

**POLITECNICO DI MILANO**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA DEI SISTEMI**  
**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA GESTIONALE**



**PROCEDURA RSM PER LA CONFIGURAZIONE DI  
UNA PESATRICE MULTITESTA**

*Relatore:*

*Chiar.mo Prof. Quirico Semeraro*

*Candidato:*

*Alessia Beretta Matricola 735797*

**Anno Accademico 2009-2010**

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Il processo di confezionamento</b>	<b>4</b>
1.1 I produttori di macchine automatiche per il confezionamento . . . . .	4
1.1.1 La legislazione a tutela dei cittadini . . . . .	4
1.1.2 Le origini del settore e la sua storia in Italia . . . . .	7
1.1.3 Consistenza economica del settore in Italia . . . . .	10
1.2 Il mercato delle pesatrici multitesta . . . . .	16
1.2.1 Le aziende nel mondo . . . . .	17
1.2.2 Analisi economica del settore delle pesatrici in Italia . . . . .	18
1.3 Panoramica delle tecnologie utilizzate . . . . .	27
1.3.1 Dosaggio . . . . .	28
1.3.2 Confezionamento . . . . .	29
<b>2 Il problema della configurazione</b>	<b>33</b>
2.1 La pesatrice multitesta . . . . .	33
2.1.1 I principali componenti hardware delle pesatrici multitesta .	34
2.1.2 Il funzionamento di una pesatrice multitesta . . . . .	38
2.1.3 Analisi delle variabili principali del funzionamento . . . . .	44
2.2 Il problema della configurazione . . . . .	45
2.2.1 La modellizzazione delle variabili . . . . .	46
2.3 Funzione Obiettivo . . . . .	47
2.3.1 Analisi del problema . . . . .	47
2.3.2 La funzione di valutazione con controllo al 100% . . . . .	52
2.3.3 Analisi della funzione obiettivo . . . . .	55

---

<b>3</b>	<b>Il metodo di risoluzione</b>	<b>63</b>
3.1	Metodologia RSM . . . . .	63
3.1.1	Dettagli della procedura sequenziale . . . . .	69
3.1.2	Implementazione . . . . .	73
3.2	Il simulatore . . . . .	76
3.2.1	Principi Costruttivi . . . . .	82
3.2.2	Verifica del funzionamento del simulatore . . . . .	85
<b>4</b>	<b>Il caso aziendale</b>	<b>98</b>
4.1	Il Pastificio . . . . .	98
4.1.1	Il processo di confezionamento . . . . .	99
4.2	Funzione obiettivo . . . . .	101
4.3	Analisi dati . . . . .	103
4.3.1	Test statistici . . . . .	103
4.3.2	Dipendenza lineare tra la media $\mu_{w_i}$ e la deviazione standard $\sigma_{w_i}$ . . . . .	108
4.4	Configurazione proposta dall'azienda . . . . .	111
4.5	Validazione del simulatore coi dati reali . . . . .	113
4.6	Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda .	117
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>122</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>124</b>
<b>A</b>	<b>Indicatori economici</b>	<b>127</b>
<b>B</b>	<b>Analisi funzione obiettivo</b>	<b>129</b>
<b>C</b>	<b>Analisi dati reali</b>	<b>131</b>
C.0.1	Analisi grafica dei dati reali relativi alla produzione di ravioli	131
C.0.2	Analisi residui . . . . .	137
C.0.3	Analisi grafica dati reali relativi alla produzione di fusilli . .	139
C.0.4	Analisi residui . . . . .	145

# Elenco delle figure

1	Il macrosistema del processo di confezionamento. . . . .	2
1.1	Indicatori fondamentali di settore (2007-2009). . . . .	13
1.2	Ripartizione per aree delle esportazioni (2007-2009). . . . .	13
1.3	Ripartizione geografica delle esportazioni nel 2009. . . . .	14
1.4	Ripartizione geografica delle importazioni nel 2009. . . . .	15
1.5	Bilancia commerciale con i principali partners (2007-2009). . . . .	16
1.6	La prima pesatrice multitesta Ishida del 1972. . . . .	17
1.7	I produttori di pesatrici multitesta nel mondo. . . . .	18
1.8	I produttori di pesatrici multitesta in Europa. . . . .	18
1.9	I produttori di pesatrici multitesta in Italia. . . . .	20
1.10	Andamento del fatturato delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	21
1.11	Andamento dell'indice EBITDA/Fatturato delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	21
1.12	Performance delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	22
1.13	Andamento dell'indice valore aggiunto pro-capite delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	23
1.14	Andamento dell'indice ROI delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	23
1.15	Efficienza delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	24
1.16	Andamento dell'indice PFN/EBITDA delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	25
1.17	Andamento della leva finanziaria delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	25

---

1.18	Sostenibilità finanziaria delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta. . . . .	26
1.19	Schema delle fasi del dosaggio tradizionale. . . . .	29
1.20	Funzionamento di una confezionatrice verticale. . . . .	30
1.21	Funzionamento di una confezionatrice orizzontale. . . . .	31
2.1	La pesatrice multitesta. . . . .	34
2.2	Scivolo d'entrata. . . . .	35
2.3	Disco dispersore. . . . .	36
2.4	Canali radiali. . . . .	36
2.5	I cestelli predosatori e pesatori. . . . .	37
2.6	Schema di funzionamento di una pesatrice multitesta. . . . .	39
2.7	Funzionamento dei cestelli pesatori. . . . .	40
2.8	Variabili principali che influenzano il funzionamento di una pesatrice multitesta . . . . .	45
2.9	Andamento della funzione obiettivo al variare del ricavo unitario . .	57
2.10	Andamento della funzione obiettivo al variare del costo di rilavorazione	57
2.11	Andamento della funzione obiettivo al variare del costo unitario di materia prima . . . . .	57
2.12	Andamento della funzione obiettivo al variare della probabilità di confezioni conformi . . . . .	57
2.13	Andamento della funzione obiettivo al variare della media delle confezioni conformi . . . . .	58
2.14	Andamento della funzione obiettivo al variare della media delle confezioni non conformi . . . . .	58
2.15	Analisi della funzione obiettivo variando i parametri di costo. . . . .	59
2.16	Analisi della funzione obiettivo variando i parametri di processo . .	61
2.17	Analisi della funzione obiettivo al variare della probabilità di conformi	61
2.18	Analisi della funzione obiettivo al variare della quantità presente nei due cestelli della pesatrice multitesta . . . . .	62
3.1	Passi procedura RSM . . . . .	69
3.2	Piano composito centrale per $k=2$ . . . . .	74
3.3	Piani CCD per l'accostamento di modelli del secondo ordine . . . . .	75
3.4	Esempio di Inferiore e Superiore . . . . .	83

---

3.5	Calcolo del passo d'incremento . . . . .	86
3.6	Il piano sperimentale . . . . .	86
3.7	Esempio coefficienti regressione lineare semplice . . . . .	91
3.8	Esempio coefficienti regressione lineare multipla . . . . .	94
3.9	Esempio di scarica . . . . .	96
4.1	Processo di confezionamento per l'azienda in esame . . . . .	100
4.2	Test relativi al quarto cestello della produzione di ravioli . . . . .	104
4.3	P-value versus Alpha Nominale, nel caso di produzione ravioli. . . . .	105
4.4	Istogramma della quantità scaricata per i ravioli . . . . .	105
4.5	Test relativi al sesto cestello della produzione di fusilli . . . . .	106
4.6	P-value versus Alpha Nominale, nel caso di produzione fusilli. . . . .	107
4.7	Grafici relativi alla quantità scaricata per i fusilli . . . . .	108
4.8	Scatterplot dev.st vs media, nel caso di produzione ravioli. . . . .	109
4.9	Scatterplot dev.st vs media, nel caso di produzione fusilli. . . . .	110
4.10	Istogramma della funzione obiettivo di ravioli del pastificio versus il simulatore . . . . .	114
4.11	Istogramma FO dei ravioli per i soli valori maggiori di zero . . . . .	115
4.12	Istogramma della quantità confezionata di ravioli dal pastificio ver- sus il simulatore . . . . .	116
4.13	Istogramma della quantità confezionata di ravioli dal pastificio ver- sus il simulatore . . . . .	116
4.14	Istogramma della funzione obiettivo di ravioli: ottimizzazione versus situazione attuale . . . . .	118
4.15	Istogramma della quantità confezionata di fusilli in fase di ottimiz- zazione . . . . .	120
B.1	Analisi della funzione obiettivo di una pesatrice a due teste, di lato	129
B.2	Analisi della funzione obiettivo di una pesatrice a due teste, dall'alto	130
B.3	Analisi della funzione obiettivo di una pesatrice a due teste mediante le curve di livello . . . . .	130
C.1	Test di normalità cestello1, ravioli . . . . .	131
C.2	Test di normalità cestello2, ravioli . . . . .	132
C.3	Test di normalità cestello3, ravioli . . . . .	132

---

C.4	Test di normalità cestello5, ravioli . . . . .	132
C.5	Test di normalità cestello6, ravioli . . . . .	133
C.6	Test di normalità cestello7, ravioli . . . . .	133
C.7	Test di normalità cestello8, ravioli . . . . .	133
C.8	Test di normalità cestello9, ravioli . . . . .	134
C.9	Test di normalità cestello10, ravioli . . . . .	134
C.10	Analisi autocorrelazione cestello1, ravioli . . . . .	134
C.11	Analisi autocorrelazione cestello2, ravioli . . . . .	135
C.12	Analisi autocorrelazione cestello3, ravioli . . . . .	135
C.13	Analisi autocorrelazione cestello5, ravioli . . . . .	135
C.14	Analisi autocorrelazione cestello6, ravioli . . . . .	136
C.15	Analisi autocorrelazione cestello7, ravioli . . . . .	136
C.16	Analisi autocorrelazione cestello8, ravioli . . . . .	136
C.17	Analisi autocorrelazione cestello9, ravioli . . . . .	137
C.18	Analisi autocorrelazione cestello10, ravioli . . . . .	137
C.19	Grafici relativi alle analisi dei residui, ravioli . . . . .	138
C.20	Test di normalità cestello1, fusilli . . . . .	139
C.21	Test di normalità cestello2, fusilli . . . . .	139
C.22	Test di normalità cestello3, fusilli . . . . .	140
C.23	Test di normalità cestello4, fusilli . . . . .	140
C.24	Test di normalità cestello5, fusilli . . . . .	140
C.25	Test di normalità cestello7, fusilli . . . . .	141
C.26	Test di normalità cestello8, fusilli . . . . .	141
C.27	Test di normalità cestello9, fusilli . . . . .	141
C.28	Test di normalità cestello10, fusilli . . . . .	142
C.29	Analisi autocorrelazione cestello1, fusilli . . . . .	142
C.30	Analisi autocorrelazione cestello2, fusilli . . . . .	142
C.31	Analisi autocorrelazione cestello3, fusilli . . . . .	143
C.32	Analisi autocorrelazione cestello4, fusilli . . . . .	143
C.33	Analisi autocorrelazione cestello5, fusilli . . . . .	143
C.34	Analisi autocorrelazione cestello7, fusilli . . . . .	144
C.35	Analisi autocorrelazione cestello8, fusilli . . . . .	144
C.36	Analisi autocorrelazione cestello9, fusilli . . . . .	144
C.37	Analisi autocorrelazione cestello10, fusilli . . . . .	145

---

C.38 Grafici relativi alle analisi dei residui, fusilli . . . . . 145



# Elenco delle tabelle

1.1	Errori massimi tollerati dalla legge n° 690 - 1978. . . . .	5
2.1	Valori di default usati per studiare la funzione obiettivo. . . . .	56
3.1	Piano codificato con $k=3$ . . . . .	78
3.2	CCD circoscritto con $k=3$ . . . . .	81
3.3	I quattro casi . . . . .	83
3.4	Esempio di piano sperimentale . . . . .	86
3.5	Analisi del primo cestello . . . . .	87
3.6	Primo esempio di scelta . . . . .	88
3.7	Secondo esempio di scelta . . . . .	88
3.8	Terzo esempio di scelta . . . . .	89
3.9	Esempio di variabile di risposta . . . . .	90
3.10	Calcolo del punto stazionario . . . . .	95
3.11	Verifica funzionamento simulatore con due cestelli . . . . .	97
4.1	Dati relativi alle Pesatrici Multitesta utilizzate in azienda . . . . .	99
4.2	Valori dei ricavi e dei costi dei prodotti in esame . . . . .	103
4.3	Esito test di normalità nel caso di produzione di ravioli. . . . .	105
4.4	Esito test normalità nel caso di produzione di fusilli. . . . .	107
4.5	Indici statistici, nel caso di produzione ravioli. . . . .	109
4.6	Indici statistici, nel caso di produzione fusilli. . . . .	110
4.7	Configurazione proposta dall'azienda nel caso di produzione ravioli .	112
4.8	Dati azienda produzione ravioli . . . . .	112
4.9	Configurazione proposta dall'azienda nel caso di produzione fusilli .	112
4.10	Dati azienda produzione fusilli . . . . .	112

---

4.11	Profitto atteso: Azienda versus simulatore, nel caso di produzione ravioli . . . . .	115
4.12	Profitto atteso: Azienda versus simulatore, nel caso di produzione fusilli . . . . .	117
4.13	Miglioramento configurazione nel caso di produzione ravioli . . . . .	118
4.14	Dati relativi al miglioramento ottenuto per i ravioli . . . . .	118
4.15	Profitto atteso: Azienda versus ottimizzazione, nel caso di produzione ravioli . . . . .	119
4.16	Miglioramento configurazione nel caso di produzione fusilli . . . . .	120
4.17	Dati azienda produzione fusilli . . . . .	120
4.18	Profitto atteso: Azienda versus ottimizzazione, nel caso di produzione fusilli . . . . .	121

## Sommario

L'obiettivo del lavoro è lo studio del funzionamento delle pesatrici multitesta per sfruttare le potenzialità teoriche offerte dalla struttura logica/fisica della macchina. Le motivazioni alla base di questa scelta sono due: la letteratura presente a riguardo è di ordine puramente commerciale e nella corrente realtà industriale tali macchine vengono impostate basandosi sull'esperienza pregressa. Inoltre non esiste una relazione nota che leghi i parametri di settaggio della macchina con la precisione del confezionamento. Si ritiene che un simile approccio non sia a lungo compatibile con il crescente numero di campi in cui le pesatrici multitesta trovano applicazione.

La pesatrice multitesta offre diverse occasioni di approfondimento: assumendo di non poter cambiare la struttura fisica della macchina si è deciso di concentrarsi sul *canning problem*. Tuttavia per affrontare tale problema non è possibile far riferimento a nessun modello presente in letteratura. È necessario tener in considerazione che la quantità confezionata è una variabile aleatoria la cui distribuzione è ignota; inoltre il controllo sulla quantità confezionata deve permettere il soddisfacimento della legge italiana n°690 (1978).

Si è deciso quindi di approfondire il problema della configurazione, cioè la determinazione delle quantità medie che riempiono i cestelli, dal momento che esso influenza la determinazione dei parametri della distribuzione di probabilità delle quantità che caricano i singoli cestelli. Ciò influenza in maniera determinante il peso associato alle singole combinazioni e, perciò, le alternative che l'algoritmo di gestione si trova a valutare e, dunque, la bontà della soluzione scelta. Per risolvere tale problema si è deciso di sfruttare la metodologia della superficie di risposta (RSM), ovvero un insieme di tecniche matematiche e statistiche utili per la modellizzazione di quelle applicazioni in cui la risposta d'interesse è in funzione di molte variabili e l'obiettivo è l'ottimizzazione della risposta. Tale procedura è stata implementata in un simulatore che data una configurazione di partenza è in grado di individuarne una statisticamente migliore.

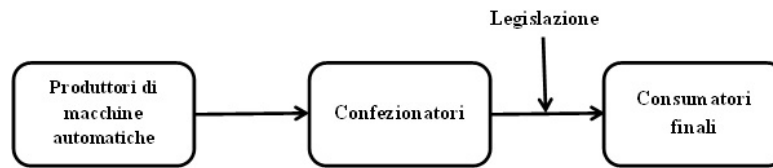
# Introduzione

Lo sviluppo tecnologico è entrato sempre più a far parte della nostra vita quotidiana, a volte senza neanche rendercene conto. Una prova tangibile è rappresentata proprio dai prodotti confezionati, che col passare degli anni hanno popolato sempre più gli scaffali dei supermercati. Dai prodotti storici come la pasta secca, ormai confezionata da almeno un cinquantennio, si è giunti oggi a confezionare prodotti freschi come le mozzarelle e la verdura. Questa scelta comporta dei vantaggi sia per il consumatore finale che per il distributore. Il consumatore può acquistare un prodotto igienicamente migliore, più facilmente controllabile e più comodo da utilizzare. Il distributore viene facilitato nel trasporto, nella movimentazione e nello stoccaggio, senza dimenticare i vantaggi di una migliore esposizione del prodotto e di una più facile identificazione dello stesso grazie ai codici a barre. L'aumento delle quantità e del numero di prodotti da confezionare, ha spinto i costruttori di macchine per il confezionamento alla ricerca di soluzioni automatizzate ad alta produttività.

Gli attori del macrosistema del processo di confezionamento sono (Figura 1): i produttori delle macchine per imballaggio, i confezionatori (ovvero coloro che utilizzano tali macchinari), i distributori dei prodotti confezionati e i consumatori finali. Questi ultimi sono tutelati dallo Stato il quale persegue i confezionatori che imbustano una quantità di prodotto sensibilmente inferiore alla quantità nominale indicata sulla confezione. Al pari della certificazione, allora lo Stato esercita il ruolo di ente terzo.

In questa tesi si focalizzerà l'attenzione sul ruolo e sulla tecnologia delle pesatrici multitesta, sia dal punto di vista dei produttori che degli utilizzatori di tali macchine.

Il compito di una pesatrice multitesta è quello di individuare le quantità che



**Figura 1:** Il macrosistema del processo di confezionamento.

andranno confezionate partendo dal flusso continuo di prodotto sfuso. Una confezionatrice a valle provvederà a raccogliere le quantità scaricate e a racchiuderle nell'apposito involucro. La pesatrice, dunque, non deve solo pesare il prodotto, ma anche dosarlo in modo tale che la quantità contenuta in ogni confezione sia conforme ai dettami della legge n° 690 del 25-10-1978. Ovviamente perché il confezionamento sia economico, la quantità in ogni confezione deve eccedere il meno possibile il peso dichiarato sulla confezione. A causa di queste esigenze, la pesatrice deve poter scegliere, tra le quantità che si avvicinano o superano il valore nominale della confezione, quella che meno si discosta da detto valore. Esercitare una scelta implica una varietà fra cui scegliere. Tale varietà è ottenuta dotando la pesatrice di un certo numero di cestelli riempiti con delle dosi parziali della quantità nominale. Dunque, in ogni cestello della pesatrice è contenuta una quantità minore o uguale a quella che dovrà essere confezionata, ed inoltre la somma di tutte le quantità supera la quantità da confezionare. Grazie a questa condizione, la pesatrice multitesta esplora idealmente tutte le possibili combinazioni di cestelli, e decide la combinazione di questi la cui quantità complessivamente contenuta è più prossima alla quantità nominale da confezionare. La novità introdotta da queste macchine è di carattere logico: non si distinguono più un'operazione di sgrossatura ed una di finitura susseguente. Questa soluzione infatti penalizzava fortemente il tempo di ciclo e dunque la produttività della macchina.

L'obiettivo del lavoro di tesi è quello di studiare il funzionamento delle pesatrici multitesta in modo tale da sfruttare le potenzialità teoriche offerte dalla struttura logica/fisica della macchina. Le considerazioni che hanno motivato questa scelta sono fondamentalmente due:

- la letteratura presente relativamente alle pesatrici multitesta è di ordine puramente commerciale;

- nella corrente realtà industriale le pesatrici vengono impostate basandosi sull'esperienza pregressa. Per tali macchine infatti, non esiste una relazione nota che legghi i parametri di settaggio della macchina con la precisione del confezionamento.

A fronte di un'indubbia difficoltà di schematizzazione si ritiene che un simile approccio non sia a lungo compatibile con il crescente numero di campi in cui le pesatrici multitesta trovano applicazione. Dalle numerose occasioni di approfondimento offerte dalle pesatrici multitesta, si è scelto di concentrarsi sul problema della configurazione, in altre parole sul problema della determinazione delle quantità medie che riempiono i vari cestelli della pesatrice. Il lavoro di tesi cercherà di proporre un metodo di risoluzione di tale problema mediante l'utilizzo della metodologia della superficie di risposta (RSM).

La procedura RSM (Response Surface Methodology) è caratterizzata un insieme di tecniche matematiche e statistiche, utili nella modellizzazione e nell'analisi di problemi in cui la risposta d'interesse è caratterizzata da diverse variabili e l'obiettivo è ottimizzare tale risposta.

Il lavoro si articola in quattro capitoli: nel primo capitolo si presenta il settore delle macchine automatiche, lo si caratterizza mediante un'analisi economica concentrandosi maggiormente sul mercato delle pesatrici multitesta in Italia. Nel secondo capitolo si propone una descrizione dello stato dell'arte delle pesatrici e del loro funzionamento, in seguito si cerca di formalizzare il problema della configurazione. Il capitolo termina con la definizione della funzione obiettivo e la sua analisi. Nel terzo capitolo dopo una breve introduzione alla procedura RSM, si descrive il funzionamento del simulatore verificando che esso implementi la logica desiderata. Nel quarto e ultimo capitolo si analizzano i dati reali raccolti in azienda, si confrontano con quelli generati dal simulatore e in ultimo si prova a proporre una configurazione statisticamente migliore rispetto a quella attualmente utilizzata in azienda.

# Capitolo 1

## Il processo di confezionamento

In questo capitolo, dopo aver introdotto e analizzato il settore delle macchine automatiche per il confezionamento, si focalizzerà l'attenzione sui produttori di pesatrici multitesta. Verrà effettuata una prima analisi del settore a livello mondiale, per poi entrare più nello specifico del settore italiano. In ultimo si presenteranno le tecnologie utilizzate nel processo di confezionamento, per capire in quale fase produttiva possa risultare efficace/efficiente l'utilizzo di una pesatrice multitesta.

### 1.1 I produttori di macchine automatiche per il confezionamento

Gli attori del processo di confezionamento sono tre: i produttori delle macchine per imballaggio, i confezionatori (ovvero coloro che utilizzano tali macchinari), i distributori dei prodotti confezionati e i consumatori finali.

#### 1.1.1 La legislazione a tutela dei cittadini

I consumatori finali sono tutelati dallo Stato il quale persegue i confezionatori che imbustano una quantità di prodotto sensibilmente inferiore alla quantità nominale indicata sulla confezione. Al pari della certificazione, lo Stato esercita il ruolo di ente terzo. La legge che si occupa di questo argomento è la n° 690 del 25 ottobre 1978 “Adeguamento dell'ordinamento interno alla direttiva del consiglio delle Comunità europee n° 76/211/C.e.e relativa al precondizionamento in massa

o in volume di alcuni prodotti in imballaggi preconizionati”. Tale normativa è stata più volte aggiornata e ritoccata senza però intaccare mai la sostanza della legge del 1978. Si riporta ora una sintesi dei contenuti di detta normativa partendo dalla definizione del campo di applicazione e della terminologia utilizzata. La legge si applica agli imballaggi preconizionati C.e.e. che non contengono liquidi e vengono venduti in quantità unitarie costanti pari a valori prefissati dal produttore. L’indicazione della quantità nominale contenuta nell’imballaggio deve essere espressa in unità di massa o di volume. La legge si riferisce ad imballaggi contenenti quantità superiori o uguali a 5 grammi o millilitri e inferiori o uguali a 10 chilogrammi o litri. Per imballaggio preconizionato o preimballaggio si intende l’insieme costituito dal prodotto e dall’imballaggio individuale nel quale tale prodotto è preconizionato. Un prodotto è preconizionato quando è contenuto in un imballaggio di qualsiasi tipo chiuso in assenza dell’acquirente e preparato in modo che la quantità in esso contenuta abbia un valore prefissato e non possa essere modificata senza aprire l’imballaggio stesso, alterandone palesemente la forma. La “massa o volume nominale” è la massa o il volume dichiarato sull’imballaggio, corrispondente alla quantità che si ritiene debba esser contenuta all’interno della confezione. Il contenuto effettivo di un imballaggio è invece la quantità in termini di volume o di massa di prodotto che esso contiene realmente. Si definisce “errore in meno” la differenza tra il contenuto effettivo dell’imballaggio preconizionato e la sua quantità nominale dichiarata. La legge fissa gli errori in meno massimi tollerati. Essi sono riportati in Tabella 1.1:

Quantità (ml - g)	Errore max tollerato in meno	
	percentuale	g - ml
5 - 50	9	-
50 - 100	-	4,5
100 - 200	4,5	-
200 - 300	-	9
300 - 500	3	-
500 - 1000	-	15
1000 - 10000	1,5	-

**Tabella 1.1:** Errori massimi tollerati dalla legge n° 690 - 1978.



Inoltre la legge prescrive che:

- il contenuto effettivo degli imballaggi preconizionati non deve essere inferiore, in media, alla quantità nominale;
- nessun imballaggio che presenti un errore in meno superiore all'errore massimo tollerato può essere posto in commercio;
- la percentuale di imballaggi preconizionati che presentano un errore in meno superiore all'errore massimo tollerato (tali confezioni sono indicate come difettose) deve essere, nel 95% dei casi, minore o uguale al 2.5%.

La responsabilità legale relativa al rispetto di tali disposizioni è del confezionatore. Per la verifica di tali disposizioni la legge propone una procedura statistica composta di due parti:

1. un piano di accettazione per attributi al fine di verificare che il numero di confezioni difettose presenti nel lotto soddisfi i requisiti di legge;
2. un test sulla media della quantità scaricata per controllare che questa sia maggiore o uguale alla quantità nominale.

Il piano di accettazione per attributi proposto è quello definito dalla norma MIL STD 105 D. Per maggiori dettagli su tali piani di accettazione si veda, ad esempio, [Mon91]. La verifica del valore della media della quantità confezionata, come detto, prevede un test statistico. Detto:

$n$  = la numerosità del campione prelevato dal lotto di produzione. Il suo valore dipende dall'entità del lotto stesso;

$Nom$  = la quantità nominale della confezione;

$l$  = indice delle confezioni appartenenti al campione,  $l = 1, \dots, n$ ;

$Q_l$  = la quantità di prodotto contenuta nella  $l$ -esima confezione del campione;

$\bar{Q}$  = media campionaria definita come  $\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}$ ;

$S_n$  = deviazione standard campionaria definita come  $S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}$ ;

$LCL$  = limite di controllo inferiore definito come  $LCL = T - \frac{t_{0,005}(n-1)}{\sqrt{n}} \cdot S_n$ ;

Il lotto supera il controllo di legge sulla media della quantità confezionata se:

$$\bar{Q} \geq LCL$$

Si osserva che la legge implicitamente assume che:

- $Q_i$  sia una quantità aleatoria che segue una distribuzione di probabilità gaussiana;
- il processo di confezionamento sia instabile e che quindi sia necessario, ad ogni ciclo di lavoro, calcolare la media e la deviazione standard campionaria.

Si fa notare che i campioni di confezioni che sono necessari per le verifiche proposte dalla legge sono diversi, di numerosità dipendente dalla dimensione del lotto di produzione e separati.

La normativa non impedisce lo sviluppo di procedure di controllo differenti da quelle proposte, come per esempio l'utilizzo di bilancia in grado di controllare al 100% le confezioni prodotte, previa approvazione da parte del Ministero dell'industria.

### 1.1.2 Le origini del settore e la sua storia in Italia

*Packaging* vuol dire confezionamento. Il tubetto, la scatola, la bottiglia, l'incarto, il *blister* che contiene una compressa o una polvere conservano il prodotto, ne accrescono il valore, ne aumentano la durata e la validità, lo rendono più attraente, ne facilitano la distribuzione nel mercato dei generi di consumo. Il *packaging* assolve dunque sia alla classica esigenza della conservazione del prodotto, ma anche al miglioramento dello stesso. Dunque il *packaging* si può dire esprima la funzione di vendita di un prodotto. Affinché il tutto sia fatto con criterio, è necessaria la conoscenza di ciò che si vuol vendere, delle esigenze dell'acquirente, dei materiali compatibili con il prodotto, delle soluzioni grafiche e funzionali adottate. Dal punto di vista produttivo è inoltre richiesta la progettazione, realizzazione e l'impiego di macchine operatrici complesse, veloci, flessibili, che sostituiscano l'opera umana.

La prima macchina automatica per il confezionamento apparì all'Esposizione Universale di Parigi nel 1867. In quella occasione i visitatori poterono ammirare una macchina, ideata dal signor Devenick, che allineava, alzava, pesava ed incartava delle tavolette di cioccolato saldando la confezione con la cera. In quel periodo, nonostante la meraviglia suscitata da tale ingegnosa macchina, i consumatori accolsero i primi prodotti confezionati automaticamente della storia con una certa diffidenza. Essi erano infatti preoccupati di non poter più controllare la qualità

degli acquisti. Questo spiega anche l'abbondante utilizzo di immagini rassicuranti e familiari sulle prime confezioni.

*Packaging* significa soprattutto produzione di massa. Quindi furono gli Stati Uniti a sviluppare a livello industriale, tra la fine dell'Ottocento e i primi decenni del Novecento, il processo della trasformazione e conservazione di prodotti da immettere sul mercato nazionale ed internazionale. Inizialmente esisteva uno stretto legame tra le industrie produttrici di beni di consumo e la produzione di macchine per confezionarli. Poi, soprattutto in Europa ed in particolare in Italia, questa situazione si modificò perché era necessario disporre di soluzioni sempre più flessibili e adatte a soddisfare esigenze sempre più personalizzate. Dunque l'industria delle macchine automatiche, posta in essere dal mercato dei prodotti di massa, si sarebbe poi sviluppata con caratteristiche molto diverse dal modello produttivo ed organizzativo che ne ha determinato l'esistenza, diventando una produzione a specializzazione flessibile, per piccole serie, per singoli prototipi sempre più adattabili alle esigenze dei clienti. Questo spiega il massiccio ricorso alla subfornitura che ancora oggi caratterizza tale settore. L'organizzazione era, ed è tutt'oggi, molto diversa da quella tayloristica. Gli operai hanno competenze fortemente specializzate quasi sempre acquisite in precedenti corsi di formazione.

