6.4	L'inizializzazione . . . . .	96
3.6.5	I limiti . . . . .	99
3.7	Lo smorzamento con trend . . . . .	100
3.7.1	Il modello della domanda . . . . .	100
3.7.2	L'algoritmo . . . . .	100
3.7.3	La scelta dei parametri . . . . .	101
3.7.4	L'inizializzazione . . . . .	101
3.7.5	I limiti . . . . .	103
3.8	Lo smorzamento con stagionalità . . . . .	105
3.8.1	Il modello della domanda . . . . .	105
3.8.2	L'algoritmo . . . . .	106
3.8.3	La scelta dei parametri . . . . .	107
3.8.4	L'inizializzazione . . . . .	108
3.8.5	I limiti . . . . .	109
3.9	Smorzamento con trend e stagionalità . . . . .	109
3.9.1	Il modello della domanda . . . . .	109
3.9.2	L'algoritmo . . . . .	110
3.9.3	L'inizializzazione . . . . .	110
3.10	La regressione lineare semplice . . . . .	112
3.10.1	La preparazione dei dati per l'uso della regressione . . . . .	118
3.11	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	119
<b>4</b>	<b>Gestione delle scorte in condizioni di certezza</b> . . . . .	<b>121</b>
4.1	Il lotto economico . . . . .	126
4.2	La robustezza del modello . . . . .	134
4.3	Il caso di lead time diverso da zero: il modello $(Q,R)$ . . . . .	136
4.4	Il caso di versamento progressivo . . . . .	137
4.5	Il caso multiprodotto . . . . .	139
4.5.1	Il caso di costi di ordinazione condivisi . . . . .	140

4.5.2	Il caso multiprodotto in presenza di vincoli sulla capacità di ordinazione . . . . .	141
4.6	Il caso di costi non lineari . . . . .	144
4.7	Il caso di domanda con variabilità nota . . . . .	147
4.8	Considerazioni riassuntive . . . . .	151
4.9	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	151
<b>5</b>	<b>Gestione delle scorte in condizioni di incertezza</b>	<b>153</b>
5.1	Il newsvendor problem . . . . .	162
5.1.1	Estensioni del newsvendor . . . . .	171
5.2	I problemi multi-periodali . . . . .	178
5.3	Gestione a quantità fissa: il modello $(Q,R)$ . . . . .	179
5.3.1	Ottimizzazione della gestione $(Q,R)$ in caso di costo legato alla dimensione dello stockout . . . . .	184
5.3.2	Gestione $(Q,R)$ in caso di vincolo sul livello di servizio type II . . . . .	189
5.3.3	Ottimizzazione della gestione $(Q,R)$ in caso di costo legato alla presenza dello stockout . . . . .	192
5.3.4	Gestione $(Q,R)$ in caso di vincolo sul livello di servizio type I . . . . .	195
5.4	Gestione a periodo fisso: modelli $S$ e $(s,S)$ . . . . .	196
5.5	Politica $S$ . . . . .	198
5.6	Politica $(s,S)$ . . . . .	203
5.7	Conclusioni . . . . .	205
5.8	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	206
<b>6</b>	<b>Gestione delle scorte in sistemi multi-stadio</b>	<b>207</b>
6.1	Metodi di gestione: Installation Stock ed Echelon Stock . . . . .	211
6.1.1	Le proprietà delle politiche Installation ed Echelon Stock . . . . .	214
6.2	Il coordinamento della filiera: l'effetto Bullwhip . . . . .	224
6.3	Sistema lineare deterministico a due livelli: il lotto economico a due stadi . . . . .	231
6.4	Sistema arborescente a due livelli: transit point con domanda incerta . . . . .	238
6.5	Sistema a lineare a due livelli: caso stocastico . . . . .	245
6.6	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	252
<b>7</b>	<b>Routing di veicoli</b>	<b>253</b>
7.1	Problemi di routing su reti . . . . .	254
7.2	Metodi per la soluzione del TSP simmetrico . . . . .	256
7.2.1	L'euristica del vicino più prossimo . . . . .	257
7.2.2	Euristiche basate sull'inserimento . . . . .	258
7.2.3	Metodi di ricerca locale . . . . .	259
7.3	Metodi per la soluzione del VRP base . . . . .	263
7.3.1	Metodi costruttivi per il VRP . . . . .	263
7.3.2	Metodi di decomposizione per il VRP: cluster first, route second . . . . .	270
7.4	Casi di VRP reali . . . . .	274
7.4.1	Metodi costruttivi per il VRP con time window . . . . .	276
7.5	Considerazioni riassuntive . . . . .	278
7.6	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	278

<b>A</b>	<b>Richiami di teoria delle probabilità e statistica</b>	<b>279</b>
A.1	Spazio campione, eventi, probabilità . . . . .	280
A.2	Probabilità condizionale e indipendenza . . . . .	282
A.3	Variabili casuali discrete . . . . .	286
A.3.1	Esempi di distribuzioni discrete . . . . .	290
A.4	Variabili casuali continue . . . . .	293
A.4.1	Esempi di distribuzioni continue . . . . .	297
A.5	Variabili casuali con distribuzione congiunta . . . . .	300
A.6	Indipendenza, covarianza e valori attesi condizionali . . . . .	302
A.6.1	Variabili casuali indipendenti . . . . .	302
A.6.2	Covarianza e correlazione . . . . .	303
A.6.3	Distribuzioni derivate dalla distribuzione normale e teorema limite centrale . . . . .	305
A.6.4	Valore atteso condizionale . . . . .	308
A.7	Processi stocastici . . . . .	312
A.8	Stima di parametri . . . . .	318
A.8.1	Covarianza e correlazione campionarie . . . . .	321
A.8.2	Intervalli di confidenza . . . . .	327
A.9	Test di ipotesi . . . . .	330
A.10	Regressione lineare semplice . . . . .	332
A.10.1	Il modello degli scarti quadratici . . . . .	333
A.10.2	Le proprietà degli stimatori . . . . .	337
A.10.3	Intervalli di confidenza e test di ipotesi sugli stimatori . . . . .	348
A.10.4	Le misure di performance della regressione lineare . . . . .	352
A.10.5	Verifica delle ipotesi . . . . .	355
A.10.6	L'utilizzo della regressione lineare per stimare relazioni non li- neari . . . . .	357
A.11	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	362
<b>B</b>	<b>Richiami di programmazione matematica</b>	<b>364</b>
B.1	Il ruolo e i limiti dell'ottimizzazione . . . . .	365
B.2	Modelli di ottimizzazione . . . . .	370
B.3	Insiemi e funzioni convesse . . . . .	373
B.4	Programmazione non lineare . . . . .	377
B.4.1	Il caso di vincoli di disuguaglianza . . . . .	380
B.4.2	Interpretazione economica dei moltiplicatori di Lagrange: i prez- zi ombra . . . . .	382
B.5	Programmazione lineare . . . . .	384
B.6	Programmazione lineare a numeri interi . . . . .	386
B.6.1	Metodi di soluzione <i>branch and bound</i> . . . . .	387
B.6.2	Costruzione di modelli a numeri interi . . . . .	392
B.7	Elementi di ottimizzazione multi-obiettivo . . . . .	395
B.8	Per ulteriori approfondimenti . . . . .	399
	<b>Bibliografia</b>	<b>400</b>