I materiali storici dell'imballaggio sono stati il vetro, la banda stagnata, la carta. A partire dal 1930 però entrò in campo un materiale che più di ogni altro permise all'industria del confezionamento di fare un salto verso il miglioramento del prodotto confezionato: il *cellophane*. Questo si affermò negli Stati Uniti, diventando il materiale di riferimento già a partire dagli anni '50-'60. I suoi vantaggi erano e sono tutt'ora: la flessibilità a bassa temperatura, la lunghissima durata, la possibilità di essere saldato a caldo, ma soprattutto il *cellophane* restituisce ai consumatori la possibilità di vedere e controllare il prodotto prima dell'acquisto. Nel secondo dopoguerra la supremazia americana venne meno lasciando la leadership ai produttori europei che, con più decisione, seguirono la strada della diversificazione e della flessibilità. Se i tedeschi detenevano il primato delle esportazioni, erano gli italiani che più rapidamente rispondevano alle esigenze dei clienti che richiedevano macchine flessibili. Bologna divenne nel secondo dopoguerra una capitale per la produzione di macchine per il confezionamento, dosatura ed imballaggio. Tutto il contesto locale promosse questa affermazione con la presenza di officine meccaniche pronte all'innovazione e mettendo a disposizione maestranze tecniche con qualifi-

cate capacità progettuali ed organizzative. Questa realtà affonda le radici in una cultura meccanica di antica tradizione che ha accompagnato la storia produttiva della città sin dai secoli XVI-XVIII con i mulini da seta fino agli odierni successi della Ducati, della Ferrari, etc. Questa cultura, tra l'Otto e Novecento, veniva impartita all'Istituto Aldini-Valeriani per le Arti e i Mestieri. Tale istituto ha avuto un ruolo fondamentale nello sviluppo dell'industria delle macchine automatiche nel bolognese poiché ha fornito delle competenti maestranze tecniche. La scuola, nata dai lasciti di Luigi Valeriani e Giovanni Aldini, si proponeva di formare giovani apprendisti meccanici. L'ingegnere e la sua cultura insieme all'abilità professionale dei maestri-operai, costituivano il quadro di riferimento per scegliere parti del sapere ritenute fondamentali per misurare, controllare, predisporre macchine, fare calcoli, conoscere proprietà e caratteristiche dei materiali, capire ed interpretare il linguaggio del disegno tecnico.

L'avvio della produzione di macchine automatiche a Bologna ha una data precisa: 1924, anno della costituzione dell'ACMA (Anonima Costruzione Macchine Automatiche). Essa fu creata da Gaetano Barbieri, socio insieme ad Arturo Gazzoni nella ditta che realizzava le cartine di Idrolitina. Le prime macchine dell'ACMA erano dedicate allo stampaggio delle cartine, al dosaggio del prodotto e al suo confezionamento. Nella sua storia, l'ACMA ha avuto dipendenti come Bruto Carpegiani, geniale progettista meccanico che innovò la produzione dell'ACMA e formò intorno a sé un gruppo di progettisti che diedero lustro all'industria delle macchine automatiche bolognese nei decenni a venire. L'ACMA da una parte, e l'Istituto Aldini-Valeriani dall'altra, sono state le "palestre" in cui sono cresciuti gli imprenditori dell'industria del confezionamento.

La maggior parte delle aziende del settore oggi ha dimensioni medio - piccole. Questo ha una ragione storica che va cercata nell'immediato secondo dopoguerra. Infatti, se durante il conflitto l'industria era stata trascinata dall'economia di guerra, al termine delle ostilità molte aziende del bolognese furono smobilitate. Ci furono più di 9000 licenziamenti tra il 1948 e il 1954 a Bologna. Questo evento ebbe però degli aspetti positivi in quanto ci fu una forzata mobilità di operai specializzati che poterono così dare vita a piccole aziende meccaniche che costituiscono ancora oggi un polmone di enorme importanza nella "*Packaging Valley*".

### 1.1.3 Consistenza economica del settore in Italia

L'industria italiana delle macchine per il confezionamento e l'imballaggio è costituita da circa 150-200 aziende di dimensioni industriali, cui si aggiungono circa 100 unità produttive con caratteristiche artigianali. Le aziende sono localizzate per quasi l'80% in Emilia-Romagna, dove si trova la maggior concentrazione di settore al mondo, in Lombardia, in Piemonte e in Veneto. Vera e propria capitale produttiva è Bologna, nella cui provincia si trova la cosiddetta "*Packaging Valley*". La leadership del settore è detenuta dai produttori europei, tedeschi e italiani, che insieme rappresentano un terzo della produzione mondiale. Importanti costruttori di macchine automatiche sono anche Stati Uniti, Cina e Giappone, la cui produzione è però destinata quasi solo ed esclusivamente ai mercati interni. Germania e Italia, invece, coprono i 2/3 del commercio internazionale di settore, ossia macchine vendute in un Paese diverso da quello di produzione, confermando così la leadership anche sui mercati internazionali. La maggior parte della produzione delle macchine per il confezionamento e l'imballaggio viene assorbita dal comparto alimentare (oltre il 40% del fatturato del settore) e da quello farmaceutico-cosmetico-toilettries, poco meno del 25%. Il restante viene impiegato in settori diversi, tra i quali spiccano quello del tabacco (in cui l'industria italiana delle macchine vanta una grande tradizione) il comparto chimico-petrochimico e quello del tissue.

Ricerche sull'eccellenza nella gestione aziendale hanno appurato che le ragioni del successo dell'industria italiana sono:

1. l'estrema flessibilità produttiva associata a grande affidabilità e capacità di innovazione tecnologica;
2. il forte orientamento al cliente, con una produzione realizzata su misura per le esigenze specifiche delle singole imprese e grande attenzione agli aspetti di progettazione, sperimentazione, controllo della qualità, analisi della clientela. L'industria delle macchine automatiche fa del naturale orientamento al bello che caratterizza gli italiani, uno dei suoi punti di forza, riuscendo a comprendere e soddisfare a pieno le esigenze estetiche e di *marketing* del cliente conciliandole con quelle tecnico/costruttive;

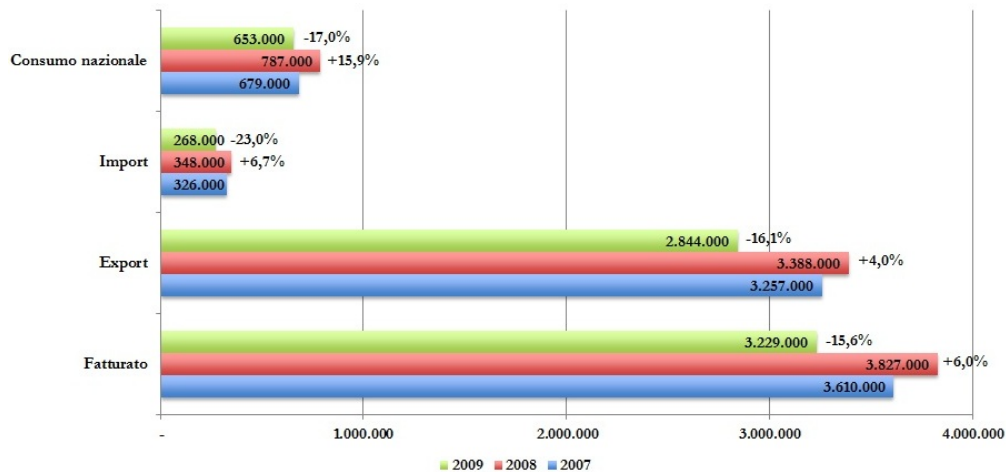
3. la forte competitività delle aziende produttrici, grazie ad un'ottimale convivenza di grandi gruppi integrati e di piccole e medie imprese altamente specializzate oltre che ad una intera gamma di macchinari per tutte le tipologie di prodotto;
4. il tessuto industriale in cui queste aziende vivono, dove è presente un'elevata professionalità nella meccanica fine, che si perpetua grazie a un'eccellente attività di formazione per i giovani e ad una grande attenzione alla valorizzazione del capitale umano.

L'industria italiana ha saputo rafforzare le sue posizioni sia nei periodi di congiuntura favorevole sia in quelli di congiuntura sfavorevole, e ha saputo confrontarsi in modo adeguato con i fattori di cambiamento. In particolare negli ultimi anni, le aziende italiane hanno aggiunto tecnologie elettroniche d'avanguardia alle tradizionali tecnologie meccaniche (*leadership* nel campo della mecatronica) e sono state in grado di seguire le tendenze di mercato offrendo sempre più spesso linee integrate d'imballaggio anziché macchine singole. Le diverse imprese hanno inoltre investito enormi risorse nelle attività di ricerca e sviluppo in alcune aree strategiche, per esempio si sono interessate ai materiali da imballo innovativi e a basso impatto ambientale. In ultimo la globalizzazione dei mercati ha costretto le aziende a dotarsi di centri di servizio con tecnici specializzati in ogni località in cui è venduta una macchina.

Nel 2009, le imprese italiane, per far fronte agli effetti della crisi finanziaria mondiale, cui il settore delle macchine automatiche non è stato immune, anche se con ricadute minori rispetto agli altri comparti industriali, hanno cercato di reagire mediante un'attenta riduzione degli sprechi energetici ed un utilizzo parsimonioso di materie prime. Inoltre tutti gli attori coinvolti, dai lavoratori agli imprenditori, hanno moltiplicato gli sforzi cercando di ottimizzare le modalità di investimento delle risorse interne, attraverso un'attenta riorganizzazione. Si è osservato un aumento della capacità produttiva che ha innescato un circolo virtuoso che coinvolge l'intera filiera dei fornitori e che ha portato alla realizzazione di macchinari e tecnologie più performanti. In ultimo le diverse aziende hanno ridotto il fabbisogno finanziario riducendo proporzionalmente l'apporto di capitale di debito e aumentando il capitale d'impresa.

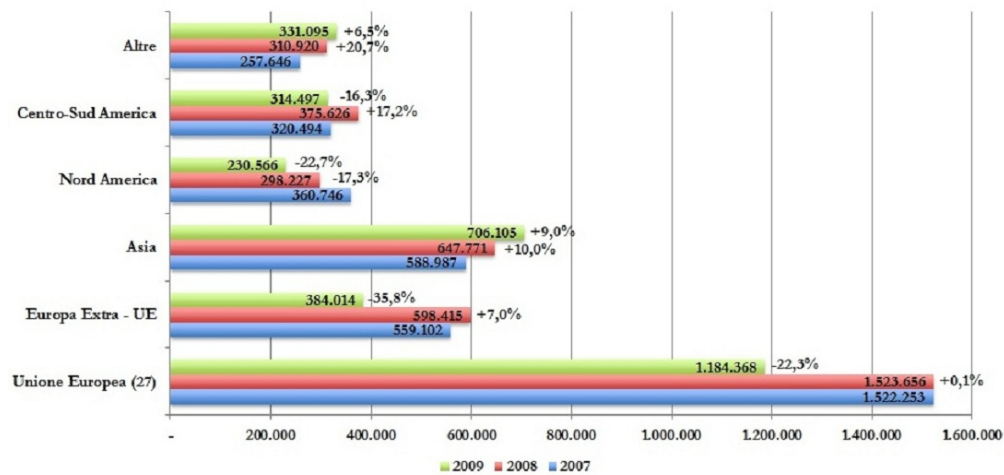
La crisi finanziaria, iniziata nel 2008, si è trasferita all'economia reale nel corso del 2009. In primo luogo si è potuto osservare la riduzione del PIL mondiale di 2 punti percentuali, secondo le stime del Fondo Monetario Internazionale. L'impatto della crisi sulle economie dei paesi sviluppati è avvenuto in modo differenziato provocando, nei paesi con un'ampia base industriale (Germania, Italia, e Giappone), riduzioni del PIL maggiori di quelle registrate nei paesi più orientati verso i servizi e la finanza. Il punto più basso del ciclo economico è stato toccato nel primo trimestre del 2009. Già a partire dal secondo trimestre la situazione ha cominciato a stabilizzarsi e, dopo l'estate, sono apparsi i primi timidi segni di ripresa per quanto riguarda le aspettative, gli scambi e la produzione industriale.

Il primo effetto negativo della recessione mondiale è stato l'arresto di un decennio di crescita ininterrotta sia in termini di fatturato che di esportazioni. Nonostante le difficoltà, i costruttori italiani hanno comunque saputo mostrare una notevole capacità di resistenza che ha permesso loro di superare il 2009 con performance mediamente migliori rispetto al complesso dei produttori di beni strumentali italiani. Un'altra conseguenza della crisi finanziaria è stata la flessione del fatturato di settore del 15,6% rispetto al 2008, come si osserva in Figura 1.1. Inoltre le esportazioni al netto delle macchine per gassare le bevande, nel 2009, sono state pari a 2.844 milioni con una flessione del 16,1% su base annua. Rispetto al 2008, l'incidenza dell'*export* sul fatturato di settore è leggermente diminuita passando dall'88,5% all'88,1%. Per quanto riguarda le importazioni complessive di macchine automatiche per il confezionamento e l'imballaggio sono anch'esse diminuite, attestandosi a 268 milioni di euro. Di conseguenza il saldo commerciale di settore, nel 2009, è stato positivo per 2.576 milioni dando un significativo contributo alla bilancia commerciale italiana.



**Figura 1.1:** Indicatori fondamentali di settore (2007-2009). Sull'asse delle ascisse sono posizionati i valori in migliaia di Euro, sull'asse delle ordinate sono riportati gli indicatori caratteristici.

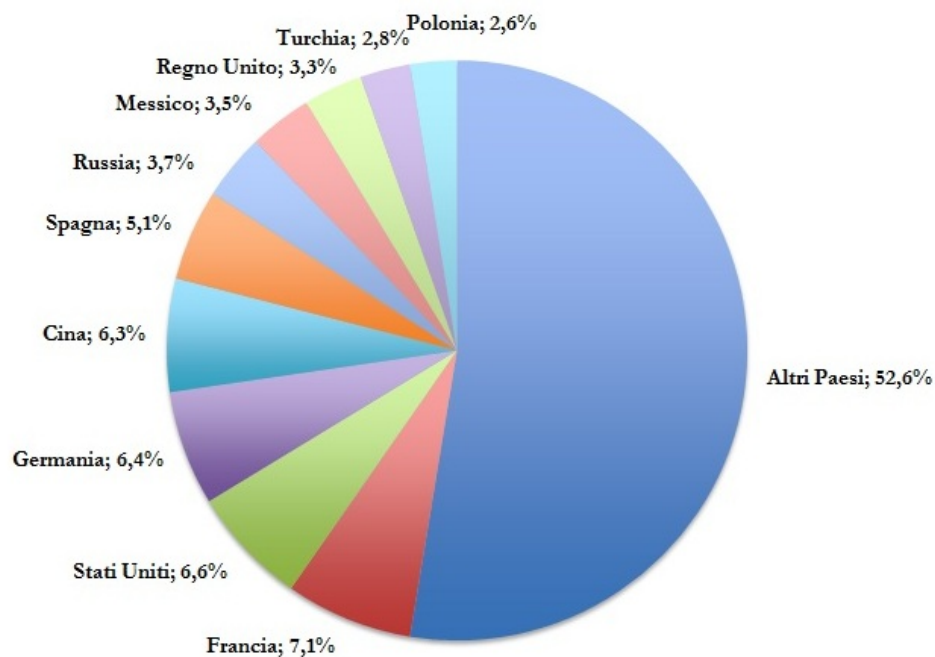
Entrando maggiormente nel dettaglio, le esportazioni di macchine automatiche per il confezionamento e l'imballaggio hanno fatto registrare, per quasi tutto il 2009, un *trend* decrescente rispetto all'anno precedente (Figura 1.1). Solo nell'ultimo bimestre dell'anno le vendite all'estero hanno mostrato segnali di inversione di tendenza pur restando ancora in terreno negativo.



**Figura 1.2:** Ripartizione per aree delle esportazioni (2007-2009). Sull'asse delle ordinate si riportano le aree di esportazione, mentre sull'asse delle ascisse si trovano i corrispondenti valori espressi in migliaia di Euro.



Per quanto riguarda le esportazioni all'interno dell'Unione Europea è possibile osservare che la vendita di macchine automatiche per il packaging è stata caratterizzata da una flessione del 22,3% per un totale di 1.184,4 milioni. Nonostante ciò l'Unione Europea resta il principale mercato di sbocco per i costruttori italiani con una quota del 37,6% delle vendite complessive. Le esportazioni invece nei paesi extra UE hanno avuto un andamento peggiore, registrando una flessione del 35,8%.



**Figura 1.3:** Ripartizione geografica delle esportazioni nel 2009.

I risultati delle importazioni italiane di macchine automatiche non ci sorprendono, anch'esse riflettono l'andamento negativo della domanda interna e dell'accresciuta competitività dei costruttori italiani sul mercato domestico. Nel 2009 le importazioni sono state di 268 milioni con un calo complessivo del 23,0% rispetto all'anno precedente. La flessione più significativa degli acquisti dall'estero ha interessato l'Unione Europea che è tradizionalmente il principale fornitore del mercato italiano. Le importazioni complessive sono state di 204,5 milioni e sono diminuite del 28,4% rispetto al 2008. In Figura 1.4 è rappresentata la ripartizione geografica delle importazioni nel 2009.

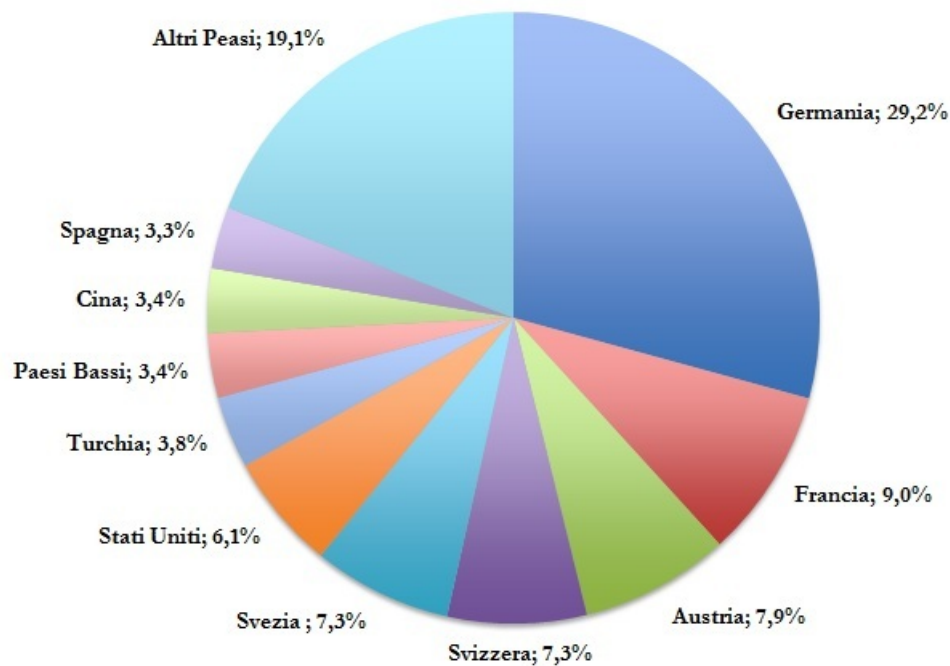
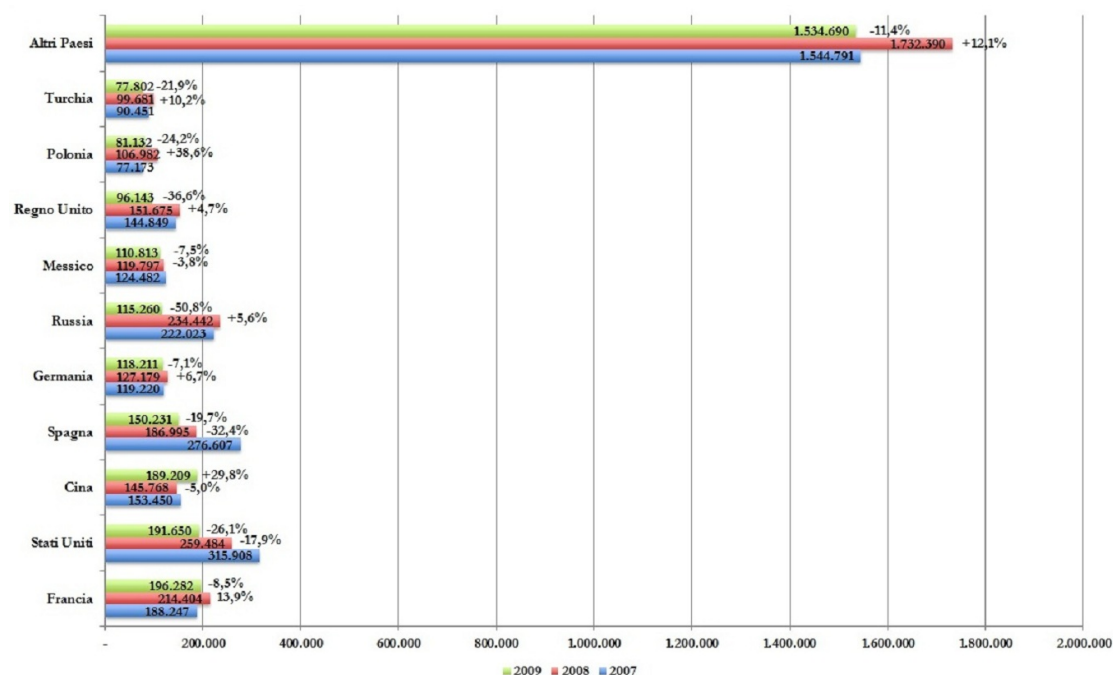


Figura 1.4: Ripartizione geografica delle importazioni nel 2009.

Infine ponendo l'attenzione sul saldo della bilancia commerciale di settore (Figura 1.5), si nota che rimane positivo anche nel 2009, nonostante siano evidenti gli effetti della crisi economica. La diminuzione congiunta sia delle importazioni, sia delle esportazioni ha causato la prima contrazione del saldo complessivo dopo un decennio di crescita ininterrotta. Il saldo commerciale di settore è pari a quasi l'80% del fatturato complessivo. Valore estremamente elevato che rappresenta una delle migliori performance fra tutti i settori industriali del paese. Comparti ben più noti del Made in Italy, hanno risultati proporzionalmente inferiori a quelli del comparto delle macchine automatiche, come ad esempio quelli identificati con le così dette quattro A: abbigliamento, alimentare, arredamento e la stessa automazione meccanica, di cui le macchine automatiche rappresentano una delle massime eccellenze, sebbene godano di visibilità inferiore rispetto ad altri comparti quali macchine utensili, per il legno, per la plastica, ecc.



**Figura 1.5:** Bilancia commerciale con i principali partners (2007-2009). Sull'asse delle ordinate sono riportati i principali partners, mentre sull'asse delle ascisse si riportano i corrispondenti valori della bilancia commerciale espressi in migliaia di Euro.

## 1.2 Il mercato delle pesatrici multitesta

Tra gli attori principali del processo di confezionamento ritroviamo i produttori e gli utilizzatori delle pesatrici multitesta. Effettuando diverse analisi di mercato si è osservato che i produttori sono un numero ristretto di aziende, viceversa gli utilizzatori sono troppo numerosi per poter essere analizzati. Per questo motivo si è deciso di esaminare dal punto di vista economico solo la prima categoria.

La prima pesatrice multitesta fu presentata al mondo industriale nel 1972 dalla ISHIDA (Figura 1.6), secolare azienda giapponese. Da allora, come è tradizione dell'industria nipponica, la tecnologia è stata continuamente migliorata. Le tappe più importanti di questo percorso sono state :

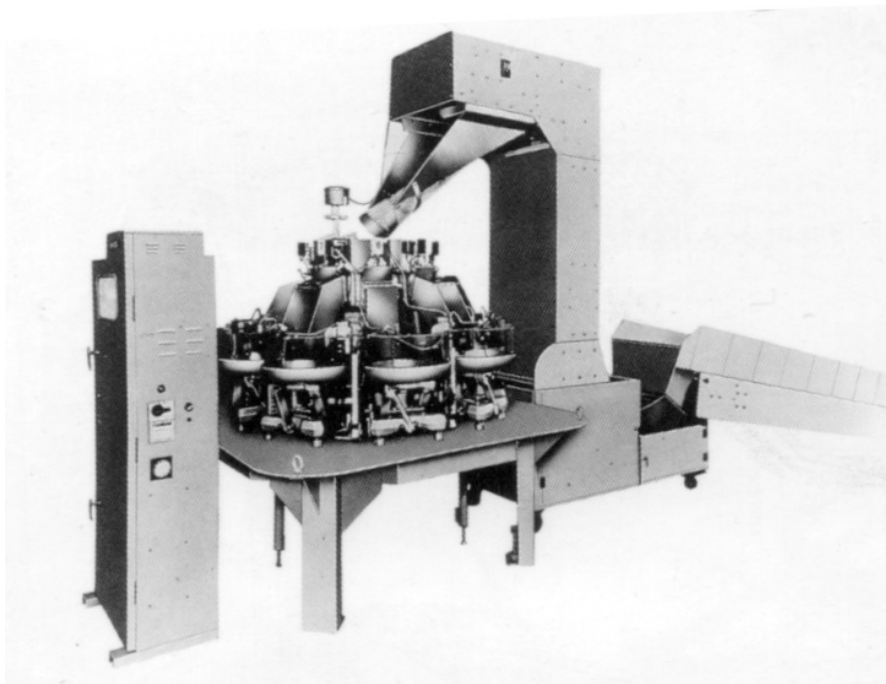
1980 - Introduzione delle celle di carico;

1981 - Introduzione di un pannello per il controllo remoto;

1987 - Sostituzione dei motori pneumatici per l'apertura/chiusura degli sportelli dei cestelli con dei motori elettrici a passo-passo;

1993 - ISHIDA introduce un filtro digitale, che riduce del 50% il tempo necessario per l'ottenimento di un segnale stabile di peso dalle celle di carico.

L'azienda ISHIDA detiene oggi circa il 50% del mercato delle pesatrici multitesta. Altri produttori sono Ricciarelli, Yamato, Simionato.



**Figura 1.6:** La prima pesatrice multitesta Ishida del 1972.

### 1.2.1 Le aziende nel mondo

Le aziende produttrici di pesatrici multitesta, come si può osservare in Figura 1.7, sono maggiormente concentrate in Europa. Dalle analisi è emerso che il 54,5% delle aziende produttrici sono di origine Europea (Figura 1.8). Negli ultimi anni tale settore ha visto un crescente interesse da parte dei produttori asiatici, in particolare il 21,2% delle aziende mondiali ha sede in Cina.



Figura 1.7: I produttori di pesatrici multitesta nel mondo.

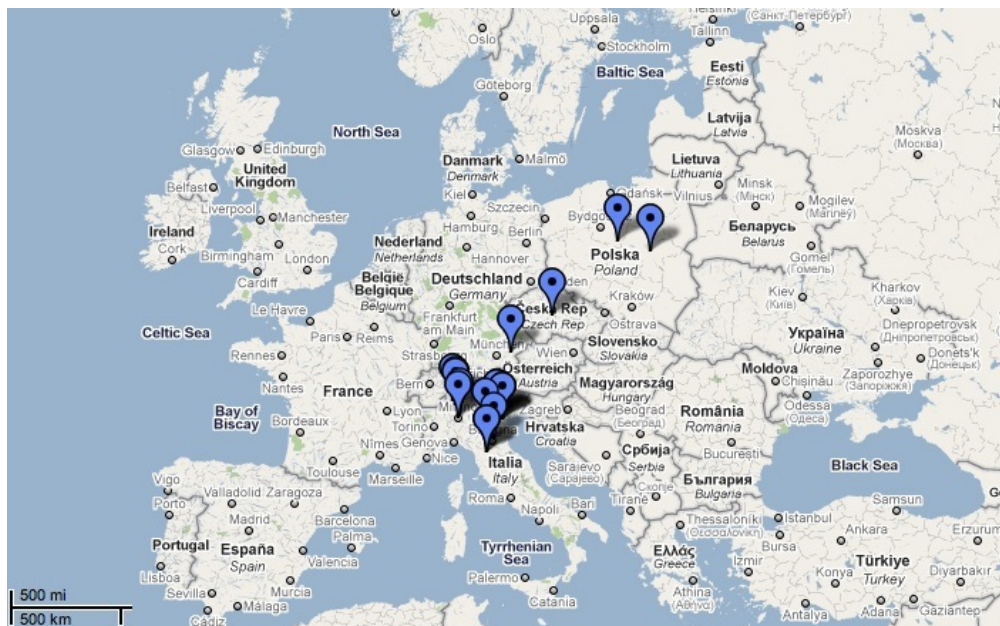


Figura 1.8: I produttori di pesatrici multitesta in Europa.

### 1.2.2 Analisi economica del settore delle pesatrici in Italia

Grazie ai progressi registrati dalle tecniche di progettazione, costruzione ed utilizzo, l'industria italiana ha conquistato una posizione di *leadership* a livello mondiale: le aziende rappresentano una realtà che offre agli utilizzatori finali macchinari

e servizi di altissimo livello tecnologico ed in continua e dinamica evoluzione. La struttura industriale è differenziata, con la presenza contestuale di aziende di grandi dimensioni e una molteplicità di imprese medio-piccole, estremamente flessibili e dinamiche. In particolare, il settore delle pesatrici multitesta in Italia è caratterizzato da aziende di piccole dimensioni. Il campione analizzato, rappresentato in Figura 1.9 è composta da undici imprese e comprende tutte le aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta:

**C.I.A.** L'azienda ha sede nella provincia di Vicenza, è specializzata nella produzione di pesatrici-confezionatrici automatiche verticali e orizzontali;

**Campagnolo** E' un'azienda situata nella provincia di Padova, specializzata nella fornitura di linee complete di confezionamento;

**Comiz** Azienda del vicentino, il cui obiettivo è di progettare, costruire e vendere macchinari destinati al confezionamento dei prodotti alimentari;

**Dolzan** L'azienda, con sede in provincia di Padova, è specializzata da molti anni nella fornitura di confezionatrici e sistemi di dosaggio;

**GNA Packaging** E' un'azienda bolognese specializzata nella produzione di impianti di lavorazione e confezionamento per prodotti alimentari;

**Imbal Stock** Azienda brianzola attiva dal 1994 nel settore del confezionamento;

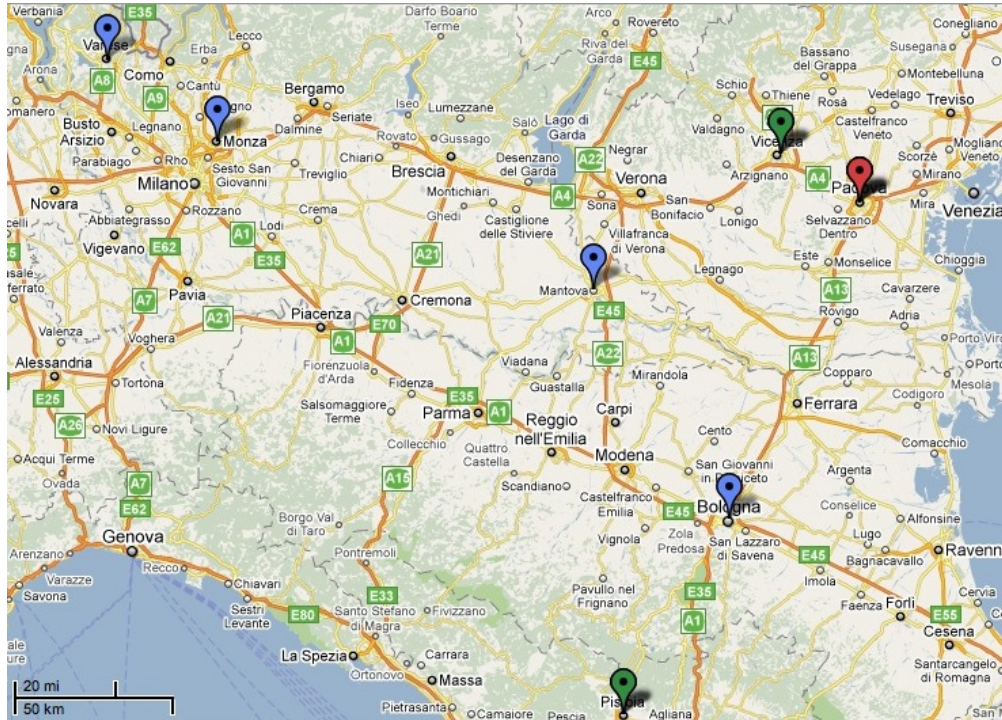
**MBP** L'azienda ha sede a Castiglione delle Stiviere (Mantova) ed è specializzata nella progettazione e produzione di pesatrici multiteste da 8 a 24 teste;

**Mondial Pack** E' un'azienda varesina specializzata nella costruzione di linee di confezionamento verticale ed orizzontali e relativi sistemi di dosaggio;

**Ricciarelli** L'azienda ha sede nella provincia di Pistoia ed è da anni leader nel settore delle macchine automatiche per il confezionamento di prodotti alimentari;

**Simionato** E' un'azienda della provincia di Padova che da molti anni sviluppa e produce sistemi di pesatura lineari e multitesta in combinazione con confezionatrici verticali;

**Stiavelli** Azienda con sede nella provincia di Pistoia, specializzata nella costruzione di macchinari per il confezionamento;



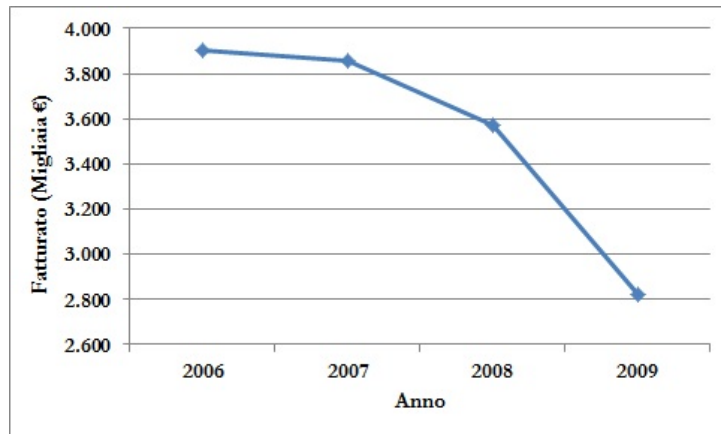
**Figura 1.9:** I produttori di pesatrici multitesta in Italia. L'indicatore blu identifica la presenza di un'unica azienda, quello verde due aziende mentre quello rosso tre aziende

Sono ora analizzati gli indicatori economici più rilevanti per la caratterizzazione delle aziende. La spiegazione degli indicatori è riportata in Appendice A.

### Dinamiche di performance economica

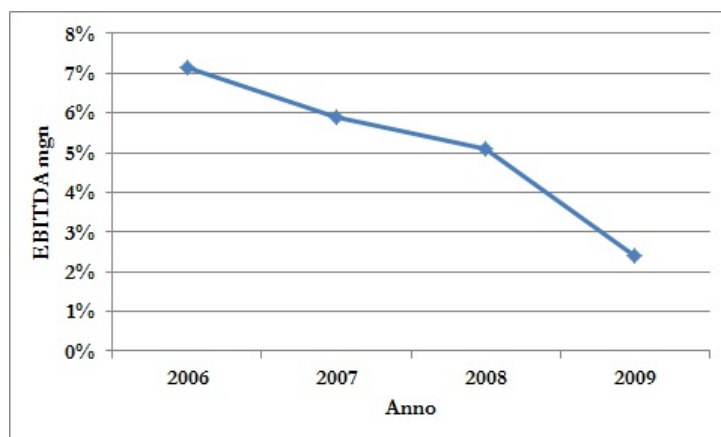
Nel quadriennio 2006-2009, nel campione analizzato è stata riscontrata una contrazione crescente del fatturato (-26,4% in media nel 2009). Tutte le aziende hanno registrato una diminuzione del fatturato (Figura 1.10), imputabile alla sfavorevole congiuntura economica innescata dalla crisi, che ha portato a una contrazione della domanda. Come premesso, la recessione globale, incominciata nel 2008, ha avuto i suoi primi effetti tangibili a partire dal 2009, anno in cui la riduzione del fatturato è stata più accentuata (26,4% in meno al 2009, contro una riduzione nel biennio precedente che non superava i 10 punti percentuali).

Le aziende del campione in esame rispecchiano fedelmente questo trend, eccezione fatta per Ricciarelli, unica impresa ad aver registrato un aumento dei ricavi nonostante la congiuntura sfavorevole.



**Figura 1.10:** Andamento del fatturato delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.

Coerentemente con quanto appena evidenziato, anche la marginalità lorda (EBITDA mgn, in Figura 1.11) è in diminuzione, in maniera più rilevante tra il 2009 e il 2008. Tuttavia, fatta eccezione per due imprese (Mondial Pack e C.I.A.), i valori di EBITDA mgn si sono mantenuti sempre strettamente positivi durante tutto l'arco di tempo considerato. I risultati migliori sono stati riportati da Simionato e Ricciarelli.



**Figura 1.11:** Andamento dell'indice EBITDA/Fatturato delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.



In sintesi, la maggior parte delle aziende valutate ha subito una battuta d'arresto dal punto di vista della crescita del fatturato nel quadriennio in esame, come evidenzia l'analisi delle *performance* (Figura 1.12). Tuttavia, la marginalità operativa lorda è stata comunque positiva, confermando la migliore reattività di questo comparto industriale agli effetti negativi della crisi rispetto ad altri settori del Made In Italy.

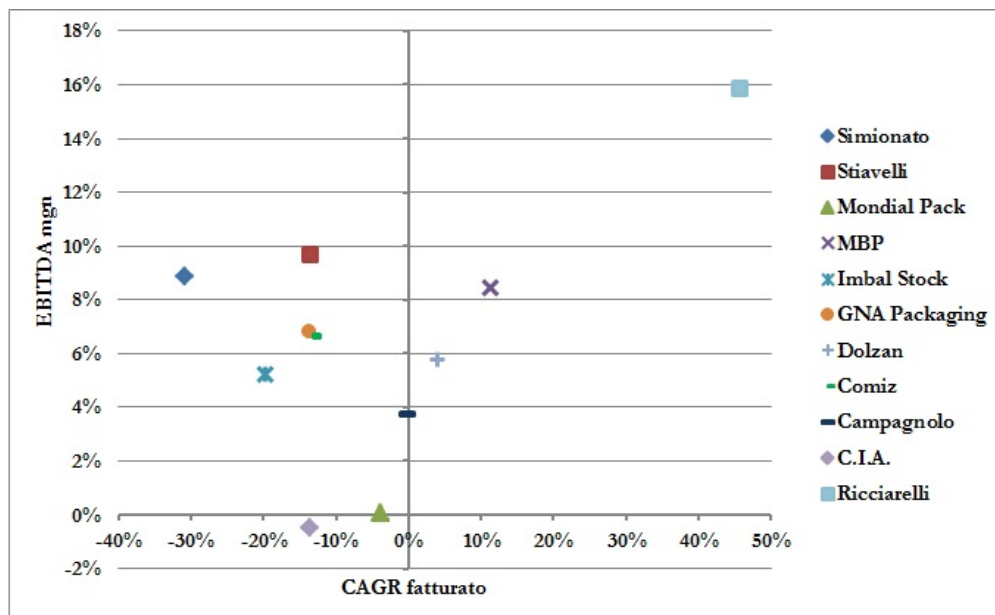


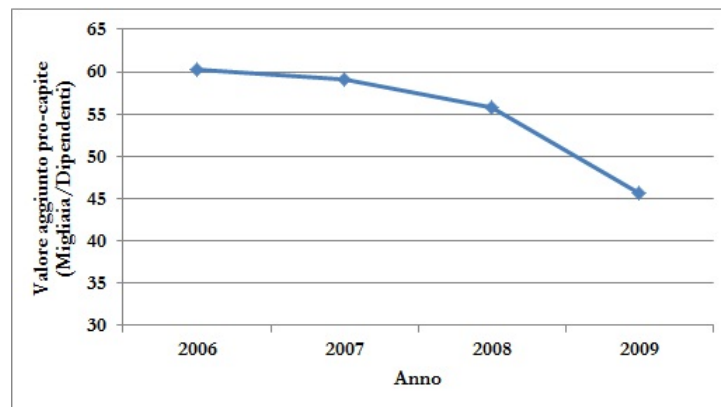
Figura 1.12: Performance delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.

### Produttività e redditività

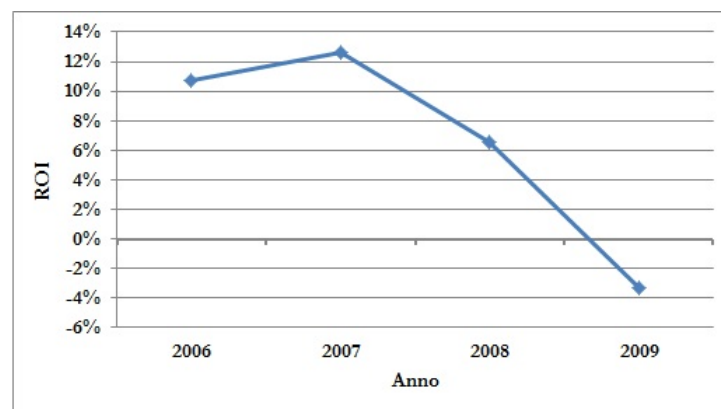
Le aziende del campione considerato sono tutte di dimensione piccola, ad eccezione di Ricciarelli, la cui scala dimensionale è maggiore. Dal punto di vista dell'efficienza del campione di aziende considerate, nel quadriennio 2006-2009 l'indice di produttività (Valore aggiunto pro-capite) è diminuito (Figura 1.13), passando da un valore medio di 60.000 euro/dipendente ad un valore di circa 45.600 euro/dipendente. A fronte di un calo generale di redditività pro-capite, Mondial Pack è tuttavia riuscita a registrare un miglioramento costante nel valore dell'indice, in controtendenza rispetto a tutte le altre aziende del campione.

L'andamento del ROI (Figura 1.14) risulta essere crescente nel periodo 2006-2007,

e in costante calo nel periodo 2007-2009. Nel 2009, la contrazione dell'indice è tale da far registrare addirittura un valore negativo: il ROI medio passa dal 6,55% del 2008 a -3,32% del 2009. Un indice negativo del ROI rivela una gestione economica caratteristica negativa, che compromette la possibilità di rimborso di debiti a terzi.



**Figura 1.13:** Andamento dell'indice valore aggiunto pro-capite delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.



**Figura 1.14:** Andamento dell'indice ROI delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.

Il grafico 1.15 sintetizza la situazione del campione dal punto di vista dell'efficienza nel periodo 2006-2009. Sull'asse delle ascisse è rappresentato il valore medio del ROI, sull'asse delle ordinate il Valore aggiunto pro-capite medio. A parte Mondial Pack, che riporta una *performance* negativa in termini di redditività (ROI

negativo), le altre aziende delineano un trend di efficienza economica positiva, nonostante le *performance* siano peggiorate a causa della congiuntura economica negativa che ha comportato una diminuzione della domanda e conseguentemente degli utili netti.

La diminuzione di produttività è andata di pari passo con il rallentamento della redditività ma nonostante le difficoltà congiunturali, il ROI delle aziende esaminate si è mantenuto mediamente positivo. Il comparto meccanico conferma quindi di aver reagito complessivamente in maniera positiva alla recessione.

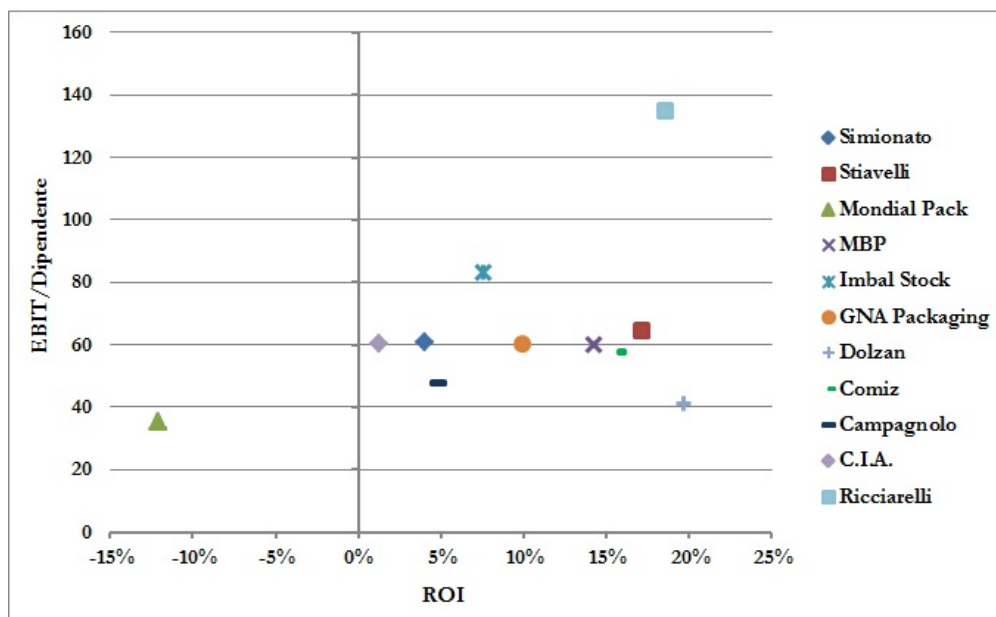
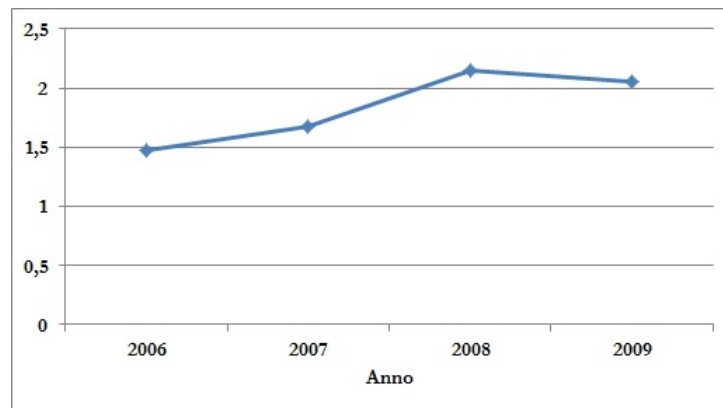


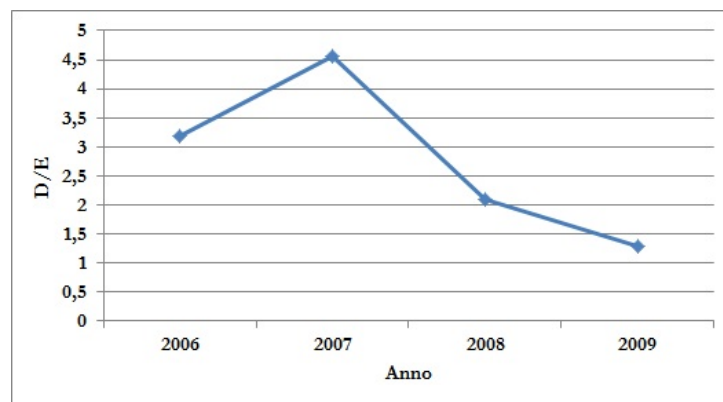
Figura 1.15: Efficienza delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.

### Dinamiche di esposizione finanziaria

Nel periodo osservato, la Posizione Finanziaria Netta delle aziende considerate ha subito un peggioramento tangibile (Figura 1.16). L'indice, che fornisce una misura del numero di anni che servirebbero a ripagare la quantità di debito accumulato grazie ai flussi di marginalità lorda derivanti dalla gestione caratteristica dell'impresa, è cresciuto ininterrottamente. Mediamente, l'EBITDA ha subito una contrazione, così come la Posizione Finanziaria Netta: le disponibilità liquide sono diminuite in relazione all'andamento dei flussi di cassa e si è inoltre ridotto l'indebitamento finanziario a medio/lungo termine.



**Figura 1.16:** Andamento dell'indice PFN/EBITDA delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.



**Figura 1.17:** Andamento della leva finanziaria delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.

Dopo un primo aumento relativo al periodo 2006-2007, il ricorso alla leva finanziaria ha subito una battuta d'arresto e una decrescita continua per tutto il resto del periodo osservato (Figura 1.17). Si è passati da un valore di leva finanziaria pari a 4,55 nel 2007 ad un valore di 1,28 del 2009. I dati raccolti fanno emergere la tendenza delle aziende di piccola dimensione a fare limitatamente ricorso al capitale di terzi, contrariamente a quanto facciano le imprese di dimensioni maggiori. La diminuzione marcata dell'indice è spiegabile tenendo conto del restringimento nell'erogazione di prestiti da parte degli istituti creditizi alle imprese (soprattutto se di piccola dimensione) dovuto alla volontà di rafforzare la propria posizione patrimoniale a fronte di un periodo economico così difficile. A causa

degli accordi di Basilea 2, infatti, le banche sono state indotte a ridurre il credito destinato alle PMI e ad aumentare al contempo i tassi di interesse, il che scoraggia le PMI a richiedere finanziamenti.

Complessivamente, la sostenibilità finanziaria delle imprese considerate si dimostra positiva, come testimonia il grafico rappresentato in figura. Sull'asse delle ordinate è stato rappresentato l'andamento medio della Posizione Finanziaria Netta per le aziende del campione nel periodo in esame, sull'asse delle ascisse è stato raffigurato invece l'andamento medio del rapporto di leva finanziaria. La maggior parte delle aziende si colloca su valori molto bassi di leva e prossimi allo zero di Posizione Finanziaria Netta, coerentemente con quanto detto finora. Poche aziende hanno un valore del rapporto di leva elevato, e sono quelle di dimensioni maggiori. Una sola azienda presenta una situazione molto critica in entrambe le dimensioni di indagine, ed è Mondial Pack.

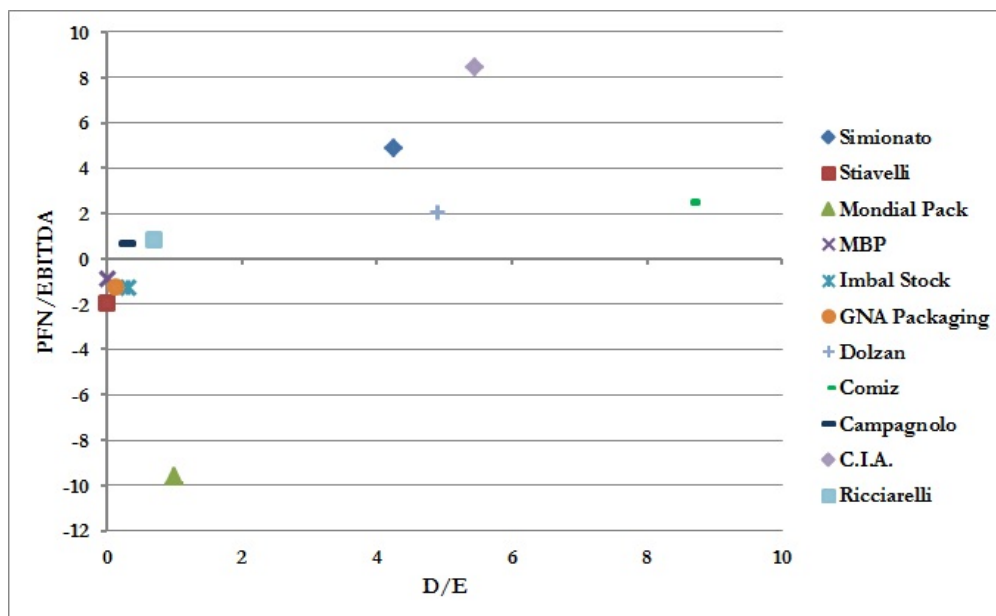


Figura 1.18: Sostenibilità finanziaria delle aziende italiane produttrici di pesatrici multitesta.

## Conclusione

Nonostante la crisi economica abbia avuto un effetto tangibile sulle *performance* del campione analizzato, l'analisi degli indici ha messo in evidenza come il comparto

meccanico sia stato in grado di rispondere in maniera globalmente positiva alle difficoltà congiunturali.

Dal punto di vista delle *performance* economiche, anche se il fatturato è complessivamente diminuito, nessuna azienda ha riportato valori negativi di EBITDA, dimostrando una buona gestione operativa dell'impresa.

La produttività, invece, ha subito un peggioramento costante per tutto l'arco di tempo osservato. Il ROI, dopo un biennio in crescita (2006-2007), ha subito un'inversione di tendenza tale da riportare addirittura un valore negativo a fine periodo. Il peggioramento è più intenso per le aziende di dimensione più piccola, che hanno accusato maggiormente gli effetti della diminuzione della domanda innestata dalla crisi.

Il difficile contesto economico ha inciso fortemente sull'assetto finanziario delle imprese considerate. Le imprese di dimensione minore hanno riscontrato maggiori difficoltà a ricorrere a capitale di terzi, e hanno dovuto sfruttare il capitale proprio per finanziare i propri investimenti. La Posizione Finanziaria Netta delle aziende considerate è pertanto peggiorata, come effetto di questo cambiamento; la diminuzione di liquidità può essere imputabile a diverse cause: rallentamento negli ordini, eccessive dilazioni di pagamento da parte dei clienti, aumento degli insoluti o più in generale all'irrigidimento del sistema bancario nei confronti delle imprese.

Complessivamente, la crisi economica che ha colpito l'economia italiana ha messo a dura prova anche il comparto dell'industria meccanica che, avendo una spiccata vocazione all'*export*, ha risentito soprattutto della bassa domanda proveniente dall'estero, sommata ad una domanda interna sostanzialmente debole. Tuttavia, l'analisi delle *performance* del campione ha dimostrato che la reazione delle imprese considerate è stata positiva.

### 1.3 Panoramica delle tecnologie utilizzate

La tendenza dei produttori è quella di ricercare l'automazione del processo di confezionamento di tutti i prodotti, anche di quelli ritenuti tradizionalmente più difficili da confezionare e quindi trattabili solo manualmente. D'altro canto, la forte eterogeneità della natura delle merci sul mercato implica la possibilità di adottare un'ampia gamma di soluzioni tecnologiche adottabili, a seconda della tipologia del prodotto da confezionare; infatti, se è vero che è possibile individuare poche

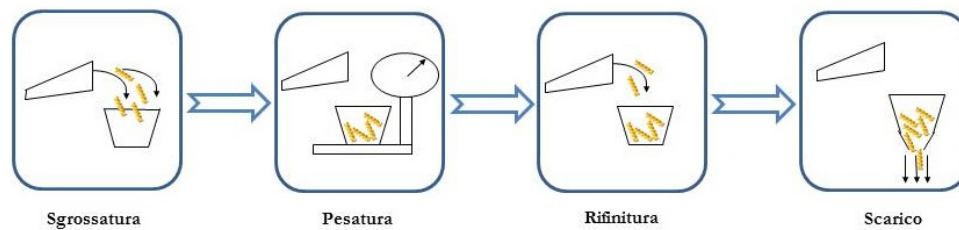
categorie di prodotti sensibilmente diversi tra di loro, e che quindi richiedono tecnologie di trattamento differenti (prodotti liquidi o pastosi, materiali pulverulenti, prodotti solidi di diverse pezzature, ecc.), è pur vero che anche all'interno della stessa categoria le piccole differenze esistenti tra prodotto e prodotto possono comportare variazioni incrementali, ma non per questo trascurabili, della tecnologia dominante. Ciò non toglie che, una volta fissata la categoria di riferimento, sia possibile isolare e descrivere un numero ristretto di logiche di funzionamento su cui si fonda la "tecnologia dominante"; è necessario partire da queste logiche per la realizzazione di tutte le possibili varianti.

In questo lavoro di tesi si pone l'attenzione su quei prodotti solidi caratterizzati da dimensioni e peso unitario ridotti, che devono essere venduti in confezioni caratterizzate dal proprio peso netto piuttosto che dal numero di unità contenute; rientrano in questa categoria pasta corta, caramelle, cioccolatini, patatine, dadi per viti, ecc. Com'è noto il processo di confezionamento può essere suddiviso in due fasi ben distinte:

- **Dosaggio:** l'individuazione, a partire dal prodotto sfuso, della quantità che deve essere confezionata;
- **Confezionamento:** il riempimento della confezione precedentemente preparata e relativa chiusura.

### 1.3.1 Dosaggio

Per quanto riguarda il settore di nostro interesse, le macchine concepite prima dell'avvento delle pesatrici multitesta, che verranno descritte nel successivo capitolo in quanto oggetto del lavoro, si basano sul tradizionale principio dello sdoppiamento della pesata tra la fase di sgrossatura e finitura. Il tipico ciclo di dosaggio è illustrato in Figura 1.19, dove sono schematizzate le quattro fasi di cui esso si compone. Il prodotto viene fatto cadere in un secchiello di raccolta da un erogatore a coclea o da un canale vibrante in quantità tale da avvicinarsi al peso obiettivo senza raggiungerlo (fase di sgrossatura). Il sistema di controllo rileva il peso del materiale, determina la quantità di prodotto che deve essere scaricata nella fase di finitura, e modifica opportunamente i parametri di funzionamento degli erogatori (ad esempio il tempo di vibrazione per i canali vibranti, o il numero di rotazioni che deve compiere la coclea) in modo da scaricare la quantità desiderata.



**Figura 1.19:** Schema delle fasi del dosaggio tradizionale.

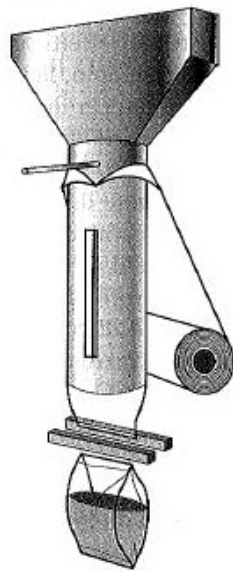
Sostanzialmente, tali macchine realizzano dei dosaggi volumetrici intervallati da una pesata per determinare l'entità della seconda erogazione. Si noti che, in seguito alla fase di finitura, non viene effettuata una nuova pesata e quindi il peso netto effettivo della confezione sarà noto solo in fase di controllo di qualità.

L'alternativa immediata che può essere adottata è quella di ricorrere direttamente ad un dosaggio di tipo gravimetrico, ad esempio alimentando una tramoggia di stoccaggio con un nastro trasportatore dotato di cella di carico e scaricando il prodotto nella confezionatrice una volta raggiunto il peso richiesto. Questa soluzione risulta dominata da quella precedente per la sua scarsa precisione.

### 1.3.2 Confezionamento

Esistono fondamentalmente due tipi di confezionatrici: quelle verticali e quelle orizzontali. La classificazione di una macchina entro uno dei due gruppi, è operata in base alla direzione di movimento della confezione durante lo svolgersi dell'operazione di confezionamento. Nella confezionatrice verticale (Figura 1.20) la realizzazione della busta è ottenuta svolgendo un tratto di film avvolto ad una bobina che, dopo essere transitato attraverso un insieme di rulli aventi lo scopo di renderne costante la tensione durante lo svolgimento entra in una cravatta, posta all'imbocco di un tubo circolare detto "tubo formatore", da cui fuoriesce abbracciando il tubo e assumendo così forma tubolare. Lo scorrimento del film sul tubo è ottenuto per mezzo di due cingoli di gomma posti ai lati destro e sinistro del tubo. Essi premono pneumaticamente sul film che abbraccia il tubo e lo fanno scorrere in giù quando vengono posti in rotazione. Per chiudere verticalmente il film ci si avvale di un sistema di saldatura verticale a caldo realizzato con una barra saldante detta "saldatore verticale". Essa è posta in posizione verticale anteriore rispetto

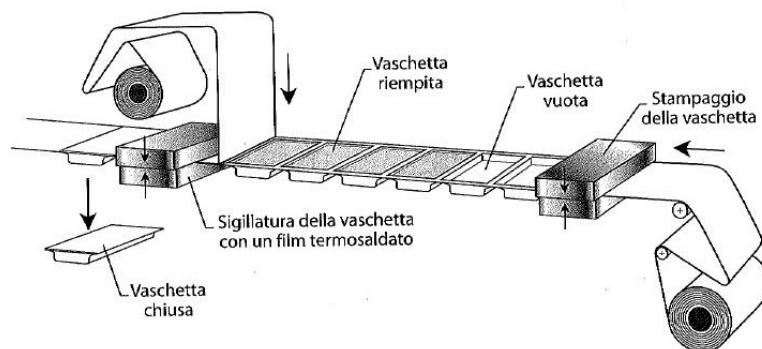




**Figura 1.20:** Funzionamento di una confezionatrice verticale.

al tubo formatore, ad una distanza di pochi millimetri, e viene premuta pneumaticamente sul tubo formatore per il tempo sufficiente a fondere ed unire i lembi verticali del tubolare. Il saldante verticale si muove grazie ad un pistone rotante che gli consente il movimento orizzontale di avvicinamento e allontanamento dal tubo formatore. Una volta chiuso verticalmente il film viene fatto scorrere lungo il tubo formatore per una lunghezza pari alla lunghezza della busta da realizzare. Per arrivare a concludere la confezione è necessario tagliare il film e saldarne i lembi orizzontali. A tal scopo ci si avvale di due barre orizzontali saldanti poste anteriormente e posteriormente al film. Giunto il loro momento le barre orizzontali si chiudono l'una contro l'altra stringendo il film in modo da unire i lembi orizzontali. Il taglio della busta viene effettuato per mezzo di una lama tagliente dentellata posta in una fessura centrale della pinza anteriore e che interviene non appena le pinze si sono completamente chiuse. Anche le pinze orizzontali sono azionate per mezzo di due pistoni pneumatici lineari che consentono il movimento orizzontale di avvicinamento-allontanamento. Il funzionamento così descritto è intermittente, ovvero il film non è in continuo movimento ma viene fermato ogni volta che avviene una saldatura. Le attuali velocità massime raggiungibili da una confezionatrice verticale non superano le 120 confezioni al minuto (il dato è relativo

alla condizione di confezionamento più difficile). Nelle confezionatrici orizzontali sono presenti due bobine che alimentano la macchina automatica, una è avviata in una stazione di termoformatura, nella quale si formano le cavità delle vaschette, mentre la seconda fornisce il film per la termosigillatura del termoformato dopo il riempimento. Come si osserva nella Figura 1.21, la vaschetta prima di essere sigillata viene posta al di sotto dello scivolo di caduta della dosatrice con l'apertura rivolta verso lo scivolo stesso. Una volta posizionata la nuova confezione, la macchina invia un segnale alla pesatrice che quindi può scaricare il prodotto. Terminata la fase di caduta la confezione si sposta dalla sua precedente posizione per essere chiusa ermeticamente e inviata alle successive stazioni della linea.



**Figura 1.21:** Funzionamento di una confezionatrice orizzontale.

Il processo non è continuo ma intermittente poiché le scatole vengono movimentate solo quando si sono concluse le operazioni di riempimento e di chiusura delle confezioni centrali. Esistono confezionatrici orizzontali in cui il processo di confezionamento è continuo. Ciò è ottenuto con un riempimento delle confezioni in parallelo. Infatti a valle del cono di scarico del dosatore, è montato uno scivolo rotante. La superficie interna dello scivolo presenta dei canali di riempimento di forma elicoidale. Quando una scatola vuota arriva in corrispondenza della zona di riempimento, essa è presa in consegna dal primo canale di riempimento disponibile attraverso cui verrà scaricata la quantità da confezionare. La confezione descrive una semicirconferenza intorno all'asse dello scivolo mentre il prodotto continua a fluire. Al compimento della semicirconferenza la confezione sarà riempita e potrà proseguire, con un tragitto rettilineo, verso la zona di chiusura. Il canale, invece, continua il suo moto rotatorio che lo porterà, alla conclusione della seconda semicir-

conferenza, ad incontrare una nuova scatola da riempire. Il numero di confezioni che sono contemporaneamente riempite è pari alla metà del numero di canali a disposizione e cioè al numero di canali presenti contemporaneamente sulla “semi-circonferenza di riempimento”. Ciò permette di diminuire di molto il tempo di ciclo e quindi di aumentare la produttività del sistema.

# Capitolo 2

## Il problema della configurazione

In questo capitolo si viene presentato la macchina oggetto d'esame della tesi: la pesatrice multitesta. Dopo aver fornito una spiegazione del suo funzionamento, viene introdotto il problema della configurazione. Il capitolo si conclude con la formalizzazione della funzione obiettivo e la sua analisi.

### 2.1 La pesatrice multitesta

L'industria del *packaging* produce macchine sempre più veloci, affidabili e facili da usare. Aumentare la produttività però non è più l'unico obiettivo della progettazione di macchine per il *packaging*: la necessità di disporre di un'ampia flessibilità operativa è diventato ugualmente importante, grazie al crescente interesse verso impianti produttivi capaci di produrre una vasta gamma di formati e di alternarsi in modo rapido ed efficiente su un mix di produzione anche molto frammentato. Una pesatrice multitesta può offrire un tale numero di benefici che l'acquisto è non solo conveniente ma indispensabile. E' una macchina complessa sotto tutti i punti di vista: meccanico, hardware e software. Proprio per questo la fase di Ricerca e Sviluppo è fondamentale. Diventa quindi necessaria la conoscenza dei principi matematici, fisici, elettronici di funzionamento per raggiungere i più alti standard qualitativi.

### 2.1.1 I principali componenti hardware delle pesatrici multitesta

Una pesatrice multitesta (Figura 2.1) è costituita da una figura poligonale di cui ciascun lato rappresenta un modulo di dosaggio, perfettamente identico, dal punto di vista meccanico ed elettrico, ai moduli degli altri lati. La macchina è costruita in acciaio inossidabile AISI 304 in assenza di componenti di alluminio. Questo garantisce il massimo livello di igiene considerando che in caso in caso di prodotti umidi l'alluminio potrebbe ossidare. Inoltre le pesatrici di ultima generazione garantiscono un IP65/IP66, quindi un elevato grado di protezione degli involucri dei dispositivi elettrici ed elettronici contro la penetrazione di agenti esterni di natura solida o liquida.



**Figura 2.1:** La pesatrice multitesta.

I principali componenti di una pesatrice multitesta sono:

**Tramoggia di alimentazione:** è costituita da uno scivolo d'entrata a forma conica (Figura 2.2), posizionato al centro della struttura, che guida il prodot-

to dal dispositivo di alimentazione al centro del disco dispersore. Una pesatrice può esser caratterizzata da più dispositivi di alimentazione a seconda del prodotto;

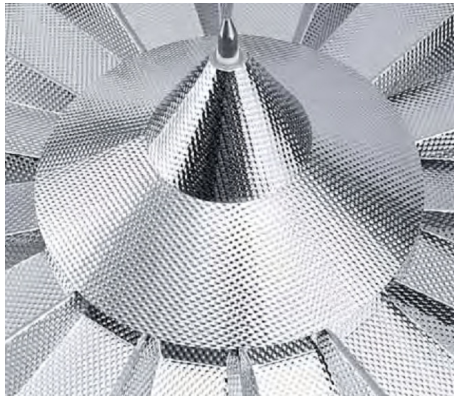


**Figura 2.2:** Scivolo d'entrata.

**Disco dispersore** (Figura 2.3): è costituito da un piatto vibrante (o rotativo) munito di celle di carico per mantenere costante la quantità di prodotto presente e garantire la distribuzione ottimale di prodotto sui canali circostanti;

**Canali radiali** (Figura 2.4): sono canali di alimentazione, ne esiste uno per ciascun modulo di dosaggio. Sono posti a raggiera lungo la circonferenza del distributore centrale e servono per trasportare il prodotto all'interno dei cestelli predosatori;

**Celle di carico:** sono dei componenti elettronici che vengono usati per convertire una forza in un segnale elettrico, quindi per pesare la quantità di materiale presente sul disco dispersore e nei vari cestelli. Ogni cella è caratterizzata da un limite di pesatura, i cestelli di conseguenza hanno un limite di volume massimo. Superando tale limite si rischia di raggiungere il fondoscala della cella di carico e quindi avere misure di peso non attendibili; inoltre si potrebbe osservare un aumento del tempo di alimentazione dei cestelli predosatori, oppure si potrebbe osservare una fuoriuscita di prodotto da alcuni cestelli;



**Figura 2.3:** Disco dispersore.



**Figura 2.4:** Canali radiali.

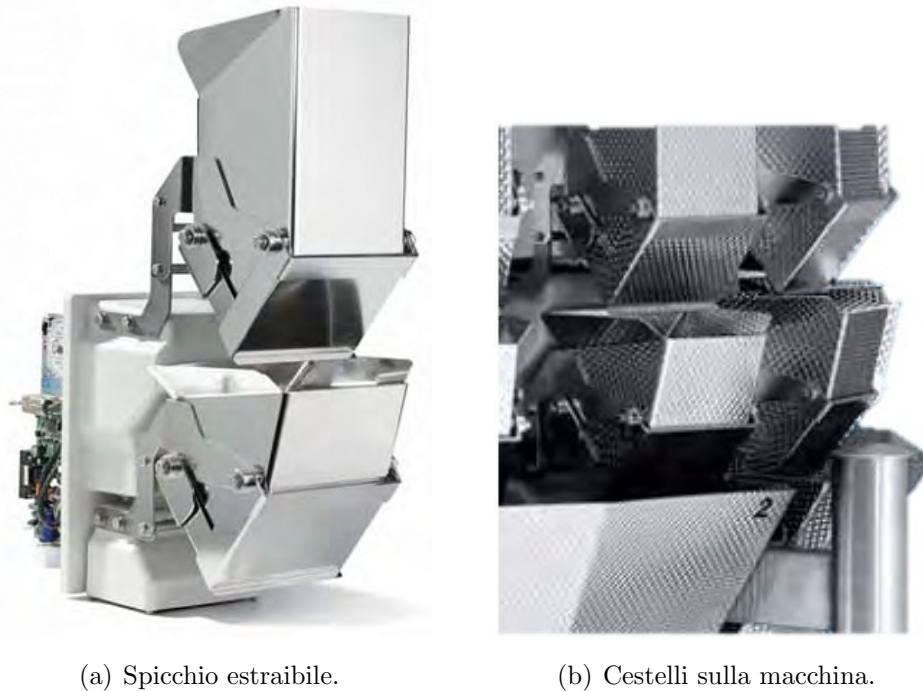
**Cestelli predosatori:** ricevono il prodotto proveniente dai canali radiali e lo trattengono temporaneamente. Il cestello di predosaggio scarica il suo contenuto nel corrispondente cestello pesatore nel momento in cui riceve il segnale di svuotamento di quest'ultimo oppure nel caso in cui il cestello di pesatura necessiti di una maggior quantità di prodotto. La ragione che spiega la presenza dei predosatori è che essi evitano che del prodotto cada nel cestello pesatore durante la fase di pesata. Gli sportelli dei cestelli predosatori e pesatori, sono comandati da motori elettrici a passo-passo. Essi sono stati preferiti all'impiego dei motori pneumatici in quanto più silenziosi, manutenibili e regolabili;

**Cestelli pesatori:** trattengono il prodotto mentre le celle di carico sottostanti ne misurano il peso. Viene allora selezionata la combinazione di cestelli pesatori la cui somma si avvicina quanto più possibile al peso prescelto;

**Cestelli dosatori:** non sono sempre presenti. Quando ci sono, vengono utilizzati per il deposito della dose parziale già pesata. Il cestello può essere formato da uno o due scomparti;

L'insieme del cestello predosatore, dosatore (se è presente) e pesatore prende il nome di modulo di pesata. Ciascuno spicchio, come si osserva in Figura 2.5(a), è intercambiabile, leggero, stagno, resistente agli agenti corrosivi ed estraibile rapidamente con la massima facilità perché dispone di un sistema di connessione ad innesto rapido. Grazie al particolare hardware lo spicchio include la scheda di controllo dei motori e di acquisizione del peso. Tutti i componenti sospesi sulla cella

di carico sono costruiti seguendo il criterio della massima resistenza e leggerezza per non gravare la cella di inutili zavorre. La meccanica è estremamente semplice, razionale e robusta a tutto vantaggio della minore usura nel tempo.



**Figura 2.5:** I cestelli predosatori e pesatori.

**Struttura portante:** è la struttura su cui sono fissate le quattro gambe che sostengono la piastra inferiore e superiore entro cui sono inseriti i moduli di pesata. E' realizzata in tubolare di acciaio inox AISI 304 di prima qualità con angoli raggianti, che evitano qualsiasi ristagno anche con i prodotti più appiccicosi;

**Cono di scarico:** riceve il prodotto scaricato dai cestelli pesatori sovrastanti. La bocca di uscita alimenta direttamente il sistema di confezionamento;

**Otturatore:** è un setto mobile, posizionato nel cono di scarica, che disaccoppia la fase di scarica del prodotto dalla fase di confezionamento. Questo funziona sostanzialmente come una ghigliottina che si chiude quando è necessario interrompere la contiguità fra la pesatrice e la confezionatrice. Esso, infatti, evita che



il prodotto appena scaricato vada ad interferire con quello che ha già raggiunto la confezionatrice. In alcune macchine, l'otturatore può inviare il prodotto in una via di scarico secondaria (diversa dalla confezionatrice) che sbocca in un recipiente di recupero esterno alla macchina. Ciò accade quando la quantità di prodotto da scaricare non è idonea al confezionamento.

### 2.1.2 Il funzionamento di una pesatrice multitesta

La fase di riempimento è di fondamentale importanza nel ciclo di produzione e confezionamento dei prodotti alimentari, da essa infatti dipendono fortemente la stabilità e la conservazione del prodotto. Tale processo richiede di conseguenza massima precisione e affidabilità. Inoltre le macchine per il riempimento fanno parte di un sistema di componenti interconnessi che devono essere sincronizzati con esattezza. La stazione di riempimento è tipicamente la più critica: le macchine che precedono la pesatrice multitesta sono programmate per lavorare più velocemente rispetto alla pesatrice stessa, in modo tale che essa non si trovi mai nella condizione di assenza di contenitori. Ugualmente, le macchine poste dopo la fase di riempimento devono anch'esse essere più rapide per allontanare velocemente i contenitori pieni senza creare problemi di accumulo. Non è solo la sincronizzazione ad essere importante, esistono infatti altri fattori rilevanti come la produzione oraria (che dev'esser correlata al produrre il minor numero di confezioni "non conformi") e la flessibilità in fatto di formati e volumi per produrre un'ampia gamma di prodotti con la medesima riempitrice. Un altro parametro da tener in considerazione nella scelta dell'impianto è l'accuratezza del riempimento. Infatti la produzione di confezioni al di sotto dei volumi o dei livelli predefiniti dalla legge possono portare a problemi di ordine legale, come visto nel capitolo precedente. Per ovviare a tali problemi si potrebbe pensare di produrre sempre confezioni riempite oltre la quantità nominale, questo porterebbe però ad un aumento dei costi che andrebbero a gravare sull'economia del processo. È chiaro che si è in presenza di un trade-off.

Il funzionamento della macchina verrà descritto seguendo idealmente il percorso del prodotto sfuso che deve essere confezionato (Figura 2.6).

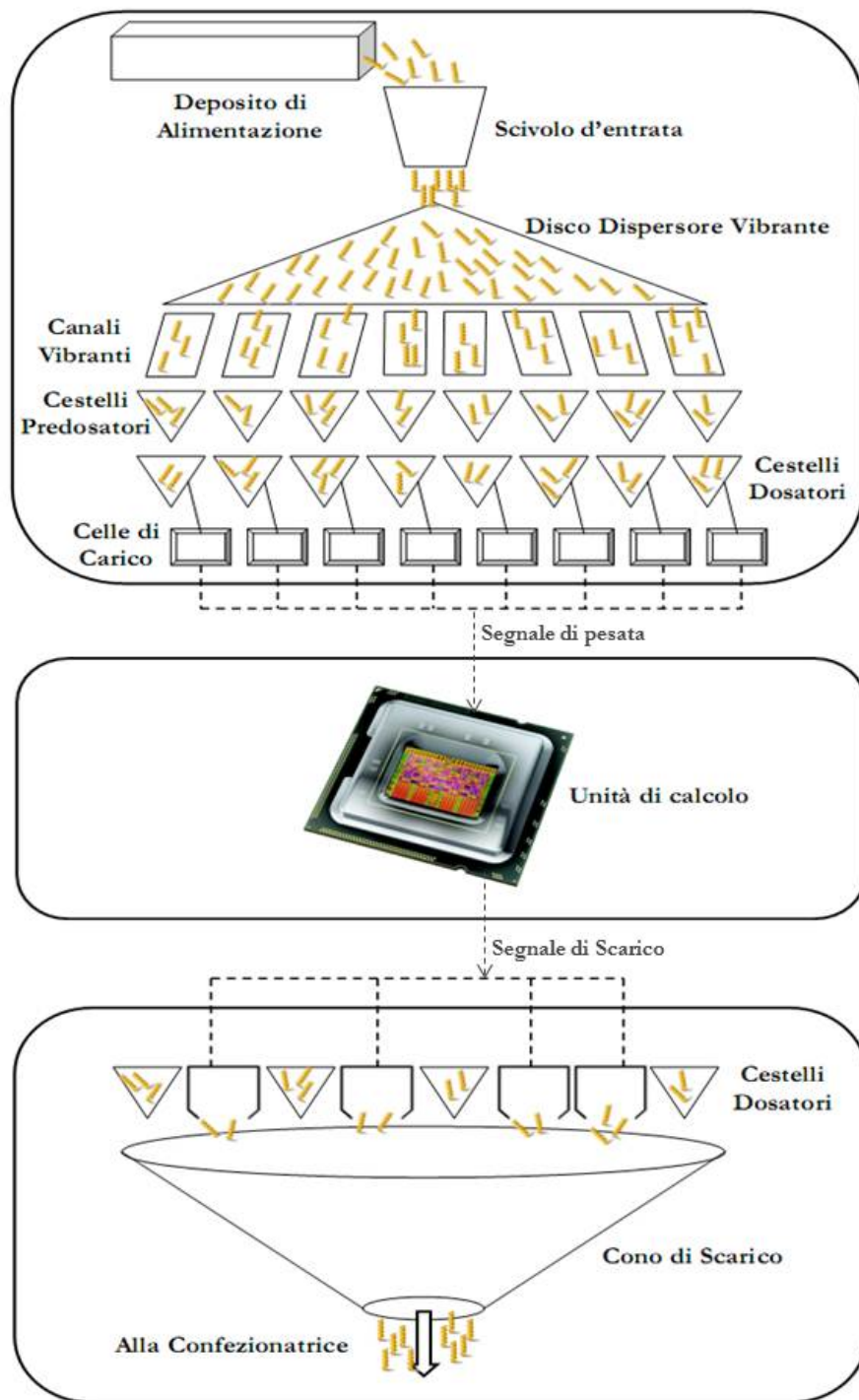
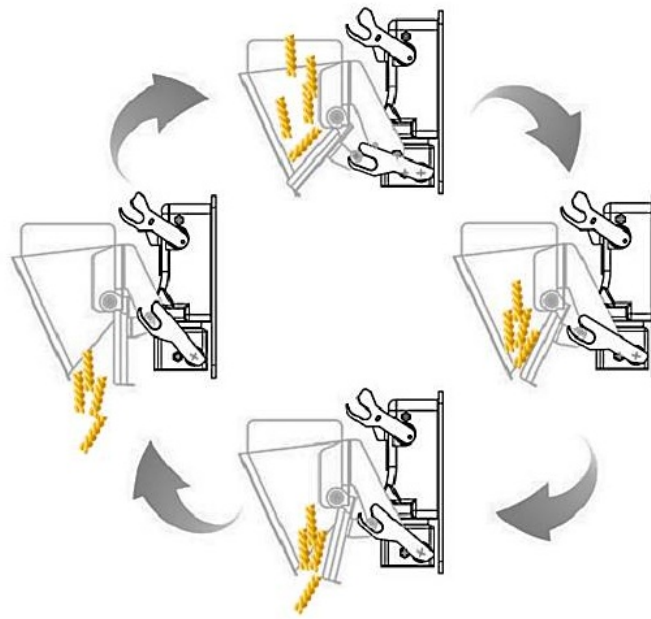


Figura 2.6: Schema di funzionamento di una pesatrice multitesta.

Un alimentatore (ad esempio un nastro trasportatore) conduce il prodotto dal punto di stoccaggio alla tramoggia di alimentazione che lo fa cadere sul disco dispersore vibrante. Terminata la vibrazione del disco dispersore e dei relativi canali vibranti radiali, il prodotto si trova nei cestelli predosatori. Quest'ultimi, se i cestelli pesatori sono liberi e pronti per la fase di pesata, si aprono lasciando cadere il prodotto nel cestello pesatore. Nel momento in cui il segnale del peso della quantità contenuta nei cestelli pesatori è stato acquisito, l'elaborazione può cominciare. Una volta individuata la combinazione di cestelli da scaricare, il prodotto contenuto in tali cestelli è lasciato cadere nel cono di scarico che conduce alla confezionatrice. I cestelli pesatori prescelti ritornano così ad essere vuoti e quindi risultano nuovamente pronti per accogliere la quantità di prodotto contenuta nel cestello predosatore sovrastante, e pesarla. Il funzionamento dei cestelli dosatori è rappresentato in Figura 2.7.



**Figura 2.7:** Funzionamento dei cestelli pesatori.

Le pesatrici multitesta possono essere caratterizzate da un ulteriore livello di cestelli dopo i pesatori: i cestelli dosatori. Il vantaggio fondamentale relativo alla presenza dei dosatori è che la probabilità di raddoppiare il numero di cestelli il cui peso contenuto è noto e su cui sviluppare l'elaborazione, a parità di celle

di carico. Infatti, se la quantità contenuta nel cestello pesatore non è scelta per formare la confezione, essa viene scaricata nel dosatore e così risulta possibile liberare il cestello pesatore ed effettuare un'altra pesata. Nella ricerca della combinazione di cestelli da scaricare la pesatrice terrà conto ovviamente anche di queste quantità.

L'idea che sta alla base del funzionamento di queste macchine è quindi quella di svincolare la precisione del processo di alimentazione del prodotto ai singoli moduli della pesatrice, dalla precisione del confezionamento.

Vengono ora confrontate le logiche di funzionamento della pesatrice multitesta e di un dosatore gravimetrico classico, caratterizzato dalle fasi di sgrossatura e finitura. Quest'ultimo, se la tramoggia di pesata a valle della fase di finitura risulta sovraccarica, ha la possibilità di accettare il sovraccarico o scaricare il prodotto senza confezionare. In una multitesta invece, un cestello sovraccarico potrà essere mantenuto fin quando non verrà caricato un altro cestello in cui la quantità contenuta è inferiore al previsto. In questo modo, scaricando entrambi i cestelli, il peso della confezione sarà più vicino al target desiderato.

Nel caso in cui nel dosatore gravimetrico classico (a valle della fase di finitura) si riveli un carico sotto peso, bisognerà comunque riattivare il canale vibrante di alimentazione per raggiungere il target, di conseguenza il tempo di ciclo ne risentirà.

### **I principali moduli funzionali di una pesatrice multitesta**

Si definisca:

Modulo di pesata: è l'insieme del canale vibrante, del cestello predosatore, del cestello pesatore e del cestello dosatore (se presente) tra loro comunicanti. Il numero di moduli di pesata di una pesatrice verrà indicato nel seguito con N.

Livello: è una corona di cestelli aventi la medesima funzione. Come si è visto esistono due soluzioni: in primo luogo è possibile avere 2 livelli ovvero ogni modulo è composto dal cestello predosatore e da quello pesatore; in un secondo caso possono essere presenti 3 livelli ossia ogni modulo di pesata è composto dal cestello predosatore, dal cestello pesatore e dal cestello dosatore.

Testa di pesata: è un cestello che può concorrere alla formazione di una confezione.

Il numero di teste di pesata saranno: 
$$\begin{cases} N, & \text{se la pesatrice ha 2 livelli di cestelli;} \\ 2N, & \text{se la pesatrice ha 3 livelli di cestelli.} \end{cases}$$

Insieme di elaborazione: è l'insieme dei moduli di pesata coinvolti nel confezionamento di un prodotto. La numerosità di tale insieme può essere minore del numero di moduli  $N$ . Il controllo remoto consente di individuare degli insiemi di elaborazione che costituiscono una pesatrice indipendente con un proprio target di peso e delle proprie regolazioni. Esiste dunque la possibilità di creare virtualmente, dalla stessa macchina, due o più pesatrici indipendenti fra di loro.

É ora possibile suddividere la pesatrice multitesta in 3 parti:

### 1. Sistema di alimentazione

Il sistema di alimentazione è composta da:

- Tramoggia di alimentazione;
- Disco dispersore;
- Canali radiali;
- Castelli predosatori.

La tramoggia di alimentazione si caratterizza per la sua forma interna, per la posizione del suo asse rispetto a quello della pesatrice e per l'altezza della luce di alimentazione attraverso cui passa il prodotto. Le regolazioni sono tutte manuali e non avvengono tramite il controllo remoto, si basano infatti sull'esperienza dell'operatore e sul risultato dei cicli di prova. La forma interna della tramoggia di alimentazione consente, attraverso uno o più setti separatori, di alimentare contemporaneamente con prodotti diversi la pesatrice. La possibilità di regolazione della tramoggia in senso orizzontale permette di alimentare con quantità di prodotto diverse due opposte sezioni della pesatrice. In ultimo si può regolare l'altezza della luce di alimentazione. La regolazione dell'altezza della luce è particolarmente importante perché definisce l'altezza dello strato di materiale che si carica su ogni canale vibrante. Questo influisce in maniera determinante sulla quantità che riempie ogni cestello.

I canali vibranti hanno il compito di movimentare il materiale e la loro imprecisione è assai bassa. Dunque un canale vibrante risulta preciso se il materiale è alimentato omogeneamente e correttamente. Perciò l'imprecisione del carico dei cestelli è dovuta, per lo più, ad una non omogenea distribuzione del prodotto nei canali vibranti.

Quando il prodotto è giunto sulla pesatrice, esso viene distribuito ai canali vibranti grazie al disco dispersore che sta al centro della pesatrice. Esso comincia a vibrare quando la cella di carico, che è montata sotto, rileva un peso maggiore o uguale ad un certo valore. Tale valore, comprensivo di limite superiore e inferiore, può essere impostato dall'utente. Per rendere l'alimentazione omogenea, alcune pesatrici multitesta montano un setto flessibile di plastica che funge da freno al passaggio del prodotto (se questo è particolarmente scorrevole) dal disco dispersore ai canali vibranti. Nel caso di prodotti poco scorrevoli, il disco dispersore non solo vibrerà, ma potrà anche ruotare. Il disco dispersore, come i canali vibranti, utilizza un meccanismo elettromagnetico per generare la vibrazione. L'intensità di vibrazione è modificata attraverso un potenziometro e può essere regolata in maniera automatica. Tale regolazione si avvale di un controllo in anello chiuso, in cui la variabile utilizzata per definirla è il peso rilevato dal cestello pesatore (per i canali vibranti). La regolazione automatica funziona rilevando il peso scaricato con l'impostazione corrente di ampiezza e, basandosi sulla differenza rispetto al valore fissato per quel cestello, operando, al ciclo successivo, una regolazione proporzionale alla differenza attraverso il potenziometro. L'intensità può eventualmente essere modificata manualmente, in base all'esperienza pregressa degli operatori.

## 2. Sistema di pesatura

Il sistema di pesatura è costituito dai cestelli pesatori comprensivi di celle di carico e da un microprocessore utilizzato nella scelta dei cestelli da scaricare. Dopo un periodo di stabilizzazione del prodotto, comincia la fase di rilevazione del peso da parte della cella di carico. Le oscillazioni a bassa frequenza disturbano le celle di carico sfalsando la rilevazione del peso. Il peso risulta acquisito quando il segnale della cella di carico si stabilizza. Di conseguenza il sistema è costretto a sprecare del tempo prezioso in attesa di

un valore affidabile. Per la risoluzione di tale problema esistono diverse tecniche. In primo luogo il sistema può sfruttare un particolare algoritmo per misurare il valore delle oscillazioni della pedana; in questo modo si è in grado di “depurare” il dato reale dal disturbo generato dalla pedana stessa. Alcune aziende propongono invece un sistema di filtraggio digitale capace di rilevare le vibrazioni dei canali vibranti durante la pesata, convertire tale segnale in digitale e, velocemente, filtrare il segnale della cella di carico, grazie alla codifica digitale, ottenendo più rapidamente l’informazione sul peso. Un’ultima soluzione, considerata però poco affidabile, è l’utilizzo di un software che elimina indiscriminatamente tutte le frequenze tipiche della pedana.

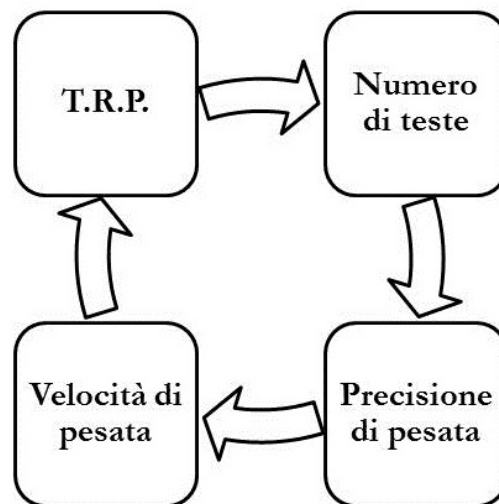
### 3. Sistema di confezionamento

Il sistema di confezionamento è costituito dal cono di scarico che collega la confezionatrice con la pesatrice. Esso può essere dotato di otturatore.

#### 2.1.3 Analisi delle variabili principali del funzionamento

Lo schema, presentato in Figura 2.8, evidenzia le variabili principali che influenzano, secondo rapporti di causa/effetto, il funzionamento di una pesatrice multitesta. La variabile numero di teste definisce il numero di cestelli pesatori disponibili in ogni pesata, quindi il numero di candidati potenziali tra i quali verranno selezionati quelli la cui combinazione si avvicina con più precisione al valore nominale. All’aumentare di tale numero, l’unità di elaborazione ha a disposizione un numero maggiore di combinazioni da esplorare, quindi ha la possibilità di individuare con più precisione la quantità da scaricare. Un aumento della precisione, sia dal punto di vista della singola pesata che in termini di pesata media, unita ad un’efficace meccanica di comando dei cestelli permette di ridurre al minimo i tempi di apertura/chiusura a vantaggio della velocità e del controllo di caduta del prodotto. Infine conoscere con precisione le tecniche di misurazione delle oscillazioni della pedana facilita la misurazione delle quantità contenute all’interno dei cestelli pesatori. Quindi si può ottenere una riduzione del tempo di rigenerazione peso, ovvero il tempo impiegato dall’unità di calcolo per determinare con esattezza il peso di ogni singolo cestello e selezionare più rapidamente la combinazione di cestelli che maggiormente approssimano il valore nominale della confezione da produrre. Inoltre è possibile ridurre ulteriormente tale tempo utilizzando delle potenti

basi vibranti in grado di muovere efficacemente anche i materiali più appiccicosi. Determinare in poco tempo quale sia la quantità esatta da scaricare determina in larga misura la precisione ottenibile ad una determinata velocità e target di peso, inoltre garantisce la disponibilità del maggior numero di teste per la successiva pesata.



**Figura 2.8:** Variabili principali che influenzano il funzionamento di una pesatrice multitesta

## 2.2 Il problema della configurazione

Con il termine configurazione ci si riferisce al problema della determinazione delle quantità medie di prodotto che riempiono i vari cestelli. Tali quantità sono definite impostando:

- lo spostamento dell'asse della tramoggia di alimentazione rispetto all'asse della pesatrice;
- l'altezza della luce di alimentazione e conseguentemente l'altezza dei setti di plastica presenti;
- l'intensità e il tempo di vibrazione dei canali vibranti;
- l'intensità di vibrazione e il peso limite al di sopra del quale il disco dispersore comincia a vibrare;



Lo scostamento dell'asse della tramoggia rispetto a quello della pesatrice e l'altezza della luce di alimentazione sono delle impostazioni manuali e sono definite basandosi sull'esperienza dei tecnici. Parimenti vale per il peso necessario per definire il funzionamento del disco dispersore. Per quanto riguarda le intensità di vibrazione dei canali vibranti radiali, distinguiamo due livelli di soluzione: una automatica ed una che attinge all'esperienza dei tecnici. La soluzione automatica richiede solamente il valore nominale della confezione  $Nom$ . Tale dato è, evidentemente, esogeno. Esso però deve essere realizzabile con la pesatrice che si possiede. Infatti, le capacità massime di pesatura e di volume dei singoli cestelli vincolano la pesatrice alla realizzazione di confezioni il cui valore nominale risulta compreso fra un valore massimo e minimo.

La macchina, salvo diversa indicazione, imposta la medesima intensità di vibrazione per tutti i canali vibranti radiali, e il controllo in anello chiuso modifica, eventualmente, quest'impostazione. Tuttavia esiste, per ogni produttore, una sorta di metodo sistematico di ricerca della configurazione migliore. Essi si basano fondamentalmente sull'affinità del prodotto da confezionare con altri noti e precedentemente confezionati. Si tende cioè a riproporre, per prodotti nuovi, le stesse configurazioni già impiegate per prodotti simili.

### 2.2.1 La modellizzazione delle variabili

La risoluzione di qualsiasi problema vede come tappa obbligatoria la formalizzazione delle variabili indipendenti che individueranno la soluzione. In questo paragrafo, dunque, si cerca di trovare la schematizzazione più appropriata e corretta alle variabili che si utilizzeranno nel seguito.

Le variabili indipendenti, in questo caso, sono le quantità che andranno a riempire i singoli cestelli della pesatrice. La quantità che ad ogni ciclo riempie l'  $i$ -esimo cestello, com'è ovvio, non è sempre la stessa. Sembrano esserci dunque le condizioni per riconoscere nelle quantità che si presentano nello stesso cestello, in cicli di lavoro differenti, le realizzazioni campionarie di una variabile aleatoria  $w_i$ . In [Ferr99] si è verificato che detta variabile segue in maniera approssimata una distribuzione gaussiana di media  $\mu_{w_i}$  e deviazione standard  $\sigma_{w_i}$  e non appare autocorrelata temporalmente. È stata verificata inoltre l'indipendenza statistica tra le quantità che riempiono due cestelli diversi.

Inoltre, in base al funzionamento della macchina, sembra possibile ipotizzare che la deviazione standard sia una funzione lineare della media, ovvero  $\sigma_{w_i} = \alpha \cdot \mu_{w_i}$ . Il coefficiente  $\alpha$  dovrebbe rendere conto delle caratteristiche del prodotto. Non è possibile comunque affermare con certezza che esso non dipenda anche dalle impostazioni automatiche e manuali del sistema di alimentazione (altezza luce di alimentazione, scostamento dell'asse della tramoggia di alimentazione rispetto all'asse della pesatrice e intensità di vibrazione dei canali vibranti).

## 2.3 Funzione Obiettivo

L'obiettivo del paragrafo è quello di proporre uno strumento per la valutazione delle prestazioni di una pesatrice multitesta. Verrà formalizzata una funzione obiettivo di riferimento che sarà utilizzata per progettare in maniera economica i parametri di processo e per condurre il confronto tra la soluzione proposta e quella attualmente implementata in azienda.

### 2.3.1 Analisi del problema

Per valutare le prestazioni della pesatrice multitesta è stato necessario individuare una funzione obiettivo. In altre parole si è determinato il parametro di merito in grado di valutare la qualità dell'output offerto da tale macchinario: il profitto associato alla vendita di una confezione del prodotto trattato. Con processo di confezionamento ideale s'intende quello in cui è possibile confezionare sempre la quantità nominale. Nella realtà, la quantità confezionata, e di conseguenza il profitto unitario, è una variabile aleatoria. Il parametro di merito selezionato è il rapporto fra il valore atteso del profitto unitario  $E(P)$  e lo stesso valore calcolato nel caso di un processo di confezionamento ideale  $P_{teorico}$ , che risulta non affetto da variabilità. Le prestazioni di una pesatrice multitesta saranno tanto più di "qualità" tanto più il valore di tale indicatore si avvicinerà ad uno, ovvero al processo di confezionamento ideale. Valutare il processo di confezionamento con detto indicatore non è una scelta originale, anzi caratterizza tutta la letteratura che si è occupata dei problemi del confezionamento (*canning problem*). Essa è sufficientemente estesa poiché, da subito, è stata evidente la necessità di scegliere opportunamente i parametri di processo al fine di ridurre il costo del sovraprodot-

to (*give-away*) evitando di violare le specifiche di legge sulla quantità minima confezionata.

La pesatrice multitesta riempie delle confezioni vuote con un prodotto (es. pasta, insalata, patatine, caramelle, etc.). La quantità di prodotto caricato in ogni confezione è una variabile aleatoria con media fissata dal confezionatore e varianza nota (in quanto dipende dalla media). Una confezione con peso superiore al limite inferiore imposto dalla legge è considerata “buona” (non difettosa), in caso contrario viene classificata come “non conforme” (difettosa) e non può essere venduta. Esistono dunque due voci di costo da tenere in considerazione, dal momento che impattano sul valore atteso del profitto unitario modificando la media della quantità da confezionare: il costo relativo al sovraprodotto, relativo alle confezioni buone ma riempite oltre la quantità nominale, e il costo associato alla rilavorazione di una confezione rifiutata a seguito dei controlli di verifica sulla quantità. Nel caso infatti di una confezione “non conforme” sarà necessario aprirla, estrarre il materiale e inserirlo nella tramoggia della pesatrice. Se la media della quantità confezionata è impostata ad un valore superiore alla quantità nominale, da un lato si riduce la possibilità di vedere una confezione rifiutata, ma dall’altro aumentano i costi associati all’eccessivo caricamento della confezione. Per contro, abbassando il valore della media, si osservano gli effetti opposti. Nasce dunque la necessità di individuare la media della quantità da confezionare in modo tale da minimizzare l’entità delle due voci di costo e, quindi, massimizzare il valore atteso del profitto unitario.

Come si è evidenziato il valore atteso del profitto unitario dipende fortemente dai test di verifica sulla quantità confezionata e dalle azioni intraprese a seguito dell’individuazione di una confezione difettosa. I primi lavori di ricerca in questo ambito, assumevano un controllo sulle quantità confezionate al 100%. Springer, nel 1951, fu il primo studioso ad occuparsi di individuare il miglior valore della media della quantità da confezionare [Spr51]. Egli considerava una situazione di confezionamento in cui fossero presenti un limite inferiore  $L$  e superiore  $U$  di specifica, assumeva che la quantità scaricata fosse una variabile aleatoria gamma e che i costi associati alle confezioni sottocaricate fossero diversi da quelli associati alle confezioni sovracaricate, ma costanti e indipendenti dalla quantità confezionata. Springer individuò numericamente il valore della media ottima; nel 1979 Nelson [Nel79] propose un nomogramma per l’individuazione della soluzione di Springer.

Nel 1962 Bettes [Bet62] studiò una situazione del tutto simile a quella di Springer, arrivando ad individuare congiuntamente la media e il limite superiore ottimo. Fu dunque Bettes che risolse per la prima volta un *two-level canning problem*, ovvero il problema del confezionamento in cui si determina economicamente sia il valore della media sia il valore del limite superiore di specifica per la quantità scaricata. È chiaro che il *single-level canning problem* è quello che mira ad individuare il solo valore della media.

Nel 1977 Hunter e Karta [Hun77] risolsero il *single-level canning problem* assumendo l'esistenza di un mercato secondario in cui poter vendere le confezioni "difettose" ad un prezzo noto, costante e minore del prezzo per il mercato principale. Ancora Nelson nel 1978 [Nel78] derivò una soluzione approssimata anche per questo problema. Il modello [Hun77] assumeva invece un costo associato al sovra/sotto caricamento costante ed indipendente dalla quantità confezionata come Springer. Nel 1984 Bisgaard, Hunter e Pallesen [Bis84] modificarono il modello [Hun77] assumendo che i costi associati al sovra/sotto caricamento fossero proporzionali, in maniera lineare, alla quantità confezionata. Carlsson, sempre nel 1984 [Car84], applicò l'impostazione di [Bis84] anche ai costi associati alle confezioni "buone", ritenendo così il costo di produzione proporzionale alla quantità confezionata. Nel 1987 Golhar [Gol87] osservò che l'ipotesi di esistenza di un mercato secondario era poco realistica; formulò allora il *single-level canning problem* ipotizzando che le confezioni "difettose" fossero rilavorate fino a quando non divenissero "buone". Nel 1988 Golhar e Pollock [Gol88] estesero l'impostazione di [Gol87] al *two-level canning problem*. Nel 1991 Schmidt e Pfeifer [Sch91] sottolinearono che il modello [Gol88] restituisce la soluzione ottima nel caso in cui non esistano dei vincoli di capacità produttiva. Essi, allora, basandosi su [Gol88] svilupparono una soluzione del *two-level canning problem* considerando la capacità della fase "collo di bottiglia". In ultimo, nel 1997, Liu, Tang e Chun [Liu97] svilupparono il *two-level canning problem* considerando, a differenza di [Sch91], il soddisfacimento della domanda. Essi inoltre dimostrarono che la presenza di un limite superiore di specifica, nelle loro ipotesi di lavoro, migliora il valore atteso del profitto unitario rispetto alla stessa situazione senza limite superiore. Ancora relativamente a questa via di ricerca, vanno menzionati i lavori di Schmidt e Pfeifer [Sch89] che forniscono uno strumento di valutazione del miglioramento del valore atteso del profitto unitario in seguito ad una riduzione della varianza caratteristica

del processo di confezionamento e di Mihalko e Golhar [Mih95] che propongono un intervallo di confidenza per il valore atteso del profitto unitario in presenza di una varianza del processo di confezionamento non nota e stimata da un campione. Nel 1989 fu Carlsson [Car89] ad ipotizzare, per primo, un controllo a campione sulle confezioni realizzate. Egli ipotizzò che la verifica delle quantità confezionate seguisse un piano di campionamento per variabili come quello proposto dalle MIL STD 414 B. Nel 1991 invece Boucher e Jafari [Bou91] assunsero che la verifica delle quantità confezionate segua un piano di campionamento per attributi come quello proposto dalle MIL STD 105 D. In seguito, Al-Sultan [Als94] estese i risultati di questo modello ad una situazione produttiva con due stadi di controllo e di produzione in serie. Nel 1995 Al-Sultan e Pulak [Als95] proposero la risoluzione di un *single-level canning problem* in cui si effettuasse un controllo attraverso un piano di accettazione per attributi: se il lotto risulta rifiutato si passa ad un'ispezione al 100% in cui le confezioni difettose vengono sostituite. Nel caso di rifiuto del lotto, e susseguente controllo al 100%, il ricavo conseguibile dal lotto è minore rispetto a quello relativo ad un lotto di confezioni subito accettato. Nell'intenzione degli autori, il minore ricavo conseguibile, rende conto delle violazioni rispetto ai programmi di produzione che il rifiuto di un lotto provoca. Gli stessi autori [Als97] proposero una valutazione economica della riduzione della varianza caratteristica del processo di confezionamento basandosi sul modello [Als95]. Le modellizzazioni qui citate assumono tutte, salvo i casi in cui è esplicitamente dichiarato il contrario, che:

- la quantità confezionata sia distribuita come una normale;
- la varianza di tale quantità sia nota, caratteristica del processo ed indipendente dalla media;
- la media sia sotto il controllo del confezionatore e che una sua modifica non influenzi il valore della varianza.

Nel caso in esame la quantità confezionata non può schematizzarsi come una variabile aleatoria normale. Inoltre la varianza del processo di confezionamento non è unica e caratteristica del processo stesso poiché dipende dalla configurazione della pesatrice [Ferr99]. Inoltre, si fa notare che i controlli modellizzati in letteratura non sono quelli richiesti dalla legge italiana. Infatti, se è vero che la trattazione

di [Bou91] tiene conto di un piano di campionamento per attributi, è pur vero che non è presente il test sulla media della quantità confezionata. Proprio la differenza fra i modelli teorici e i controlli imposti dalla legge, spinse B. J. Melloy nel 1991 [Mel91] a proporre un modello per la definizione della media ottimale per la quantità confezionata e dei limiti superiori e inferiori per individuare le confezioni sotto/sovra cariche al fine di superare, con una certa probabilità che dipende dalla propensione al rischio del confezionatore, il controllo a campione richiesto dalla normativa americana NBS handbook 133. Le assunzioni di [Mel91] sono:

- la quantità confezionata non è una variabile aleatoria normale, ma la sua distribuzione di probabilità è nota;
- la tara è, invece, una variabile aleatoria normale;
- le quantità confezionate in cicli di lavoro successivi sono indipendenti.

Il modello [Mel91] è sicuramente il più vicino alla situazione in analisi. Purtroppo però [Mel91]:

- modella la normativa americana che è diversa da quella italiana sia dal punto di vista dei controlli richiesti, sia per quanto riguarda le ammende comminate (ovvero i ricavi conseguibili);
- necessita di un valore di rischio accettabile dal confezionatore che non è ben individuabile;
- assume che le confezioni “difettose” sorteggiate nel campione di controllo, vengano sostituite con altrettante “buone”.

In particolare l’ultima assunzione è sembrata poco condivisibile, in quanto i processi di confezionamento sono altamente automatizzati e la logica di lavoro è tipicamente a lotti. In questa situazione, ripristinare le confezioni “difettose” significa vincolare il confezionamento di un nuovo prodotto all’esito del controllo di legge sul lotto appena concluso, in quanto è necessaria l’informazione finale sul numero di confezioni “difettose” sorteggiate nel campione che devono essere ripristinate. Si ritiene che questa situazione intralci il ritmo produttivo, e vincoli

eccessivamente il confezionatore che si trova obbligato ad eseguire il controllo di legge immediatamente dopo il confezionamento.

Sulla scorta delle considerazioni precedenti, si è ritenuto necessario sviluppare una modellizzazione che assume:

- la quantità confezionata sia una variabile aleatoria la cui distribuzione è ignota;
- il controllo della quantità confezionata debba permettere il soddisfacimento della legge italiana n°690 del 1978. Nel caso sia presente una bilancia che sia in grado di definire con precisione il peso di tutte le confezioni, in accordo con quanto asserito dalla legge italiana non risultano necessari i controlli a campione;
- di non sostituire le confezioni difettose sorteggiate nel campione.

### 2.3.2 La funzione di valutazione con controllo al 100%

Si definisce:

$W$  = quantità confezionata. E' una variabile aleatoria di media  $\mu_W$  e deviazione standard  $\sigma_W$  (g);

$\mu_W$  = media del processo;

$\sigma_W$  = deviazione standard del processo;

$w_i$  = quantità di materiale caricata sul cestello i-esimo (g).  $w_i \sim N(\mu_{w_i}; \sigma_{w_i}^2)$ ;

Max E(P) = massimizzare il valore atteso del profitto unitario;

P = profitto unitario per confezione = Ricavo unitario(R) - Costi unitari(C);

a = prezzo di vendita di una confezione (€cent/confezione);

c = costo unitario del materiale da confezionare (€cent/g);

Nom = Valore nominale della confezione (g);

EMT = Errore Massimo Tollerato (g) (Tabella 1.1 a pagina 5);

L = limite di specifica inferiore imposto dalla legge, al disotto del quale una confezione è considerata difettosa. È calcolato come Nom - EMT;

r = costo unitario di rilavorazione della confezione. Include il costo cernita CO (l'operatore deve aprire la confezione, estrarre il materiale e inserirlo all'interno della tramoggia) (€cent/confezione) + costo macchinario CM (che ha già effettuato la lavorazione del materiale) (€cent/confezione) + costo del cellophane CC

utilizzato per il confezionamento di un'unità (€cent/confezione) + un eventuale costo del prodotto CMAT (€cent/confezione);

$\alpha$  = coefficiente di proporzionalità fra la media della quantità caricata nell' $i$ -esimo cestello e la deviazione standard di questa.

Detto  $P_{teorico}$  il profitto unitario con un processo di confezionamento ideale e  $P$  il profitto unitario reale, allora  $\max \frac{E(P)}{P_{teorico}} = \max E(P)$  poiché, noti i costi e i ricavi di produzione e di controllo,  $P_{teorico}$  è una costante.

Si assume che:

- la bilancia situata alla fine della fase di confezionamento non generi errori (è sempre in grado di separare le confezioni buone da quelle non conformi), di conseguenza non sia necessario effettuare un piano di accettazione;
- si conosca il peso esatto di ogni cestello, dal momento che si aspetta che le oscillazioni siano terminate (non sono presenti vincoli temporali) oppure si ha a disposizione una tecnologia avanzata in grado di annullare le oscillazioni ambientali.

La funzione obiettivo viene formulata come:

$$\max E(P) = E(R - C)$$

dove:

$$R = \begin{cases} a, & \text{se } (W \geq L); \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

$C$  = costo materia prima + costo di rilavorazione

$$\text{Costo materia prima} = \begin{cases} cW, & \text{se } (W \geq L); \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Il costo relativo all'utilizzo della materia prima viene sostenuto un'unica volta anche nel caso in cui la confezione risultasse non conforme e necessitasse dunque di essere rilavorata. Per questo motivo si è deciso di considerarlo solo nel caso in cui la confezione risultasse vendibile.

$$\text{Costo di rilavorazione} = \begin{cases} r, & \text{se } (W < L); \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$



Il costo di rilavorazione, come precedentemente detto, tiene in considerazione diverse voci di costo. Premettendo che l'analisi di tali costi dipende dai singoli casi aziendali, si ritiene tuttavia di poter inglobare in tale voce quantomeno il costo dell'operaio che è costretto a riaprire la confezione scartata perché il quantitativo di prodotto contenuto all'interno possa essere riprocessato dalla pesatrice, impiegando del tempo che potrebbe essere utilizzato per compiere altre mansioni. Ad esso si possono poi aggiungere i costi di funzionamento del macchinario relativi al tempo speso per rilavorare la confezione e i costi del cellophane utilizzato. Si è osservato che alcuni prodotti, nel caso in cui non venissero rilavorati entro un certo intervallo di tempo, devono essere buttati. Quindi nel calcolo del costo di rilavorazione risulta necessario tenere opportunamente in considerazione questo fenomeno.

Nello specifico potremmo calcolare tali costi come:

$$CO = \text{costo cernita} = \left(\frac{CDL}{3600}\right) \cdot TI \cdot 100 \text{ (€cent/confezione)}$$

$$CM = \text{costo macchina} = \left(\frac{AMM+CE}{3600 \cdot HDF}\right) \cdot TR \cdot 100 \text{ (€cent/confezione)}$$

$$CC = \text{costo cellophane} = \left(\frac{C_{cel}}{100}\right) \cdot C_{conf} \cdot 100 \text{ (€cent/confezione)}$$

$$CMAT = \text{costo materiale che non può più esser rilavorato} = \delta cW \text{ (€cent/confezione)}$$

$$\text{dove } \delta = \begin{cases} 0, & \text{se il prodotto è sempre rilavorabile;} \\ 1, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

nello specifico:

- CDL = costo del lavoro (€/h);
- TI = tempo utilizzato per reintrodurre il materiale nella tramoggia di alimentazione (s);
- AMM = ammortamento annuo del macchinario (€/anno);
- HDF = ore di funzionamento annue della pesatrice (h/anno);

- TR = tempo per rilavorare il materiale contenuto nella confezione “non conforme” (s);
- CE = costo dell’energia (€/anno);
- Ccel = costo del cellophane al kg (€/kg);
- Cconf = quantità di cellophane utilizzata per la singola confezione (g).

Per cui a meno di ulteriori indagini:

$$r = CM + CC + CO + CMAT$$

La funzione obiettivo risulta:

$$\begin{aligned} E(P) &= aPr(W \geq L) - c\mu_W Pr(W \geq L) - rPr(W < L) \\ &= (a - c\mu_W)Pr(W \geq L) - rPr(W < L) \end{aligned}$$

I vincoli sono:

$$a \geq c\mu_W \quad (2.1)$$

$$r \leq c\mu_W \quad (2.2)$$

Il vincolo 2.1 impone che il ricavo associato ad una confezione di prodotto debba essere maggiore o al più uguale al suo costo unitario di produzione. In caso contrario l’azienda produrrebbe un prodotto a cui è sempre associata una perdita.

Il vincolo 2.2 esprime invece la necessità che il costo di rilavorazione sia sempre inferiore o uguale al costo unitario di produzione, altrimenti risulterebbe maggiormente proficuo buttare una confezione non conforme piuttosto che rilavorarla.

### 2.3.3 Analisi della funzione obiettivo

Questo paragrafo è dedicato all’analisi della funzione obiettivo. Ogni elemento viene inizialmente analizzato separatamente dagli altri, in una seconda fase si dividono i fattori in due sottoinsiemi e si analizza il comportamento di ciascun gruppo in maniera separata.

I valori di default impostati per valutare la funzione obiettivo sono:

a	160 (€cent/conf)	Pr	0,9
c	0,525 (€cent/conf)	$\mu_W$	200 (€cent/conf)
r	47,51 (€cent/conf)	CMAT	89,25 (€cent/conf)

**Tabella 2.1:** Valori di default usati per studiare la funzione obiettivo. Nel valore “r” (costo unitario di rilavorazione) riportato non è incluso l’eventuale costo del materiale che non è più rilavorabile, che è invece riportato nella voce “CMAT”.

### Un fattore per volta

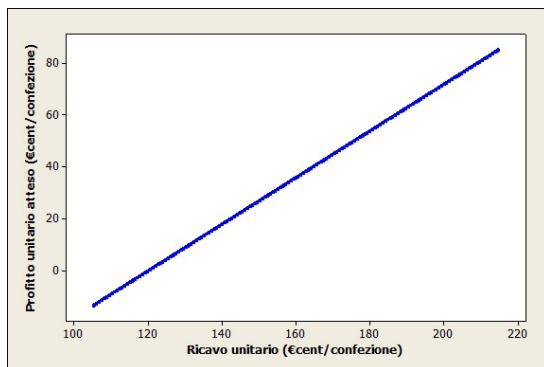
Viene ora analizzato l’impatto di ogni fattore sul risultato della funzione obiettivo.

In Figura 2.9 è riportato l’andamento del valore atteso del profitto unitario al variare del ricavo associato alla vendita di una confezione di prodotto. È facilmente intuibile che un aumento di tale valore si ripercuote positivamente sull’output della funzione obiettivo. In Figura 2.10 si osserva invece l’impatto del costo di rilavorazione, il suo comportamento è facilmente prevedibile: un suo aumento causa una diminuzione del profitto atteso.

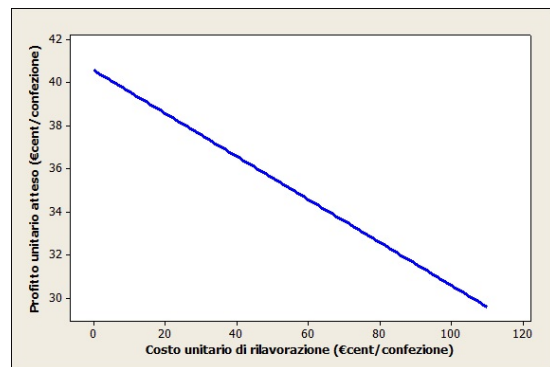
In Figura 2.11 si riporta l’andamento della funzione obiettivo al variare del costo unitario della materia prima. Dall’osservazione del grafico si evince che tale fattore ha un impatto molto rilevante: esso infatti si ripercuote in maniera significativa sul profitto unitario atteso. Un altro fattore che si è andato ad esaminare è la probabilità associata alla produzione di confezioni conformi, quindi con media superiore al limite inferiore. Osservando il suo andamento, riportato in Figura 2.12, si nota che anch’esso impatta in maniera rilevante sulla funzione obiettivo. Tale risultato era facilmente prevedibile: la massimizzazione del profitto atteso si ha quando la probabilità di produrre confezioni conformi è pari a uno.

In ultimo si è analizzato l’andamento della media della quantità confezionata. Si è esaminato in maniera separata il caso di prodotti conformi da quelli non conformi, anche se è facilmente intuibile che un aumento di entrambe le medie porti ad una diminuzione del profitto unitario. In Figura 2.13 è rappresentato l’impatto della media dei prodotti vendibili per legge; si osserva che il valore massimo della

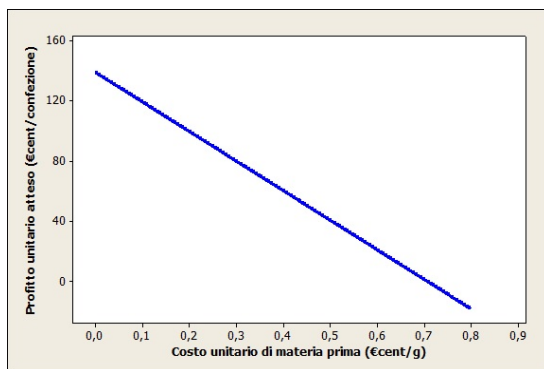
funzione obiettivo si raggiunge in relazione al minimo valore confezionabile: 191 g. In Figura 2.14 si riporta invece l'andamento del profitto unitario al variare della media delle confezioni non conformi, un aumento di tale valore si ripercuote negativamente sull'output. Di conseguenza risulta più economico scartare confezioni il cui peso associato sia il minore possibile. Si è fatto variare tale valore tra un minimo di zero per tenere in considerazione quei prodotti che possono essere rilavorati in ogni situazione e un massimo di 190 g, quindi appena sotto il limite inferiore.



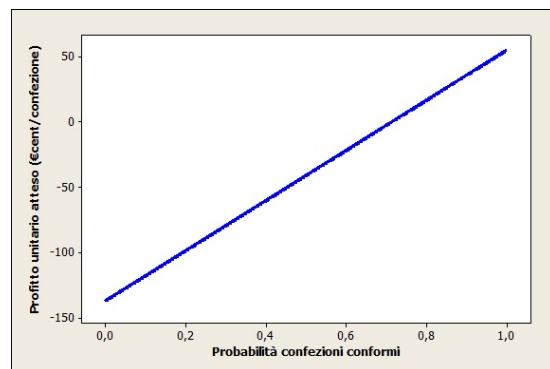
**Figura 2.9:** Andamento della funzione obiettivo al variare del ricavo unitario



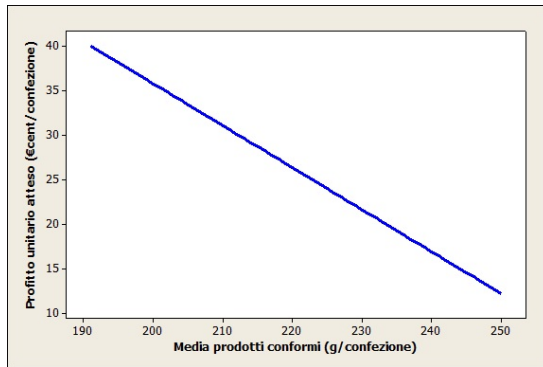
**Figura 2.10:** Andamento della funzione obiettivo al variare del costo di rilavorazione



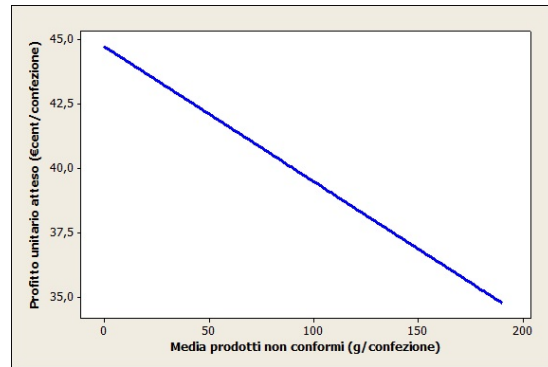
**Figura 2.11:** Andamento della funzione obiettivo al variare del costo unitario di materia prima



**Figura 2.12:** Andamento della funzione obiettivo al variare della probabilità di confezioni conformi



**Figura 2.13:** Andamento della funzione obiettivo al variare della media delle confezioni conformi



**Figura 2.14:** Andamento della funzione obiettivo al variare della media delle confezioni non conformi

## Analisi a gruppi

I fattori analizzati possono essere divisi in due gruppi:

### 1. Parametri di prodotto

Il ricavo unitario, il costo unitario di rilavorazione e il costo unitario di materia prima sono considerati *product-specific*. Essi infatti si modificano al variare del prodotto preso in considerazione mentre definita una categoria specifica di prodotto rimangono inalterati;

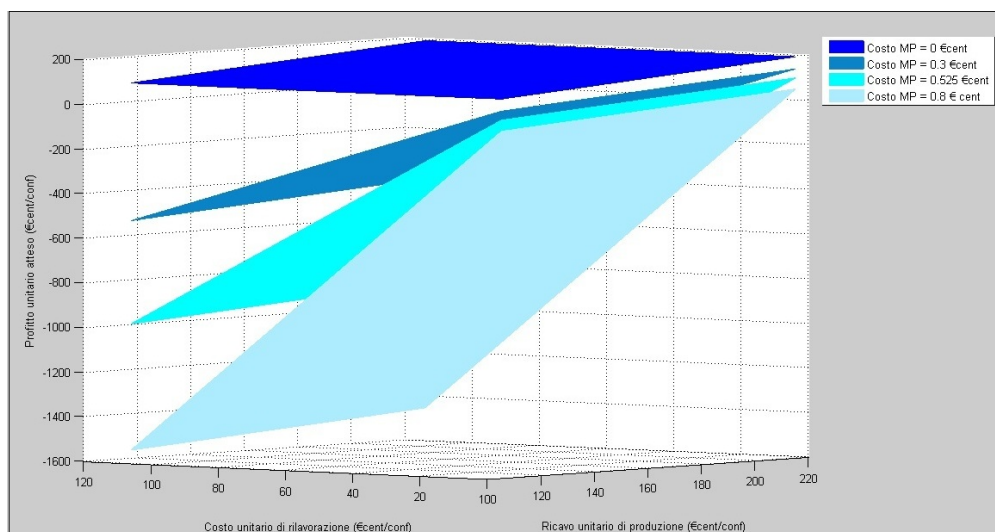
### 2. Parametri di processo

La media della quantità confezionata e la probabilità di non conformi dipendono invece dal processo di confezionamento. La quantità confezionata è una variabile aleatoria, in particolare è possibile individuare una media della quantità confezionata “conforme” e una media dei “non conformi”, che quindi necessitano di essere rilavorati.

In Figura 2.15 è riportato l’andamento della funzione obiettivo al variare dei parametri di prodotto. Sull’asse delle ascisse è riportato il ricavo unitario ottenibile dalla vendita di una confezione. Dato inizialmente un costo di materia prima pari a 0,525 €cent/confezione, il ricavo dev’essere sicuramente maggiore o al più uguale di detto valore moltiplicato per la quantità media di prodotto confezionato. Fissando tale parametro pari al valore nominale della confezione quindi 200 g, il costo di materia prima relativo ad una confezione risulta pari a 105 €cent. Si è

quindi fatto variare il ricavo unitario tra questo valore minimo e un massimo di 215 €cent/confezione. Sull'asse delle ordinate si riporta invece il valore del costo di rilavorazione calcolato come somma del costo di cernita, costo macchina e costo *cellophane*. Il profitto unitario è invece rappresentato sull'asse z. Si è deciso inoltre di far variare il costo unitario di materia prima: ogni superficie è caratterizzata da un costo unitario di materia prima costante, tali superfici si definiscono quindi di isocosto.

Osservando il grafico si nota che al diminuire del costo unitario di materia prima l'inclinazione della superficie diminuisce, restituendo valori della funzione obiettivo sempre migliori. Quando il costo unitario di produzione (costo unitario di materia prima moltiplicato per il peso della confezione) è superiore al ricavo, si osserva un drastico peggioramento della funzione obiettivo. Il fattore costo dunque è in grado di influenzare in maniera significativa la risposta attesa, è necessario quindi calcolarlo con molta attenzione e nel corso del tempo si deve puntare ad una sua diminuzione continua. Si può concludere che a parità di costo unitari di materia prima, l'effetto combinato di un aumento del ricavo unitario e di una diminuzione del costo unitario di rilavorazione impatta in maniera positiva sul valore del profitto unitario atteso.

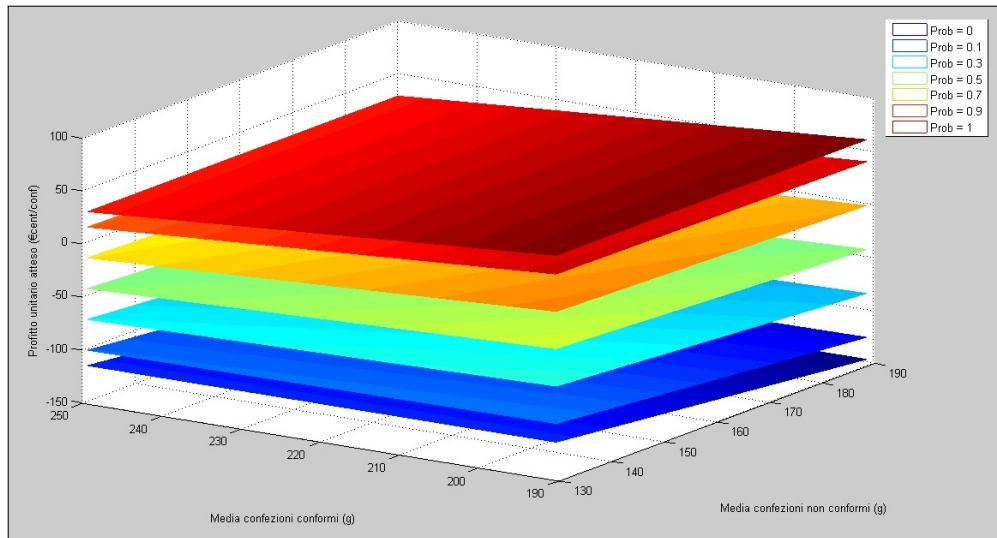


**Figura 2.15:** Analisi della funzione obiettivo variando i parametri di costo.

L'andamento della funzione obiettivo al variare dei parametri di processo è rappresentato in Figura 2.16. Definito il valore nominale della confezione pari a

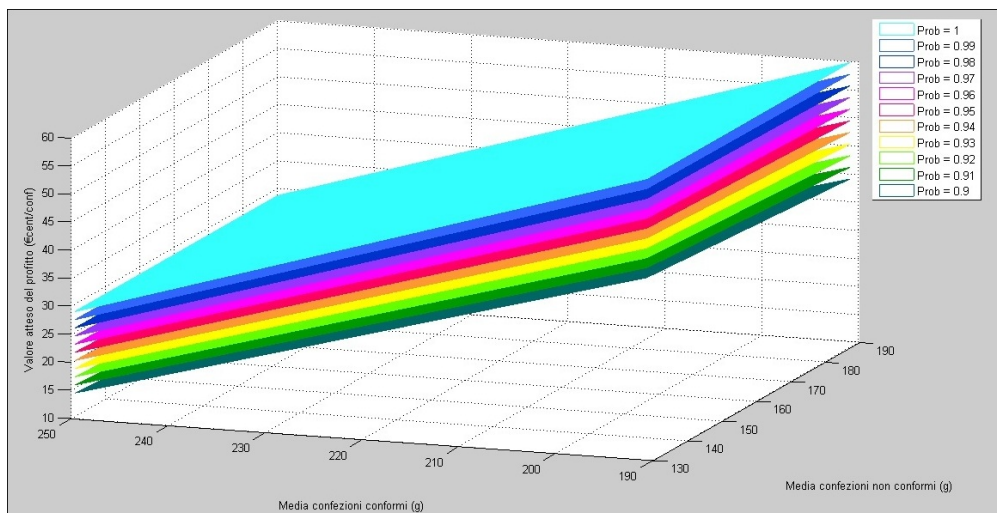
200 g è facile individuare il valore del limite inferiore: dalla Tabella 1.1 si evince che tale valore è pari a 191 g. Sull'asse delle ordinate è rappresentata la media dei prodotti conformi. Il suo intervallo di variazione va da un valore minimo che coincide proprio con il limite di legge ad un valore massimo di 250 g. La variabile che misura il peso medio dei prodotti non conformi è invece riportata sull'asse delle ascisse. Il valore massimo assumibile da tale variabile è 190 g (per approssimazione per difetto) mentre si è stimato un valore minimo di 130 g (da diverse campagne sperimentali non si è mai verificato il confezionamento di un prodotto con peso inferiore a 130 g, si considera solo il caso di prodotti che non sempre possono essere rilavorati.). Il valore assunto dalla funzione obiettivo in corrispondenza di ogni combinazione di fattori è riportato sull'asse z. Si è inoltre deciso di far variare la probabilità; ogni superficie è caratterizzata da un valore di probabilità costante.

Si osserva che all'aumentare congiunto della media delle quantità dei prodotti conformi e della media di quelli non conformi, la funzione obiettivo peggiora. Questo comportamento è facilmente spiegabile: la massimizzazione della funzione obiettivo si otterrebbe producendo solo confezioni conformi, il cui peso risulti esattamente uguale al limite inferiore. Si osserva che al variare della probabilità varia la pendenza della relativa superficie. Infatti se la probabilità fosse esattamente uguale a uno, la variazione della media dei non conformi (che appunto non esisterebbero) non dovrebbe influenzare l'output; tale risultato è confermato dal grafico. Di contro quando la probabilità assume valore pari a zero, quindi nel caso in cui non si producessero prodotti vendibili, una variazione del peso di questi non dovrebbe influenzare la funzione obiettivo; il grafico rispecchia dunque questa situazione.



**Figura 2.16:** Analisi della funzione obiettivo variando i parametri di processo

Dopo aver effettuato diversi esperimenti si è potuto osservare come la probabilità di produrre confezioni conformi sia superiore al 90%. Per questo motivo si è deciso di riproporre il precedente grafico facendo variare la probabilità solo tra i valori più plausibili (Figura 2.17). Si osserva che la probabilità continua ad influenzare positivamente l'output della funzione obiettivo anche se in maniera minore.

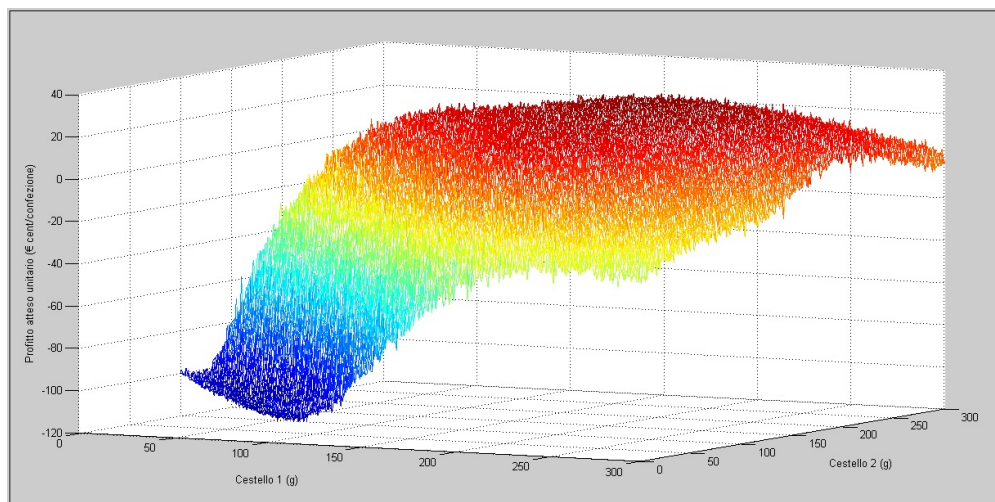


**Figura 2.17:** Analisi della funzione obiettivo al variare della probabilità di conformi



### Analisi con 2 cestelli

In questo paragrafo si esamina il comportamento della funzione obiettivo, quindi del profitto unitario atteso, al variare della configurazione della pesatrice multitestata. Per semplicità e per motivi di rappresentazione grafica si è deciso di prendere in esame il solo caso ideale di pesatrice caratterizzata da soli 2 cestelli. Si suppone che il comportamento della funzione obiettivo in questo caso base sia estendibile anche agli altri casi, quindi a pesatrici caratterizzate da un numero maggiore di teste.



**Figura 2.18:** Analisi della funzione obiettivo al variare della quantità presente nei due cestelli della pesatrice multitesta

Dall'osservazione della Figura 2.18 si evince che esiste un'unica regione di ottimo, ottenuta in corrispondenza di una particolare configurazione di cestelli. Tale regione è inscrivibile all'interno del quadrato ottenuto facendo variare sia il primo che il secondo cestello tra 160 g e 230 g. Le configurazioni all'interno di questa regione generano un profitto unitario atteso che varia da 24 €cent/confezione a 30 €cent/confezione.

Avendo considerato solamente due cestelli e avendoli fatti variare all'interno del medesimo intervallo di variazione, la funzione obiettivo risulta dunque simmetrica. In Appendice B si riportano le diverse viste della funzione obiettivo.

# Capitolo 3

## Il metodo di risoluzione

### 3.1 Metodologia RSM

*Response Surface Methodology* (RSM) è una collezione di tecniche statistiche e matematiche utili allo sviluppo, al miglioramento e all'ottimizzazione di processi. Questo metodo è molto utilizzato in ambito industriale, soprattutto nelle situazioni in cui sono molte le variabili di input che potenzialmente influenzano le misure di *performance* o le caratteristiche di qualità di interesse del processo in esame. Le variabili di input (o variabili indipendenti), i cui valori possono essere controllati e fissati dallo sperimentatore, sono dette fattori. La variabile di risposta (o variabile dipendente) è la quantità misurata e si assume che il suo valore sia influenzato da cambiamenti nei livelli dei fattori. Per semplicità assumiamo che sia una sola, sebbene in pratica ci possano essere più variabili di risposta da investigare simultaneamente.

RSM comprende:

- progettazione di un insieme di esperimenti per avere misure adeguate e affidabili della risposta di interesse;
- determinazione del modello matematico che meglio fitta i dati ottenuti dagli esperimenti progettati al punto precedente, conducendo appropriati test di ipotesi sui parametri del modello;
- determinazione dei valori ottimali delle variabili di input che producono il valore massimo (o minimo) della risposta.

Supponiamo che la risposta  $y$  dipenda da  $k$  fattori  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k$  secondo la relazione:

$$y = \varphi(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) + \epsilon$$

dove  $\varphi$  è la vera funzione di risposta e  $\epsilon$  rappresenta le fonti di variabilità contenute in  $\varphi$  quali gli inevitabili errori di misurazione della risposta, l'effetto di altre variabili non prese in considerazione, il rumore di background del processo. Trattiamo  $\epsilon$  come un errore statistico, assumendo che abbia una distribuzione normale di media 0 e varianza  $\sigma^2$ . Come esempio si può pensare alla resa di un processo chimico ( $y$ ) in funzione del tempo ( $\varepsilon_1$ ) e della temperatura ( $\varepsilon_2$ ) di reazione. Essendo nulla la media di  $\epsilon$ , si ha:

$$E[y] \equiv \eta = E[\varphi(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)] = \varphi(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$$

Le variabili  $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k$  sono usualmente dette variabili naturali perchè sono espresse in unità di misura naturali quali i gradi Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) per la temperatura o i minuti per il tempo. In generale è però più conveniente trasformare le variabili naturali in variabili codificate  $x_1, \dots, x_k$  in quanto l'operazione di codifica rimuove le unità di misura delle variabili e dunque le distanze misurate lungo gli assi delle variabili codificate in uno spazio  $k$ -dimensionale sono standardizzate (o definite nella stessa metrica). I due principali vantaggi nell'usare variabili codificate quando si fittano modelli polinomiali sono:

- una maggior semplicità computazionale e una maggior accuratezza nella stima dei coefficienti del modello;
- una più immediata interpretabilità delle stime dei coefficienti nel modello.

La funzione di risposta vera scritta in termini delle variabili codificate è:

$$\eta = \varphi(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) + \epsilon$$

Poichè la forma della funzione di risposta vera  $\varphi$  è incognita, è necessario approssimarla. Il primo passo in RSM consiste dunque nel trovare un'approssimazione (locale) ragionevole della vera relazione funzionale tra  $y$  e l'insieme delle variabili indipendenti. Ovviamente è inverosimile che un modello polinomiale approssimi adeguatamente la vera relazione funzionale sull'intero spazio delle variabili indipendenti: sarà appropriata per una regione relativamente piccola. Quasi tutti

i problemi RSM usano, in una prima fase, modelli della superficie di risposta del primo ordine:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

e successivamente modelli del secondo ordine:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.1)$$

in quanto se c'è curvatura nel sistema bisogna usare un polinomio di grado superiore al primo. Per stimare i parametri dei polinomi che approssimano la vera superficie di risposta si utilizza il metodo dei minimi quadrati; l'analisi della superficie di risposta è effettuata usando la superficie stimata. Se quest'ultima è un'approssimazione adeguata della superficie di risposta vera, allora l'analisi della superficie stimata è approssimativamente equivalente a quella del sistema attuale. I parametri del modello possono essere stimati più efficacemente se i dati sono ottenuti usando piani sperimentali appropriati.

RSM è una procedura sequenziale:

- si parte da condizioni operative correnti che sono in generale lontane dall'ottimo; c'è poca curvatura nel sistema e dunque è appropriato un modello del primo ordine;
- avendo lo sperimentatore l'obiettivo di spostarsi rapidamente in prossimità dell'ottimo, si utilizza una procedura basata sul gradiente per determinare la direzione lungo la quale  $\hat{y}$  aumenta (o diminuisce nel caso in cui l'ottimo sia un punto di minimo) più rapidamente. Ci si sposta dunque lungo la traiettoria di salita (o discesa) rapida secondo un passo opportunamente stabilito, determinando mediante esperimenti il valore della funzione risposta nei punti: condizioni correnti, condizioni correnti  $+\Delta, \dots$  fino a che non si osserva più crescita (o decrescita) nella risposta. Allora è necessario fittare un nuovo modello del primo ordine, determinare la nuova traiettoria di salita (o discesa) rapida e così via;
- si continua fino a che il modello del primo ordine presenta un *lack of fit* ossia non è più un'approssimazione adeguata della vera superficie di risposta. La

curvatura in quest'ultima indica che molto probabilmente lo sperimentatore è arrivato nella zona dell'ottimo. E' pertanto necessario un modello che incorpori la curvatura: un modello del secondo ordine è adatto nella maggior parte dei casi.

Una parte importante nell'analisi del secondo ordine è la determinazione della posizione e della natura (punto di massimo, di minimo o punto sella) del punto stazionario della superficie di risposta stimata. Nel caso in cui il punto stazionario sia un punto di massimo (o di minimo), può rivelare la posizione nello spazio delle variabili del piano che rappresenta le migliori condizioni operative per il processo; in caso contrario non è ragionevole proporlo come candidato per le condizioni ottimali.

### Il modello del secondo ordine della superficie di risposta

Il modello polinomiale del secondo ordine 3.1 può essere scritto in forma matriciale come:

$$M_p : y = \beta_0 + \mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta} + \mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} + \epsilon \quad (3.2)$$

dove l'errore aleatorio  $\epsilon$  è assunto normalmente distribuito con media 0 e varianza incognita  $\sigma^2$ .  $\mathbf{x}$  è il vettore  $k \times 1$  dei livelli dei  $k$  fattori,  $\beta_0$  è l'intercetta,  $\boldsymbol{\beta}$  è il vettore  $k \times 1$  dei coefficienti di regressione del primo ordine  $\beta_i$  e  $\mathbf{B}$  è la matrice simmetrica  $k \times k$  dei coefficienti di regressione del secondo ordine, con l' $i$ -esimo elemento diagonale pari a  $\beta_{ii}$  e l' $ij$ -esimo elemento fuori dalla diagonale pari a  $(1/2)\beta_{ij}$ .

Il modello 3.2 è caratterizzato da  $p+1$  parametri incogniti, dove  $p = 1 + 2k + \frac{k(k-1)}{2}$  è il numero dei coefficienti di regressione (intercetta  $\beta_0$ ,  $k$  coefficienti di regressione del primo ordine  $\beta_i$ ,  $k$  elementi diagonali  $\beta_{ii}$  di  $\mathbf{B}$ ,  $k(k-1)/2$  coefficienti  $\beta_{ij}$ ), mentre l'ulteriore parametro incognito è  $\sigma^2$ . Indichiamo con  $\hat{\mathbf{x}}^S = (\hat{x}_1^S, \hat{x}_2^S, \dots, \hat{x}_k^S)$  il punto stazionario della risposta quadratica stimata

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + \mathbf{x}^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{x} \quad (3.3)$$

dove  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\boldsymbol{\beta}}$  e  $\hat{\mathbf{B}}$  sono le stime ai minimi quadrati (Least Squares) rispettivamente dell'intercetta, dei coefficienti lineari e di quelli del secondo ordine. È possibile dare un'espressione generale per la localizzazione di  $\hat{\mathbf{x}}^S$ , stima del punto stazionario  $\mathbf{x}^S$

della vera funzione di risposta che, assumendo l'adeguatezza del modello, è 3.2.

Infatti risolvendo il seguente sistema di equazioni:

$$\hat{\delta}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \hat{y}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \hat{\boldsymbol{\beta}} + 2\hat{\mathbf{B}}\mathbf{x} = \mathbf{0}$$

dove  $\mathbf{0}$  è un vettore  $k \times 1$  di zeri, si ha:

$$\hat{\mathbf{x}}^S = -\frac{1}{2}\hat{\mathbf{B}}^{-1}\hat{\boldsymbol{\beta}}$$

e la risposta stimata in corrispondenza di  $\hat{\mathbf{x}}^S$  risulta essere:

$$\hat{y}^S = \hat{\beta}_0 + (\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + (\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{x}}^S = \hat{\beta}_0 + \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\boldsymbol{\beta}}.$$

Il punto stazionario  $\hat{\mathbf{x}}^S$  potrebbe essere un punto di massimo, di minimo o un punto sella di  $\hat{y}(\mathbf{x})$ . La sua natura è determinata dal segno degli autovalori della matrice  $\hat{\mathbf{B}}$ , i quali sono stime puntuali degli autovalori della matrice  $\mathbf{B}$ . Esprimiamo allora il sistema in forma canonica per essere in grado di descrivere con maggior dettaglio la natura della superficie di risposta stimata nell'intorno del punto stazionario.

Il primo passo nell'analisi canonica di un sistema con  $k$  variabili consiste nel traslare la sua origine dal centro del piano nel punto stazionario, ossia spostarla da  $(x_1, \dots, x_k) = (0, \dots, 0)$  a  $\hat{\mathbf{x}}^S$ . Per poterlo fare definiamo il vettore intermedio  $\mathbf{z} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^S$ . La 3.3 espressa in termini delle variabili intermedie  $z_1, \dots, z_k$  diventa:

$$\hat{y}(\mathbf{z}) = \hat{\beta}_0 + (\mathbf{z} + \hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + (\mathbf{z} + \hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\mathbf{B}}(\mathbf{z} + \hat{\mathbf{x}}^S) = \quad (3.4)$$

$$= [\hat{\beta}_0 + (\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\boldsymbol{\beta}}] + (\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\mathbf{B}} \hat{\mathbf{x}}^S + \mathbf{z}^T \hat{\boldsymbol{\beta}} + [\mathbf{z}]^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{z} + 2(\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{z} = \hat{y}(\hat{\mathbf{x}}^S) + \mathbf{z}^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{z}$$

in quanto  $2(\hat{\mathbf{x}}^S)^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{z} = -\mathbf{z}^T \hat{\boldsymbol{\beta}}$ .

La risposta stimata scritta in termini di  $\mathbf{z}$  è dunque somma della risposta stimata nel punto stazionario e di una forma quadratica in  $\mathbf{z}$ . Gli assi associati alle variabili  $z_i$  sono allineati con i corrispondenti assi dei valori di  $x_i$ , dato che è stata fatta solo una traslazione dell'origine del sistema di riferimento nelle variabili  $x_i$ . Per ottenere la forma canonica della risposta stimata definiamo un insieme di variabili canoniche  $\omega_1, \dots, \omega_k$  tali che

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}^T \mathbf{z} = \mathbf{M}^T (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^S) \quad (3.5)$$

essendo  $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \dots, \omega_k)^T$  e  $\mathbf{M} = [\mathbf{m}_1, \dots, \mathbf{m}_k]$  la matrice ortogonale  $k \times k$  le cui colonne sono gli autovettori  $\mathbf{m}_i$  della matrice  $\hat{\mathbf{B}}$ .

Gli elementi  $\mathbf{m}_i$  sono ottenuti risolvendo  $(\hat{\mathbf{B}} - \lambda_i \mathbf{I}_k)\mathbf{m}_i = \mathbf{0}$  tale che  $\mathbf{m}_i^T \mathbf{m}_i = 1$ . Per due autovalori  $\lambda_i$  e  $\lambda_j$  distinti ( $i \neq j$ ) deve valere  $\mathbf{m}_i^T \mathbf{m}_j = 0$ .

L'effetto della matrice  $\mathbf{M}$  è quello di diagonalizzare  $\hat{\mathbf{B}}$ , ossia  $\mathbf{M}^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{M} = \boldsymbol{\Lambda}$ , dove  $\boldsymbol{\Lambda}$  è la matrice diagonale avente come elementi della diagonale principale gli autovalori  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$  di  $\hat{\mathbf{B}}$ . La trasformazione nell'equazione 3.5 ruota gli assi associati alle variabili  $z_i$  negli assi delle variabili  $\omega_i$ , detti assi principali. Inoltre i coefficienti degli  $x_i$  sono i coseni direttori degli assi  $\omega_i$  rispetto agli assi  $x_i$  e un coefficiente di  $x_i$  unitario indica che l'asse  $\omega_i$  è parallelo all'asse  $x_i$ .

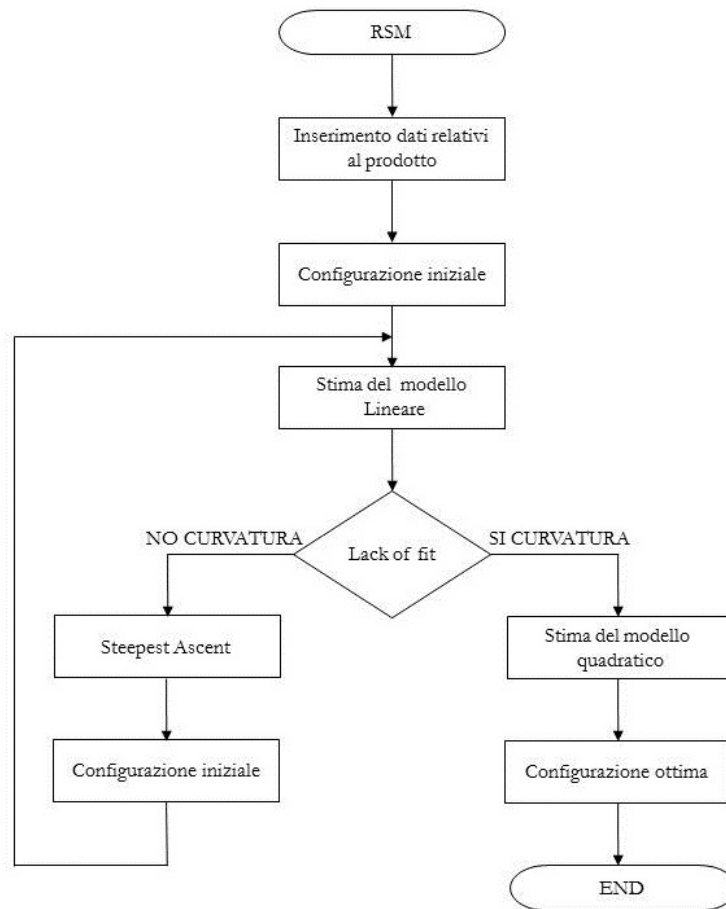
La forma canonica del modello

$$\hat{y} = \hat{y}(\hat{\mathbf{x}}^S) + \sum_{i=1}^k \lambda_i \omega_i^2 \quad (3.6)$$

si ottiene esprimendo la 3.4 nelle variabili canoniche  $\omega_i$ . Notiamo in particolare che  $\mathbf{z}^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{z} = \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{M}^T \hat{\mathbf{B}} \mathbf{M} \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\omega} = \lambda_1 \omega_1^2 + \dots + \lambda_k \omega_k^2$ , dove gli autovalori  $\lambda_i$  sono reali in quanto  $\hat{\mathbf{B}}$  è una matrice simmetrica, a valori reali. Nel nuovo sistema  $\omega_1, \dots, \omega_k$  ottenuto trasformando quello in  $x_1, \dots, x_k$  centrandolo nel punto stazionario e ruotando gli assi come presentato sopra, sono dunque scomparsi i termini del primo ordine e misti. La 3.6 descrive la natura del punto stazionario e del sistema intorno al punto stazionario: i segni dei  $\lambda_i$  determinano la natura di  $\hat{\mathbf{x}}^S$  mentre la grandezza relativa degli autovalori permette una migliore comprensione della risposta del sistema. In particolare se  $\lambda_1, \dots, \lambda_k$  sono

- tutti negativi: il punto stazionario è un punto di massimo;
- tutti positivi: il punto stazionario è un punto di minimo;
- alcuni positivi, altri negativi:  $\hat{\mathbf{x}}^S$  è un punto sella della superficie di risposta stimata.

La grandezza degli autovalori caratterizza invece il grado di curvatura della risposta quadratica stimata, ossia quanto velocemente l'altezza della superficie cambia allontanandosi da  $\hat{\mathbf{x}}^S$  nella direzione degli assi dei  $\omega_i$ . Ad esempio, se  $k=2$  e  $|\lambda_2| > |\lambda_1|$ , allora l'altezza della superficie varia più rapidamente spostandosi nella direzione dell'asse di  $\omega_2$  che in quella di  $\omega_1$ . Alcuni dei  $\lambda_i$  potrebbero essere



**Figura 3.1:** Passi procedura RSM

nulli o molto vicini a zero, indicando che la risposta stimata non varia allontanandosi da  $\hat{\boldsymbol{x}}^S$  nella direzione degli assi dei  $\omega_i$ . Per esempio nel caso  $k = 2$  potremmo avere  $\lambda_2 = 0$  e  $\lambda_1 < 0$ : la superficie varia solo nella direzione di  $\omega_1$ ; se dunque lo sperimentatore sta cercando la risposta massima, allora esiste un range di valori o di possibili condizioni operative lungo l'asse di  $\omega_2$  che danno tutti approssimativamente la stessa risposta ottima stimata.

### 3.1.1 Dettagli della procedura sequenziale

In questa sezione verranno presentati tutti i passi dell'algoritmo RSM volto a trovare il punto di massimo (più in generale il punto di ottimo) del valore atteso



della funzione obiettivo di natura stocastica  $y = \varphi(\xi_1, \dots, \xi_k) + \epsilon$  ossia il punto di minimo di  $\eta = E[\varphi(\xi_1, \dots, \xi_k) + \epsilon] = \varphi$ , in quanto il valore atteso di  $\epsilon$  è nullo per ipotesi. Come già affermato in precedenza è conveniente trasformare le variabili naturali  $\xi_1, \dots, \xi_k$  nelle variabili codificate  $x_1, \dots, x_k$ : se ad esempio per la variabile  $\xi_i$  interessa l'intervallo  $[\xi_{iL}, \xi_{iU}]$  allora:

$$x_i = \frac{\xi_i - \frac{\xi_{iL} + \xi_{iU}}{2}}{\frac{\xi_{iU} - \xi_{iL}}{2}}.$$

In generale la procedura RSM comprende due fasi: la funzione obiettivo è innanzitutto approssimata localmente con polinomi del primo ordine, in una seconda fase con polinomi del secondo ordine; in entrambi i casi si definisce una regione di interesse che è un sottoinsieme del dominio delle variabili. Per poter costruire il polinomio approssimante è necessario valutare la funzione obiettivo stocastica un certo numero di volte nei punti di un piano sperimentale; in genere si tratta di punti che si trovano sui bordi della regione di interesse. Nello specifico, per poter approssimare localmente la superficie di risposta con il modello del primo ordine:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \dots + \hat{\beta}_k x_k$$

consideriamo un piano fattoriale  $2^k$  replicato una volta. È importante replicare il punto centrale, con un opportuno numero di repliche, in quanto ci permette di stimare l'errore sperimentale e di verificare l'adeguatezza del modello del primo ordine stimato. Si noti che è un piano ortogonale; il punto centrale  $x_{in}$  indica la condizione operativa corrente mentre i passi di variazione di ogni variabile, che determinano la regione di interesse, sono scelti sulla base delle conoscenze che si possiedono sul processo. Per verificare l'adeguatezza del modello del primo ordine stimato eseguiamo un test di lack of fit e un test di significatività della regressione.

### Test di Lack of Fit

Per condurre questo test è necessario avere due o più osservazioni (repliche) della risposta per almeno una combinazione dei livelli dei fattori; nel nostro caso è possibile eseguire il test in quanto il punto centrale è replicato quattro volte. In generale supponiamo di avere  $n_i$  osservazioni della risposta all' $i$ -esima combinazione dei livelli dei fattori  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , per un totale di  $n = \sum_{i=1}^m n_i$  osservazioni e indichiamo con  $y_{ij}$  la  $j$ -esima osservazione della risposta ai livelli

dei fattori indicati nel vettore  $x_i$ . L'ipotesi nulla del test è: non c'è *lack of fit* del modello lineare di regressione, ovvero non è presente una curvatura sistematica.

Il test prevede di partizionare  $SS_E$  in due componenti: la somma dei quadrati dovuta all'errore puro  $SS_{PE}$  e la somma dei quadrati dovuta al *lack of fit*  $SS_{LOF}$ . Poichè  $y_{ij} - \hat{y}_i = (y_{ij} - \bar{y}_i) + (\bar{y}_i - \hat{y}_i)$  dove  $\bar{y}_i$  è la media delle  $n_i$  osservazioni ai livelli dei fattori specificati da  $x_i$ , e facendo il quadrato di entrambi i lati dell'equazione e sommando sugli indici  $i$  e  $j$  si ottiene  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$  valgono le seguenti relazioni:

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2.$$

Essendo  $n_i - 1$  i gradi di libertà dell'errore puro per ogni livello  $x_i$ , il numero totale dei gradi di libertà associati a  $SS_{PE}$  è  $\sum_{i=1}^m (n_i - 1) = n - m$ ; il numero dei gradi di libertà associato a  $SS_{LOF}$  è invece pari a  $m - p$  in quanto  $m$  sono i livelli di  $x$  ma  $p$  gradi di libertà sono persi perchè devono essere stimati per il modello  $p$  parametri. La statistica test è:

$$F_0 = \frac{SS_{LOF}/(m - p)}{SS_{PE}/(n - m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}}.$$

Considerando il valore atteso di  $MS_{PE}$  e  $MS_{LOF}$  si ha:

$$E[MS_{PE}] = \sigma^2$$

$$E[MS_{LOF}] = \sigma^2 + \frac{\sum_{i=1}^m n_i (E[y_i] - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2}{m - 2}.$$

Se il modello di regressione vero è lineare allora  $E[MS_{LOF}] = \sigma^2$  in quanto  $E[y_i] = \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ ; se invece non è lineare risulta  $E[MS_{LOF}] > \sigma^2$  in quanto  $E[y_i] \neq \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ . Inoltre se è vera l'ipotesi nulla, la statistica test è distribuita secondo una Fisher di parametri  $m - p$  e  $n - m$ . Pertanto, per testare se c'è o meno *lack of fit*, calcoliamo la statistica test  $F_0$  e concludiamo che possiamo rifiutare l'ipotesi nulla, vale a dire il modello di regressione non è lineare, se  $F_0 > F_\alpha(m - p, n - m)$ .

### Test di significatività della regressione

Si tratta di un test finalizzato a determinare se c'è una relazione lineare tra la variabile risposta  $y$  e i  $k$  fattori in esame. L'ipotesi nulla e l'ipotesi alternativa sono:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \exists j \text{ tale che } \beta_j \neq 0.$$

Se si rifiuta l'ipotesi nulla, allora la regressione è significativa, nel senso che almeno uno dei fattori contribuisce significativamente a spiegare la variabile risposta. Siano  $y_1, \dots, y_n$   $n$  osservazioni della variabile risposta. Il test prevede di partizionare la somma totale dei quadrati  $SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$  in una somma dei quadrati dovuta al modello di regressione e in una somma dei quadrati dovuta all'errore:

$$SS_T = SS_R + SS_E$$

dove  $SS_R = \hat{\beta}^T \mathbf{Y}^T \mathbf{y} - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2$  e  $SS_E = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \hat{\beta}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y}$ . Se l'ipotesi nulla è vera, la quantità  $SS_R/\sigma^2$  è distribuita secondo una  $\chi^2(k)$  e  $SS_E/\sigma^2$  secondo una  $\chi^2(n - k - 1)$ . Si può inoltre dimostrare che  $SS_E$  e  $SS_R$  sono indipendenti. La statistica test è

$$F_0 = \frac{SS_R/k}{SS_E/(n - k - 1)} = \frac{MS_R}{MS_E}$$

Si rifiuta l'ipotesi nulla a livello  $\alpha$  se  $F_0 > F_\alpha(k, n - k - 1)$ .

Se dal test di *lack of fit* concludiamo che il modello del primo ordine non sembra essere adeguato a descrivere localmente la superficie di risposta, indipendentemente dall'esito del test di significatività della regressione, passiamo a fittare un modello del secondo ordine. Se invece il test ci porta a concludere che non c'è *lack of fit*, nel caso in cui la regressione è significativa, ossia almeno un  $\hat{\beta}_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  è diverso da zero, eseguiamo una *line search* a partire dal punto centrale della corrente regione di interesse nella direzione di *steepest ascent* (supponiamo di essere interessati a un punto di massimo), ossia nella direzione di massima crescita della risposta, fino a che si rileva una curvatura significativa.

Nel caso in cui non c'è *lack of fit* ed eseguendo il test di significatività della regressione non possiamo rifiutare l'ipotesi nulla secondo cui tutti i  $\beta_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  sono

uguali a zero, allora il modello di regressione stimato è una costante. Potrebbe essere che a causa dell'inevitabile errore presente nella sperimentazione, ovvero a causa della natura stocastica della funzione obiettivo, il modello non colga la vera variabilità nei dati: è dunque opportuno estendere il piano sperimentale aggiungendo i punti assiali e ristimare il modello del primo ordine.

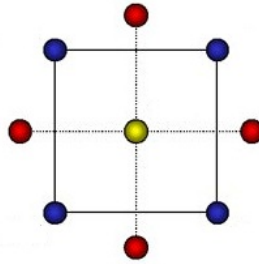
### 3.1.2 Implementazione

#### Definizione passo di variazione

Definita la condizione operativa corrente, è necessario determinare il passo di variazione di ogni variabile che va a determinare la regione di interesse. Tale passo si ottiene moltiplicando la configurazione iniziale (condizione di partenza) per un coefficiente  $\lambda$ . La variazione di questo coefficiente porta ad ampliare/restringere la regione di interesse: influenza quindi il risultato del test *lack of fit*. Un valore molto alto di  $\lambda$  garantisce la presenza di curvatura nel modello, in quanto la regione di interesse è così ampia da inglobare al suo interno il punto di ottimo (locale). Tale soluzione non è considerevole efficiente, in quanto non è assicurato che il modello del secondo sia in grado di fornire buone previsioni in tutta l'area considerata. Viceversa assegnando a  $\lambda$  un valore basso, si ottiene una regione d'interesse molto concentrata in cui non è detto sia presente il punto di massimo, questo permette di sfruttare l'algoritmo di *steepest ascent* che in pochi passi permette di raggiungere un'area significativa. In seguito a diverse campagne sperimentali, l'intervallo ottimo di variazione di  $\lambda$  è  $[0,16 ; 0,2]$  che garantisce un esito ottimale del test *lack of fit* unita a una buona significatività della regressione.

#### Il modello di regressione quadratico

Il piano sperimentale utilizzato per l'accostamento di modelli del secondo ordine è il cosiddetto piano composito centrale (CCD, *Central Composite Design*). Esso consiste di un fattoriale  $2^k$  (o un fattoriale frazionario di risoluzione V), con  $n_F$  prove di corner,  $2_k$  prove assiali o sulla stella e  $n_C$  prove centrali. In Figura 3.2 è riportato a titolo d'esempio un piano CCD per due fattori ( $k=2$ ).

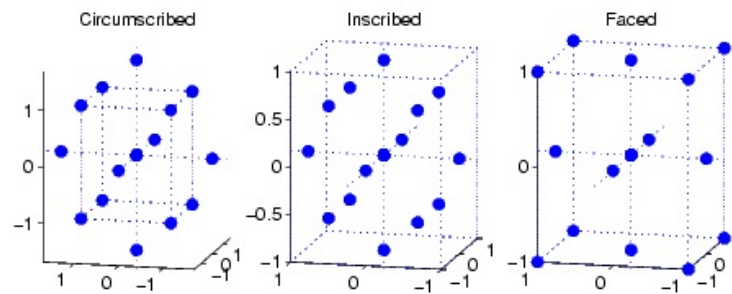


**Figura 3.2:** Piano composito centrale per  $k=2$

In questo caso avremo quattro punti di corner ( $n_F = 4$ ), quattro punti a stella e un certo numero di prove centrali, a discrezione dello sperimentatore. L'impiego pratico di un CCD spesso si realizza nella sperimentazione sequenziale. In altre parole, inizialmente si usa un piano fattoriale per accostare un modello del primo ordine, nel caso in cui questo modello mostri una mancanza di adattamento, vengono aggiunte le prove assiali per consentire l'inclusione nel modello dei termini quadratici. Il CCD è un piano molto efficiente per accostare il modello del secondo ordine, occorre però specificare due parametri del piano: la distanza  $\alpha$  delle prove assiali dal centro del piano ed il numero di punti centrali  $n_C$ . A seconda del valore assunto da  $\alpha$ , e quindi della posizione dei punti di stella, il piano viene definito inscritto, circoscritto o a facce centrate.

Nello specifico:

- se  $\alpha = 1$  e i fattori riscaldati sono a livelli minori, il piano è detto “inscritto”;
- se  $\alpha = (n_F)^{\frac{1}{4}}$ , il piano è detto “circoscritto”;
- se  $\alpha = 1$  e i fattori tutti allo stesso livello di  $\pm\alpha$ , il piano è detto “a facce centrate”.



**Figura 3.3:** Piani CCD per l'accostamento di modelli del secondo ordine

La scelta di  $\alpha$ , e quindi del tipo di piano, è dettata principalmente dalla regione di interesse entro cui si intende stimare i coefficienti del modello. È importante che il modello del secondo ordine fornisca buone previsioni in tutta la regione di interesse. Una previsione è definibile “buona”, se il modello corrispondente ha una varianza della risposta prevista ragionevolmente consistente e stabile nei punti di interesse  $\boldsymbol{x}$ .

Box e Hunter [Box57] suggeriscono che un piano di una superficie di risposta del secondo ordine dovrebbe essere ruotabile, il che sta a dire che la varianza della risposta prevista deve essere la stessa in tutti i punti  $\boldsymbol{x}$  che hanno la stessa distanza dal centro del piano. In altre parole la varianza della risposta prevista è costante sulle sfere concentriche. Un piano con questa proprietà farà sì che la varianza di  $\hat{y}$  resti inalterata quando il piano viene ruotato intorno al centro  $(0,0,\dots,0)$ , da qui il nome di piano ruotabile.

Un piano composito centrale è reso ruotabile dalla scelta di  $\alpha$ . Il valore di  $\alpha$  per la ruotabilità dipende dal numero di punti della porzione fattoriale del piano; in pratica  $\alpha = (n_F)^{\frac{1}{4}}$  produce un piano composito centrale ruotabile, dove  $n_F$  è il numero di punti usati nella porzione fattoriale del piano. Tuttavia l'esatta ruotabilità non è molto importante per avere un buon piano. In generale per una regione di interesse sferica la migliore scelta di  $\alpha$ , da un punto di vista della varianza di previsione per il CCD è porre  $\alpha = \sqrt{k}$ . Questo tipo di piano, detto CCD sferico (inscritto o circoscritto), pone tutti i punti del piano fattoriale ed assiale sulla superficie di una sfera di raggio  $\sqrt{k}$ . Per quanto riguarda invece il piano CCD a facce centrate, esso si usa quando la regione di interesse è cuboidale. Questo piano dispone i punti assiali o della stella sul centro delle facce del cubo,

come mostrato in Figura 3.3 per  $k=3$ . Si noti tuttavia che tali piani non sono ruotabili. Per maggiori approfondimenti si rimanda a [Mon05].

In base a quanto detto si è optato per un piano composito centrale circoscritto.

## 3.2 Il simulatore

In questa sezione verrà descritto il simulatore implementato in ambiente Matlab. Infatti una volta studiato il comportamento della pesatrice multitesta, si è deciso di costruire un simulatore in grado di “emulare” tale funzionamento. Il termine emulare è stato posto tra virgolette dal momento che non essendo a conoscenza delle logiche utilizzate dall’unità di calcolo della macchina, poiché protette da privacy, si è provato a costruire un simulatore in grado di riprodurre il miglior comportamento della macchina. Quindi ci si aspetta di ottenere risultati statisticamente migliori rispetto a quelli che si otterrebbero mediante l’utilizzo di un qualsiasi software attualmente in commercio. Inoltre si è deciso di implementare nel simulatore la metodologia RSM, per individuare una configurazione migliore rispetto a quella fornita in partenza.

Dopo una breve introduzione relativa ai parametri iniziali, verrà descritto in maniera concisa il simulatore. Per quanto riguarda i parametri in ingresso al simulatore, senza i quali non potrebbe essere intrapresa nessuna campagna sperimentale, sono:

- Numero di cestelli;
- Configurazione di partenza = quantità media caricata su ogni cestello;
- $Nom$  = Valore Nominale della confezione (g);
- $c$  = Costo unitario materia prima (€cent/confezione);
- $a$  = Ricavo unitario (€cent/confezione);
- $r$  = Costo unitario di rilavorazione (€cent/confezione);
- $CMAT$  = eventuale costo da sostenere nel caso in cui i prodotti scartati non siano rilavorabili (€cent/confezione);

- $\lambda$  = coefficiente d'incremento/decremento (stabilito in precedenti campagne simulative);
- $\alpha$  = coefficiente di proporzionalità tra  $\mu_{W_i}$  e  $\sigma_{W_i}$  (determinato sperimentalmente).

É possibile riassumere il funzionamento del simulatore in 9 passi fondamentali, successivamente si passerà a verificare se tali passi sono stati implementati nel simulatore e quindi se vengono eseguiti in maniera corretta:

### 1. Definizione del passo di incremento/decremento

Per ogni elemento del vettore di medie in ingresso (Configurazione di partenza) viene calcolato il passo specifico in funzione del parametro lambda. Il vettore risultante viene assegnato al vettore passo:

$$\text{Passo} = [\text{Configurazione di partenza}] \cdot (\lambda)$$

### 2. Determinazione della matrice degli esperimenti

Il passo precedentemente calcolato dev'esser applicato al piano codificato, fornendo in output una matrice di incrementi/decrementi dei diversi fattori nella stessa unità di misura del vettore di medie in ingresso. Questa matrice dev'esser a sua volta applicata sul vettore delle media in ingresso, fornendo in output la matrice degli esperimenti effettiva contenente le condizioni sperimentali vere e proprie.

$$\text{Piano sperimentale} = [\text{Piano Codificato}] \cdot \text{Passo} + \text{Config. di partenza}$$

Con il termine piano codificato si indica il piano in cui le variabili naturali vengono trasformate in variabili codificate, ad esempio [-1; 1]. In Tabella 3.1 si riporta il piano codificato per  $k=3$ .



$$\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

**Tabella 3.1:** Piano codificato con  $k=3$

Il piano considerato è un  $2^k$  replicato una volta, è dunque importante aggiungere dei punti centrali e replicarli. Essi infatti permetteranno nel seguito di stimare l'errore sperimentale e di verificare l'adeguatezza del modello del primo ordine.

### 3. Generazione casuale del peso dei cestelli

Dato un vettore contenente la condizione sperimentale da analizzare, si genera un'estrazione casuale da una normale avente come media la condizione sperimentale considerata e come deviazione standard la medesima condizione sperimentale moltiplicata per il coefficiente di proporzionalità  $\alpha$  (come precedentemente ipotizzato).

$$\text{Cestello} = \text{randn} \cdot (\alpha \cdot \text{Condizione sperimentale}) + \text{Condizione sperimentale}.$$

Nello specifico la funzione *randn* genera casualmente una matrice di dimensione [1, numero di cestelli] da una normale standardizzata. Per ottenere un'istanza di una specifica distribuzione, è necessario moltiplicare tale matrice per l'espressione della deviazione standard desiderata e sommare poi tale risultato alla media desiderata. Nella fattispecie, l'istruzione considerata genera un vettore di dimensione e di valore coerenti con quelli della condizione sperimentale.

### 4. Scelta della combinazione di cestelli da scaricare.

Ad ogni riga della matrice Peso Cestelli viene applicata la matrice combi-

nazione, per poter scegliere in base ai diversi criteri qual è la combinazione di cestelli migliore. Le varie situazioni che possono verificarsi sono esplicitate nel prossimo paragrafo.

### 5. Modello del primo ordine

Determinato il vettore Scarica, quindi il vettore dei pesi associati a ciascuna confezione, è possibile calcolare il vettore caratterizzato dal valore del profitto unitario calcolato per ogni condizione sperimentale. Si ricorda ora come viene calcolato la funzione obiettivo:

$$E(P) = (a - c\mu_W)Pr(W \geq L) - rPr(W < L)$$

Tale vettore è la variabile di risposta del modello del primo ordine, ovvero si assume che il suo valore sia influenzato da cambiamenti nei livelli del fattore. Il modello del primo è stimato come  $y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon$ . In cui la matrice  $\mathbf{x}$  è rappresentata dal piano codificato.

### 6. Lack of fit

Il piano che si è costruito è un piano fattoriale completo  $2^k$  replicato una volta, a cui sono stati aggiunti i punti centrali per avere una stima della varianza con gradi di libertà pari a (numero punti centrali -1). Il test “*Lack of fit*” si occupa di determinare se nel modello di regressione stimato vi è la presenza di un effetto di curvatura significativo. Si definisce:

$H_0$ : Non esiste curvatura vs  $H_1$ : esiste curvatura;

$n_F$  = numero dei punti corner;

$n_C$  = numero dei punti centrali;

$\bar{y}_F$  = media delle risposte ottenute nei punti corner;

$\bar{y}_C$  = media delle risposte ottenute nei punti centrali;

Le statistiche usate sono:

$$SS_{curvatura} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C}$$

Questa somma dei quadrati è caratterizzata da un unico grado di libertà.

$$SS_E = \sum_{i=PuntiCentrali} (y_i - \bar{y}_C)^2$$

Per testare la presenza o meno di *Lack of fit*, si calcola la statistica test:

$$F_0 = \frac{SS_{curvatura}}{SS_E/(n_C - 1)}$$

È possibile rifiutare l'ipotesi nulla se  $F_0 > F_\alpha(1, n_C - 1)$ .

### 7. Steepest ascent

Nel caso in cui non fosse possibile rifiutare l'ipotesi nulla e quindi la situazione di partenza non è “vicina” alla zona di ottimo, è necessario individuare la direzione di rapida salita (si è interessati ad un punto di massimo). Si conducono esperimenti lungo il percorso di salita più rapida, finché non si osserva più alcun incremento nella risposta. A questo punto è possibile accostare nuovamente un modello del primo ordine, determinare un nuovo percorso di salita più rapida e continuare la procedura fino a portare lo sperimentatore in prossimità dell'ottimo. Un segnale di vicinanza dell'ottimo viene dalla mancanza di adattamento di un modello del primo ordine.

### 8. Modello del secondo ordine

Se l'esito del test “*Lack of fit*” manifesta la presenza di curvatura, il modello del primo ordine non è più una buona approssimazione della situazione in esame. Nella maggior parte dei casi, un modello del secondo ordine risulta adeguato:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

Il piano implementato nel simulatore per l'accostamento del modello del secondo ordine è il CCD circoscritto, si riporta in Tabella 3.2 un esempio nel caso  $k$  sia uguale a 3.

Una volta generato tale piano, si genera nuovamente un'estrazione casuale da una normale e si ripercorrono gli stessi passi eseguiti nel caso del modello lineare. L'obiettivo finale dell'utilizzo del modello quadratico è l'individuazione delle condizioni ottimali.

$$\begin{pmatrix}
 -0,5946 & -0,5946 & -0,5946 \\
 -0,5946 & -0,5946 & 0,5946 \\
 -0,5946 & 0,5946 & -0,5946 \\
 -0,5946 & 0,5946 & 0,5946 \\
 0,5946 & -0,5946 & -0,5946 \\
 0,5946 & -0,5946 & 0,5946 \\
 0,5946 & 0,5946 & -0,5946 \\
 0,5946 & 0,5946 & 0,5946 \\
 -1 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & -1 \\
 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix}$$

**Tabella 3.2:** CCD circoscritto con  $k=3$

### 9. Punto stazionario e scarica finale

A questo punto non rimane che calcolare il punto stazionario, per le formule si rimanda al paragrafo di introduzione della metodologia RSM. Definito il vettore contenente il punto stazionario, si determina la configurazione corrispondente a tale punto. Si genera poi un'estrazione casuale da una normale avente come media le coordinate della configurazione associata al punto stazionario e come deviazione standard le medesime coordinate moltiplicate per il coefficiente di proporzionalità  $\alpha$ .

Ad ogni riga della matrice è applicata la matrice di combinazione e in base alle regole di scelta della combinazione migliore, si determina la quantità da scaricare. Dato il vettore Scarica è possibile analizzare la sua distribuzione

e definire i parametri per il calcolo della funzione obiettivo relativa alla condizione “punto stazionario”.

### 3.2.1 Principi Costruttivi

In questo paragrafo si discuteranno le particolari scelte implementate nel simulatore.

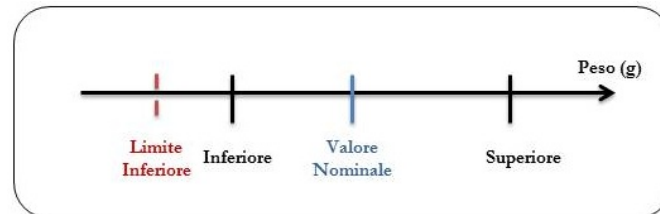
#### Enumerazione esaustiva

I metodi esistenti per la risoluzione del problema della configurazione di una pesatrice multitesta sono di tipo euristico. Essi infatti si propongono di come il giusto compromesso tra risoluzione istantanea e configurazione ottima. In ambito industriale a causa degli elevati ritmi produttivi risulta importante individuare una buona soluzione in tempi brevi. In questo lavoro di tesi si propone invece l'utilizzo di una procedura che dopo aver individuato tutte le possibili soluzioni sia in grado di selezionare la migliore in base a diversi criteri di confronto. Il costo del simulatore è nullo e non dovendo sostenere i costi industriali si è provato a sperimentare questa strada. Quindi data una configurazione di partenza della pesatrice multitesta, il simulatore è in grado di analizzare tutte le possibili combinazioni di apertura cestelli e selezionare la migliore. Si vuole verificare che in assenza di vincoli temporali mediante un'enumerazione di tutte le possibili combinazioni di cestelli è effettivamente possibile selezionare la combinazione migliore, quella il cui valore si discosta meno dal valore nominale. Si vuole quindi provare a ottenere una distribuzione più concentrata intorno al valore nominale che massimizzi il profitto unitario e la soddisfazione dei clienti.

#### Regole di scelta della combinazione

Una volta individuate tutte le possibili combinazioni, l'unità di calcolo della pesatrice multitesta dev'essere in grado di individuare la combinazione migliore, ovvero quella in grado di massimizzare il valore atteso del profitto. Nella fase di esplorazione si suddividono idealmente le combinazioni in due sottoinsiemi: quelle caratterizzate da un valore maggiore o uguale al valore nominale vengono separate da quelle aventi un valore minore. Nello specifico il simulatore seleziona tra

le combinazioni appartenenti al primo gruppo, quella a cui è associata il minimo valore (che prenderà il nome di Superiore), ovvero la combinazione il cui valore si avvicinerà maggiormente al valore nominale; analogamente nel secondo gruppo sarà selezionata la combinazione associata al valore massimo (definito Inferiore).



**Figura 3.4:** Esempio di Inferiore e Superiore

Detto questo, si deduce che la presenza del valore Superiore e/o Inferiore non è sempre garantita. Si presentano dunque 4 possibili situazioni, presentate in Tabella 3.3, che possono determinare scelte differenti.

	Inferiore	Superiore
1	Esiste	Esiste
2	0	Esiste
3	Esiste	0
4	0	0

**Tabella 3.3:** I quattro casi

### 1. Caso 1

Sia il valore Superiore che quello Inferiore sono presenti; per effettuare un'opportuna scelta è necessario analizzare il valore Inferiore. Infatti a seconda che esso sia maggiore o minore del limite inferiore può portare a scelte diverse. Si consideri la situazione in cui esso risulti maggiore o uguale al limite inferiore.

Dato  $\text{Inf} \geq \text{Limite inferiore}$ , si definisca:

$\gamma = |\text{Nom} - \text{Inf}|$  = differenza in valore assoluto tra il valore nominale e quello Inferiore;

$\beta = |\text{Nom} - \text{Sup}|$  = differenza in valore assoluto tra il valore nominale e quello Superiore.

- Se  $\gamma = \beta$ , si sceglierà la combinazione associata al valore Superiore. Infatti il simulatore è stato costruito considerando di interfacciarsi con un'azienda "onesta", ovvero con un'azienda che mette al primo posto la soddisfazione del cliente. In caso contrario, quindi se l'obiettivo primario fosse stato solo il mero guadagno, allora il simulatore avrebbe selezionato la combinazione associata al valore inferiore;
- Se  $\gamma \neq \beta$ , allora si selezionerà: 
$$\begin{cases} I, & \text{se } \min(\beta, \gamma) = \gamma; \\ S, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Dato  $\underline{\text{Inf}} < \underline{\text{Limite inferiore}}$ , si definisce:

$r$  = costo di rilavorazione;

$e$  = Sup - Nom = extraprodotto, ovvero la quantità di prodotto in eccesso rispetto al valore nominale.

Quindi si sceglierà: 
$$\begin{cases} S, & \text{se } r \geq e \cdot c; \\ I, & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

## 2. Caso 2

Non esiste un valore Inferiore, di conseguenza si sceglierà la combinazione associata al valore Superiore.

## 3. Caso 3

Esiste solamente il valore inferiore, di conseguenza la combinazione relativa è quella selezionata.

## 4. Caso 4

Non esiste né il valore Superiore né quello Inferiore, questa condizione si verifica solo nel momento in cui i cestelli di partenza risultassero vuoti. Si seleziona il valore Inferiore (che coincide con il valore Superiore) a cui corrisponde una confezione vuota.

## Output del simulatore

Le risposte in output del simulatore sono diverse. Le più rilevanti sono la quantità confezionata e il risultato della funzione obiettivo. In primo luogo si analizza la "quantità scaricata", ovvero la distribuzione dei possibili pesi delle confezioni prodotte da una pesatrice multitesta.

Il valore del profitto unitario è il secondo output interessante del simulatore. Esso infatti ci permette di stabilire qual è il vero guadagno proveniente dal processo produttivo. Verrà utilizzato come metodo di paragone per confrontare il funzionamento del simulatore in relazione al comportamento reale di una pesatrice. Altri output ad esso connesso sono la media delle quantità conformi, di quelle non conformi e la percentuale di scariche buone.

### 3.2.2 Verifica del funzionamento del simulatore

In questo paragrafo si vuole verificare il funzionamento del simulatore, ovvero si va a testare se il simulatore che si è costruito implementa in maniera corretta il modello concettuale: data una configurazione di partenza si eseguiranno i passaggi manualmente e si verificherà di volta in volta la coerenza del simulatore.

Si definisca:

- Numero di cestelli = 3;
- Nom = 200 g;
- Configurazione di partenza = [33,33 66,67 100], la cui somma è pari a 200;
- $c = 0,525$  (€cent/confezione);
- $a = 160$  (€cent/confezione);
- $r = 47,51 + \text{CMAT}$  (€cent/confezione);
- $\lambda = 0,2$ ;
- $\alpha = 0,331$ .

Per la validazione, verranno percorsi i seguenti passi:

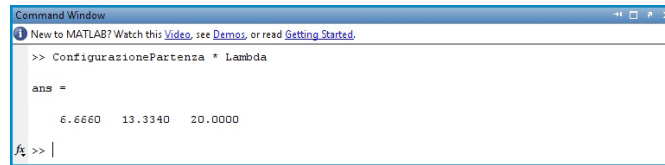
#### 1. Definizione del passo di incremento/decremento

Il passo di incremento/decremento è calcolato a partire dalla configurazione di partenza che viene moltiplicata per il parametro lambda.

$$\text{Passo} = [33,33 \ 66,67 \ 100] \cdot 0,2 = [6,666 \ 13,334 \ 20]$$

L'output di Matlab è:





```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.
>> ConfigurazionePartenza * Lambda

ans =

    6.6660    13.3340    20.0000

fx >> |

```

**Figura 3.5:** Calcolo del passo d'incremento

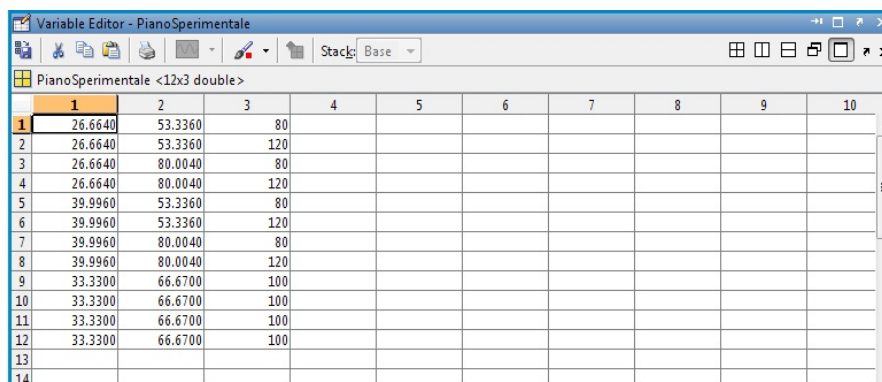
## 2. Determinazione della matrice degli esperimenti

Piano sperimentale = [Piano Codificato] · Passo + Config. di partenza =

$$\begin{pmatrix} 26,664 & 53,336 & 80 \\ 26,664 & 53,336 & 120 \\ 26,664 & 80,004 & 80 \\ 26,664 & 80,004 & 120 \\ 39,996 & 53,336 & 80 \\ 39,996 & 53,336 & 120 \\ 39,996 & 80,004 & 80 \\ 39,996 & 80,004 & 120 \end{pmatrix}$$

**Tabella 3.4:** Esempio di piano sperimentale

A questo piano sperimentale si aggiungono 4 punti centrali in corrispondenza della configurazione di partenza, ottenendo quindi 12 condizioni sperimentali. L'output Matlab è:



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	26.6640	53.3360	80							
2	26.6640	53.3360	120							
3	26.6640	80.0040	80							
4	26.6640	80.0040	120							
5	39.9960	53.3360	80							
6	39.9960	53.3360	120							
7	39.9960	80.0040	80							
8	39.9960	80.0040	120							
9	33.3300	66.6700	100							
10	33.3300	66.6700	100							
11	33.3300	66.6700	100							
12	33.3300	66.6700	100							
13										
14										

**Figura 3.6:** Il piano sperimentale

### 3. Generazione casuale del peso dei cestelli

Per ogni condizione sperimentale si sono generati i

$$dati \sim N(\mu_{CondSperim}; \sigma_{CondSperim}^2)$$

Essi seguono dunque approssimativamente una distribuzione normale con media pari alla condizione sperimentale considerata e la deviazione standard sia una multiplo di quest'ultima in base al coefficiente  $\alpha$ . Ogni condizione è stata replicata 5 volte, ottenendo una matrice di 40 valori definita Peso Cestelli. Per ogni cestello, in base alla condizione sperimentale, è stato possibile verificare la media, la deviazione standard, il coefficiente di proporzionalità e il p-value del test di normalità (in Tabella 3.5 sono riportati i dati relativi al primo cestello). Si va a verificare dunque se il simulatore genera i dati nel rispetto delle ipotesi precedentemente fatte.

Cestello	Media	Dev.st	$\alpha$	p-value
1	26,846	8,843	0,329	0,177
2	26,539	8,810	0,332	0,508
3	26,735	8,477	0,317	0,454
4	26,115	8,720	0,334	0,949
5	39,779	12,807	0,322	0,925
6	39,810	13,159	0,330	0,285
7	39,644	12,912	0,326	0,760
8	39,120	12,539	0,320	0,060
9	33,237	11,281	0,339	0,739
10	33,177	11,374	0,343	0,417
11	32,591	10,692	0,328	0,746
12	33,152	10,819	0,326	0,539

**Tabella 3.5:** Analisi del primo cestello

### 4. Scelta della combinazione di cestelli da scaricare.

Nel precedente paragrafo (3.2.1) sono state esaminate tutte le possibili situazioni che si possono verificare; si riportano di seguito 3 esempi esplicativi. Data una configurazione si verifica se la logica di scelta è stata quindi implementata in maniera corretta nel simulatore:

- **Primo esempio**

Si applica la matrice di combinazione alla configurazione:

[24, 3796 48, 5266 80, 2469]· Matrice di combinazione

Cestello1	Cestello2	Cestello3	Peso Combinazione
0	0	0	0
0	0	80,2469	80,2469
0	48,5266	0	48,5266
0	48,5266	80,2469	128,7735
24,3796	0	0	24,3796
24,3796	0	80,2469	104,6265
24,3796	48,5266	0	72,9062
24,3796	48,5266	80,2469	153,153

**Tabella 3.6:** Primo esempio di scelta

Non essendo presente un valore Superiore, viene scaricata la combinazione di cestelli associata al valore Inferiore (in verde) che corrisponde all'apertura di tutti e tre i cestelli. Il simulatore conferma la scelta.

- **Secondo esempio**

[22, 88447 54, 42521 135, 9394]· Matrice di combinazione.

La matrice risultante è analoga al caso precedente, si riporta quindi di seguito solo la tabella relativa al peso derivante dalle varie combinazioni.

Peso Combinazione
0
135,9394
54,42521
190,3647
22,88447
158,8239
77,3096
213,2491

**Tabella 3.7:** Secondo esempio di scelta

Con il colore blu si è evidenziato il valore Superiore mentre in verde quello Inferiore. Quest'ultimo risulta minore del Limite inferiore, di conseguenza per scegliere la combinazione di cestelli da scaricare è necessario calcolare il costo di rilavorazione associato alla produzione di una confezione non conforme e il costo relativo all'extra-prodotto, quindi della produzione di una confezione superiore al valore nominale.

$$r = 47,51 + 190,3647 * 0,525 = 147,4509$$

$$e \cdot c = (213,2491 - 200) * 0,525 = 6,95$$

Si ha  $e \cdot c < r$  quindi si scaricherà la combinazione di cestelli associata al valore Superiore, il simulatore conferma la scelta.

- **Terzo esempio**

[56,04921 73,42703 126,0674]. Matrice di Combinazione

Analogamente a quanto detto per l'esempio precedente si riporta esclusivamente la Tabella relativa ai pesi generati dalle varie combinazioni (Tabella 3.8).

Peso Combinazione
0
126,0674
73,42703
199,4944
56,04921
182,1166
129,4762
255,5436

**Tabella 3.8:** Terzo esempio di scelta

Anche in questo esempio sono presenti sia il valore Superiore (in blu) e il valore Inferiore (in verde), quest'ultimo però risulta maggiore del limite inferiore. Quindi i ragionamenti precedentemente fatti per l'esempio 2 non sono più applicabili, questa volta le soluzioni devono essere confrontate in base alla loro distanza dal valore nominale. Si definisca:

$$\gamma = |Nominale - Inferiore| = 0,505598;$$

$$\beta = |\text{Nominale} - \text{Superiore}| = 55,5436.$$

Il minimo tra  $\gamma$  e  $\beta$  corrisponde a  $\gamma$  quindi sarà scaricata la combinazione di cestelli relativa al valore Inferiore; il software conferma la scelta.

### 5. Modello del primo ordine

Ottenuto il vettore di scariche, si è in grado di calcolare la funzione obiettivo per ogni condizione sperimentale. In Tabella 3.9 sono riportati tali esiti.

Profitto atteso unitario
-96,9007
-35,9198
-45,5493
-33,8070
-54,0285
-40,4608
-45,4631
-39,9291
-45,372
-45,1561
-45,3087
-45,2313

**Tabella 3.9:** Esempio di variabile di risposta

La variabile di risposta del modello del primo ordine è il profitto atteso unitario associato ad ogni condizione sperimentale. Il piano sperimentale codificato codifica appunto le variabile indipendenti in ogni condizione sperimentale. Per risolvere manualmente i calcoli si è utilizzato il software Minitab, di cui riportiamo l'output:

Regression Analysis: Risposta versus x1; x2; x3

The regression equation is

$$\text{Risposta} = -48,1 + 4,54 x_1 + 7,32 x_2 + 12,0 x_3$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-48,096	3,527	-13,64	0,000
x1	4,537	4,320	1,05	0,324
x2	7,320	4,320	1,69	0,129
x3	11,978	4,320	2,77	0,024

S = 12,2185    R-Sq = 59,3%    R-Sq(adj) = 44,1%

PRESS = 3999,87    R-Sq(pred) = 0,00%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	1741,1	580,4	3,89	0,055
Residual Error	8	1194,3	149,3		
Lack of Fit	5	1194,3	238,9	28441,57	0,000
Pure Error	3	0,0	0,0		
Total	11	2935,5			

La tavola ANOVA coincide con quella individuata dal simulatore. In Figura 3.7 si riportano i coefficienti della regressione.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-48.0955									
2	4.5369									
3	7.3202									
4	11.9781									
5										
6										
7										

Figura 3.7: Esempio coefficienti regressione lineare semplice

## 6. Lack of fit

I parametri utilizzati in questa simulazione sono:

$$n_F = 8;$$

$$n_C = 4;$$

$$\bar{y}_F = -49,5073;$$

$$\bar{y}_C = -45,272;$$

Si riportano le statistiche utilizzate per il calcolo del test, con i relativi risultati numerici.

$$SS_{curvatura} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} = \frac{8 * 4 * (-49,5073 + 45,272)^2}{12} = 47,83404$$

$$SS_E = 0,025195$$

L'esito della statistica test è pari a  $F_0 = \frac{47,83404}{0,025195/(4-1)} = 5695,62$ .

Il p-value =  $(1 - |\phi(F_0)|) = (1 - 0,99999) = 0,0000$  quindi è possibile rifiutare l'ipotesi nulla, la curvatura è significativa, si è in prossimità di una zona di ottimo.

### 7. Steepest ascent

In questo esempio, avendo rifiutato l'ipotesi nulla del test “*Lack of fit*”, non è necessario calcolare la direzione di salita massima essendo già in prossimità di una zona di ottimo locale.

### 8. Il modello del secondo ordine

Essendo in un punto di ottimo, la configurazione di partenza è rimasta invariata. A partire da questa si è generato un piano per l'accostamento del modello del secondo ordine. Il piano utilizzato è un CCD circoscritto. Sono stati ripetuti gli stessi passi come nel caso lineare.

La variabile di risposta è il vettore caratterizzato dai valori della funzione obiettivo per ogni condizione sperimentale. Attraverso l'uso del software Minitab si è costruito il modello del secondo ordine.

Regression Analysis: RispostaModelloQ versus x1Q; x2Q; ...

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{RispostaModelloQ} = & - 46,1 + 1,57 \text{ x1Q} + 4,44 \text{ x2Q} + 6,90 \text{ x3Q} \\ & + 1,46 \text{ x1x1Q} + 0,24 \text{ x2x2Q} + 0,41 \text{ x3x3Q} \\ & - 6,79 \text{ x1x2Q} - 9,05 \text{ x1x3Q} - 9,26 \text{ x2x3Q} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-46,127	1,241	-37,17	0,000
x1Q	1,572	1,598	0,98	0,345
x2Q	4,438	1,598	2,78	0,017
x3Q	6,897	1,598	4,31	0,001
x1x1Q	1,458	2,524	0,58	0,574
x2x2Q	0,243	2,524	0,10	0,925
x3x3Q	0,407	2,524	0,16	0,875
x1x2Q	-6,793	3,512	-1,93	0,077
x1x3Q	-9,055	3,512	-2,58	0,024
x2x3Q	-9,264	3,512	-2,64	0,022

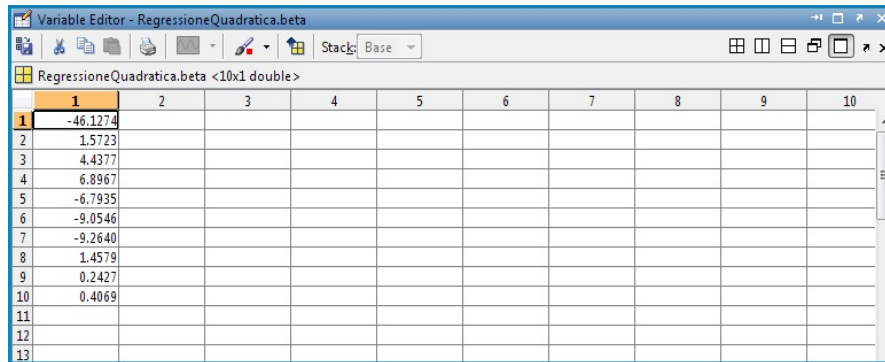
S = 3,51226    R-Sq = 78,9%    R-Sq(adj) = 63,2%

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	9	555,08	61,68	5,00	0,006
Residual Error	12	148,03	12,34		
Lack of Fit	5	147,65	29,53	545,81	0,000
Pure Error	7	0,38	0,05		
Total	21	703,11			

La tavola ANOVA ottenuta in output dal software Minitab è uguale a quella ottenuta in output dal simulatore. In Figura 3.8 si riposrtano i coefficienti di regressione calcolati dal simulatore.





	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-46.1274									
2	1.5723									
3	4.4377									
4	6.8967									
5	-6.7935									
6	-9.0546									
7	-9.2640									
8	1.4579									
9	0.2427									
10	0.4069									
11										
12										
13										

Figura 3.8: Esempio coefficienti regressione lineare multipla

Il comando `regstats('quadratic')`, già esistente nell'ambiente Matlab, consente di effettuare una regressione multipla considerando il risultato della funzione obiettivo come variabile di risposta e CCD come variabili di predizione. Il parametro `quadratic` indica che il comando `regstats` deve fittare un modello lineare quadratico con termine costante. Il vettore dei coefficienti di regressione derivanti dal modello del secondo ordine viene riordinato in modo tale che sia utilizzabile per l'identificazione dei punti stazionari. L'ordine standard di tali coefficienti sarebbe: termini lineari, termini quadratici e termini misti. Matlab in output (Figura 3.8) fornisce un ordine differente: termini lineari, termini misti e termini quadratici.

### 9. Punto stazionario e scarica finale

Si riporta la formula per il calcolo del punto stazionario  $\hat{\mathbf{x}}^S$ :

$$\hat{\mathbf{x}}^S = -\frac{1}{2}\hat{\mathbf{B}}^{-1}\hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (3.7)$$

Dove:

$\hat{\mathbf{B}}$  = stima ai minimi quadrati dei coefficienti del secondo ordine del modello quadratico;

$\hat{\boldsymbol{\beta}}$  = stima ai minimi quadrati dei coefficienti lineari del modello quadratico.

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{pmatrix} 1,4579 & -3,3967 & -4,5273 \\ -3,3967 & 0,2427 & -4,6320 \\ -4,5273 & -4,6320 & 0,4060 \end{pmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \begin{pmatrix} -46,1274 \\ 1,5723 \\ 4,4377 \end{pmatrix}$$

Applicando l'equazione (3.7) è facile individuare:

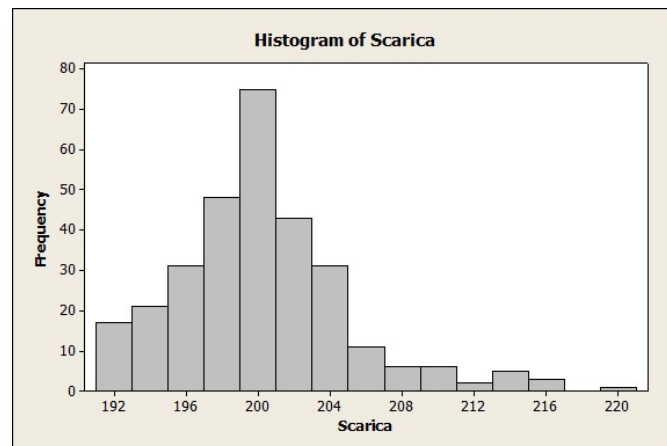
$$\hat{\mathbf{x}}^S = \begin{pmatrix} 0,4957 \\ 0,2713 \\ 0,1297 \end{pmatrix}$$

**Tabella 3.10:** Calcolo del punto stazionario

Calcolato il punto stazionario è possibile quindi definire la configurazione ottima:

$$\text{Configurazione} = \hat{\mathbf{x}}^S \cdot \text{Passo} + \text{Config. di partenza} = \begin{pmatrix} 36,6346 \\ 70,2879 \\ 102,5942 \end{pmatrix}$$

A questo punto per verificare il comportamento in questo punto di ottimo si generano i dati da un'estrazione casuale da una normale di media pari alla configurazione in questione e deviazione standard pari a  $\alpha$  per la configurazione. Si analizzano tali valori come effettuato in precedenza, si riporta in Figura 3.9 un esempio di scarica ottenuta in tale punto.



**Figura 3.9:** Esempio di scarica

Si può osservare che la distribuzione è unimodale e centrata in 200: valore nominale della confezione. Inoltre non sono presenti confezioni “non conformi” quindi con valore inferiore al limite inferiore.

### Verifica del funzionamento del simulatore con 2 cestelli

Il secondo capitolo di era concluso con l’analisi della funzione obiettivo considerando una pesatrice caratterizzata da sole due teste. Sapendo quindi che la zona di ottimo è inscrivibile all’interno di un quadrato i cui lati vanno da 160 g a 230 g, si vuole verificare se partendo da vari punti del piano il simulatore è in grado di condurre lo sperimentatore nella regione d’interesse.

Si riportano ora le configurazioni di partenza analizzate con il corrispondente valore della funzione obiettivo. Si mostra poi il miglioramento suggerito dal software. Dall’osservazione dei risultati proposti in Tabella 3.11 si evince che il comportamento del simulatore è adeguato alle richieste, tutte le configurazioni ottime cadono all’interno della regione d’interesse. Si osserva inoltre un miglioramento netto del profitto unitario rispetto alle diverse configurazioni di partenza.

A questo punto è possibile concludere che il simulatore funziona in maniera corretta.

Configurazione partenza		Configurazione ottima			
Cestello1 (g)	Cestello2 (g)	FO (€cent/confezione)	Cestello1 (g)	Cestello2 (g)	FO (€cent/confezione)
100	100	-32,646	195,75	202,63	28,684
100	150	7,093	213,79	185,37	27,605
150	150	16,350	174,43	220,38	25,765
200	150	23,7601	215,59	196,99	28,882
50	200	2,7066	167,65	202,38	29,072
50	150	-27,9789	179,00	223,73	24,835

**Tabella 3.11:** Verifica funzionamento simulatore con due cestelli

# Capitolo 4

## Il caso aziendale

All'interno del macrosistema del confezionamento, in una posizione intermedia tra i produttori di macchinari e i consumatori di prodotti confezionati, si posizionano le aziende produttrici di beni di consumo, che sfruttano le tecnologie del confezionamento per preparare i propri prodotti prima della vendita ai clienti. Una di queste è il pastificio, per motivi di privacy non è possibile nominarlo, che ha messo a disposizione le proprie pesatrici multitestata al fine di studiarne il funzionamento. In questo capitolo verrà presentata l'azienda in questione, in seguito si analizzeranno i loro dati e successivamente si “validerà” l'algoritmo implementato nel simulatore. In ultimo si individuerà una configurazione statisticamente migliore rispetto a quella attualmente implementata in azienda.

### 4.1 Il Pastificio

Il Pastificio è un'azienda produttrice di pasta fresca, sia liscia che ripiena, con sede in provincia di Varese. I suoi punti di forza sono la qualità e la genuinità dei suoi prodotti, ottenute attraverso la scelta accurata delle materie prime. L'azienda nasce negli anni '80, quando il fondatore decide di produrre e vendere i tortellini fatti dalla moglie, emiliana D.O.C e grande specialista della pasta fatta in casa. Da allora l'azienda è cresciuta e dopo ventisette anni di attività, si posiziona al terzo posto in Italia tra i produttori di pasta fresca, dopo Rana e Buitoni. Il pastificio, che ha circa 100 dipendenti e genera 20 milioni di euro di fatturato, esporta in Europa il 55% della propria produzione e i suoi prodotti sono presenti nelle

maggiori catene della grande distribuzione organizzata. La crisi ha solo sfiorato l'azienda: tra il 2008 e il 2009 vi è stata una crescita del fatturato di circa 20,3 punti percentuali e non è stato necessario ricorrere a ore di cassa integrazione. Il segreto di questa solidità non è legato solo all'anticiclicità del settore alimentare ma anche al fatto che l'azienda punta sull'innovazione di prodotto e sulla ricerca e sviluppo.

#### 4.1.1 Il processo di confezionamento

Lo stabilimento è diviso in due reparti: la parte di produzione e quella di confezionamento. Nel primo reparto a seconda degli ordini derivanti dal piano di produzione stilato settimanalmente, si producono i diversi tipi di pasta, che attraverso un nastro trasportatore vengono trasferiti nella sezione di confezionamento. Nello specifico il nastro trasportatore conduce il prodotto al relativo canale di alimentazione della pesatrice multitesta, da qui viene fatto cadere sul disco dispersore per poi proseguire il cammino verso i canali radiali. Una volta giunto nei cestelli dosatori, si attende l'elaborazione della soluzione da parte dell'unità di calcolo. Determinata la combinazione di cestelli da aprire, la quantità di prodotto viene scaricata per esser confezionata.

In particolare i prodotti oggetto d'analisi sono i fusilli in confezioni da 250 g e i ravioli ripieni di verdure in confezioni da 200g. In entrambi i casi per la fase di pesatura si è utilizzata una pesatrice caratterizzata da 10 teste di pesata, in Tabella 4.3 sono evidenziate le principali caratteristiche.

Pesatrice	Azienda	n° Teste	Velocità (wpm)	Precisione (g)
MXCP10	Imbal Stock	10	70 wpm	0,3 - 1 g
CCW-R-210W	Ishida	10	75 wpm	0,5 - 1 g

**Tabella 4.1:** Dati relativi alle Pesatrici Multitesta utilizzate in azienda

Come si evince dalla Figura 4.1 , dov'è presentato lo schema riassuntivo del processo in esame, il passo successivo è il confezionamento della quantità scaricata. In particolare per i fusilli viene utilizzata una confezionatrice verticale; mentre i ravioli vengono impacchettati con una confezionatrice orizzontale. Successivamente il sacchetto viene trasferito al controllo con il *metal detector*, che in caso di presenza

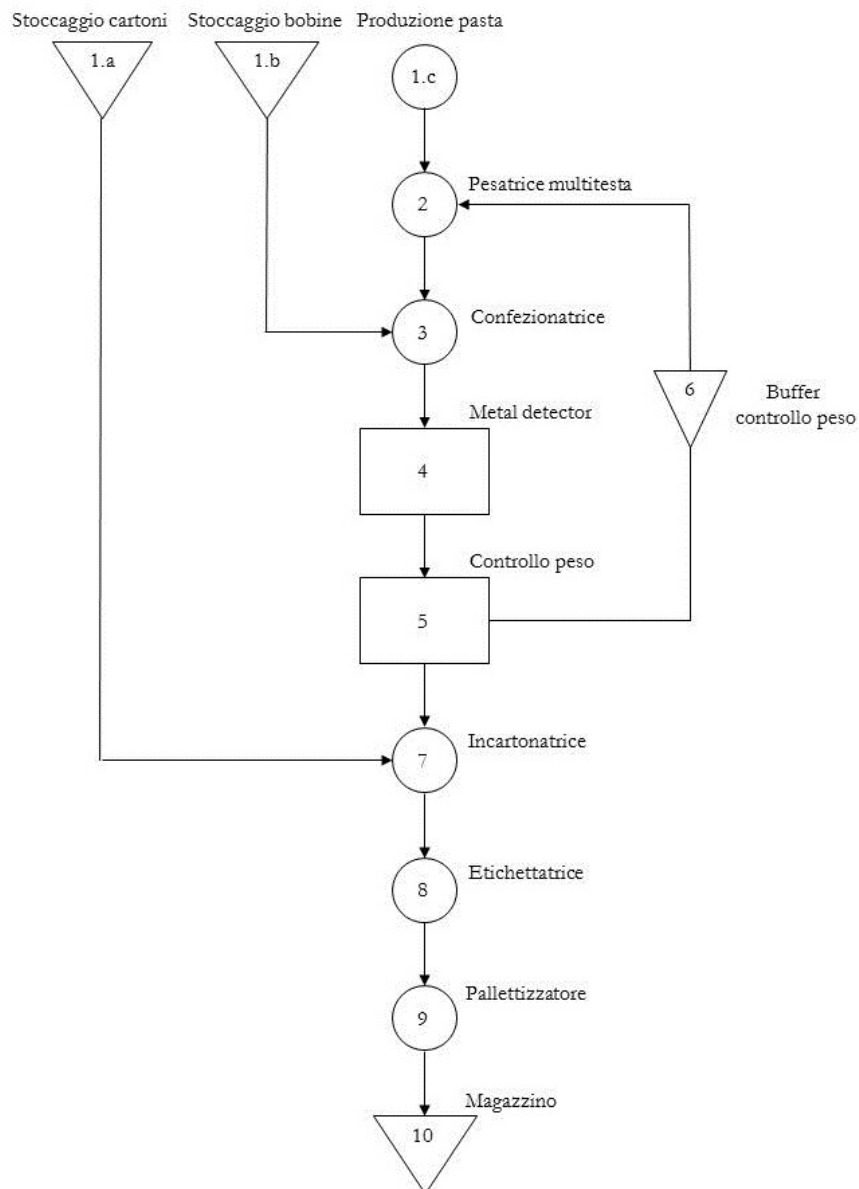


Figura 4.1: Processo di confezionamento per l'azienda in esame

di materiali ferrosi all'interno della confezione, attiva un deviatore ad aria compressa che espelle il pacco dal nastro. Superato questo controllo, viene misurato il peso della confezione attraverso l'uso di una bilancia di precisione. Qui l'operatore ad ogni cambio formato provvede ad impostare i valori di tolleranza che il pacco dovrà rispettare per essere considerato vendibile. Quindi raggiunto il controllo peso, il pacco viene pesato e nel caso in cui non rientri nei valori di tolleranza preimpostati, viene espulso cadendo in un *buffer* che l'operaio di volta in volta provvede a svuotare reimmettendo la pasta scartata all'interno dei setacci vibranti subito a monte della pesatrice, per permetterne la rielaborazione. Nel caso delle confezioni di fusilli tale operazione può essere svolta a fine giornata o addirittura a fine settimana; i ravioli invece devono essere reinseriti all'interno della tramoggia di alimentazione nel più breve tempo possibile per motivi legati alla scadenza di tali prodotti.

Usciti dal controllo peso, i pacchi giungono alla incartonatrice. Qui vengono suddivisi in gruppi da 10 o 15 pacchi a seconda che la confezione sia da 250g o da 200g, successivamente sono inviati ai manipolatori verticali che provvedono all'inserimento dall'alto delle confezioni nei cartoni precedentemente prelevati tramite un meccanismo apri-cartone dotato di ventose, che provvede a disporre il cartone al di sotto dei manipolatori stessi. Una volta completato viene sigillato con colla a caldo, e inviato all'etichettatrice. Da qui poi tramite un convogliatore verticale viene portato su un convogliatore a rulli che lo invia al pallettizzatore.

## 4.2 Funzione obiettivo

In questo paragrafo si esamina la funzione obiettivo in riferimento al pastificio preso in considerazione, per maggiori dettagli relativi alle formule che si utilizzeranno si rimanda al Capitolo 2.3 della presente tesi.

Ogni formato di pasta ha un costo di produzione, uno di rilavorazione e un prezzo di vendita diverso dagli altri prodotti, per questo motivo in questo paragrafo si andranno ad esplicitare tali valori per i formati in esame, in modo da personalizzare la funzione obiettivo per lo specifico prodotto. Per quanto riguarda il costo di rilavorazione  $r$ , le voci di costo utilizzate per calcolarlo, derivanti dall'esperienza svolta in azienda, sono le seguenti:



- AMM = ammortamento annuo del macchinario  $\cong 350.000 \text{ €/anno}$ ;
- CE = costo dell'energia  $\cong 2352 \text{ €/anno}$ ;
- HDF = ore di funzionamento annue della pesatrice  $\cong 4800 \text{ €/anno}$ ;
- CDL = costo del lavoro  $\cong 12 \text{ €/anno}$ ;
- TI = tempo reintroduzione materiale nella tramoggia  $\cong \begin{cases} 10 \text{ s,} & \text{per i fusilli;} \\ 60 \text{ s,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$
- TR = tempo rilavorazione "non conforme"  $\cong \begin{cases} 0,9 \text{ s,} & \text{per i fusilli;} \\ 13 \text{ s,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$
- Ccel = costo del cellophane al kg  $\cong 2 \text{ €/kg}$ ;
- Cconf = quantità di cellophane a confezione  $\cong \begin{cases} 3 \text{ g,} & \text{per i fusilli;} \\ 5 \text{ g,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$

Si è considerato che le pesatrici venissero usate normalmente su 2 turni lavorativi da otto ore e l'anno lavorativo fosse di 300 giorni. Per quanto riguarda invece l'energia, si è supposto un costo medio di  $14 \text{ €cent/kWh}$ , essendo questa ricevuta dall'azienda in alta tensione e trasformata con l'ausilio di cabine di trasformazione. Tenendo presente che le pesatrici assorbono mediamente circa  $3,5 \text{ kWh}$  il calcolo sommario del costo annuale dell'energia CE diventa semplice. Sviluppando i calcoli dalle formule proposte nel secondo capitolo (Paragrafo 2.3.?), si ha:

$$CO = \left(\frac{CDL}{3600}\right) \cdot TI \cdot 100 \cong \begin{cases} 3,2 \text{ €cent,} & \text{per i fusilli;} \\ 20 \text{ €cent,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$$

$$CM = \left(\frac{AMM+CE}{3600 \cdot HDF}\right) \cdot TR \cdot 100 \cong \begin{cases} 1,84 \text{ €cent,} & \text{per i fusilli;} \\ 26,5 \text{ €cent,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$$

$$CC = \left(\frac{C_{cel}}{100}\right) \cdot C_{conf} \cdot 100 \cong \begin{cases} 0,6 \text{ €cent,} & \text{per i fusilli;} \\ 1 \text{ €cent,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$$

Da cui si ricava che il costo di rilavorazione è:

$$r = CM + CC + CO + CMAT \cong \begin{cases} 5,64 \text{ €cent,} & \text{per i fusilli;} \\ 47,51+CMAT \text{ €cent,} & \text{per i ravioli.} \end{cases}$$

In Tabella 4.2 vengono riportati i valori dei costi e dei ricavi per entrambi i tipi di prodotto.

	Fusilli	Ravioli
$a =$ Ricavo unitario (€cent/confezione)	45	160
$c =$ Costo unitario materia prima (€cent/g)	0,03	0,525
$c\mu_W =$ Costo materia prima (€cent/confezione)	7,5	105
$r =$ Costo di rilavorazione (€cent/confezione)	5,64	47,51 + CMAT

**Tabella 4.2:** Valori dei ricavi e dei costi dei prodotti in esame

## 4.3 Analisi dati

I dati, prelevati presso lo stabilimento situato in provincia di Varese, sono relativi al confezionamento di due tipi di prodotto: i fusilli in confezioni da 250 g e ravioli di verdura in confezioni da 200 g. Tali dati verranno ora analizzati per verificare che le quantità caricate nei singoli cestelli si distribuiscano secondo la legge di probabilità normale, successivamente si esaminerà la distribuzione della quantità scaricata e in ultimo si verificherà il rapporto esistente tra la media e la deviazione standard di ogni cestello.

### 4.3.1 Test statistici

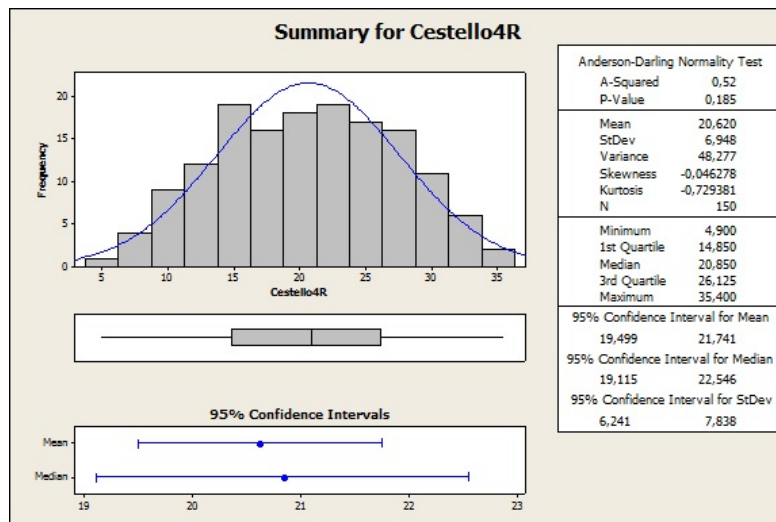
In Appendice C sono riportati i risultati dei test effettuati sui dati raccolti, relativi alle quantità presenti nei vari cestelli. In particolare sono presentati i test di normalità, mentre successivamente i test di correlazione temporale delle quantità presenti nei singoli cestelli.

#### Ravioli

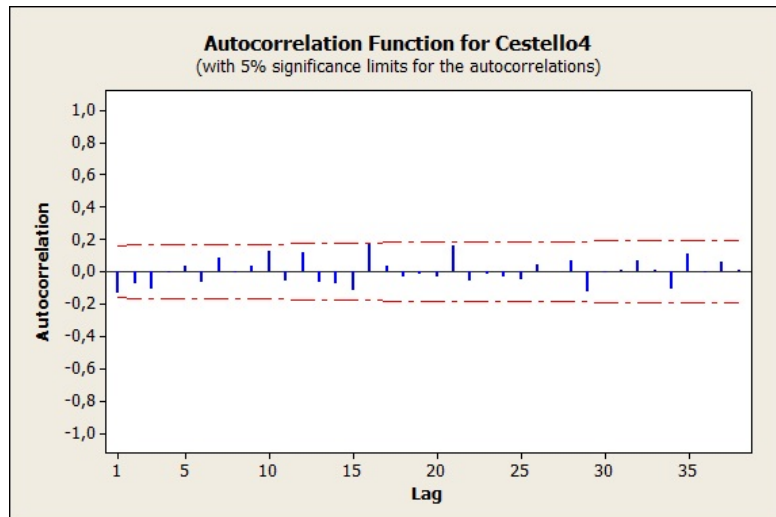
Si consideri ora la sola produzione di ravioli, in Figura 4.2 è possibile osservare, a titolo di esempio, i grafici relativi al quarto cestello della pesatrice.

Nello specifico in Figura 4.2(a) è presentato l'istogramma della quantità di prodotto caricata all'interno del quarto cestello. I risultati rilevano che le quantità contenute nei singoli cestelli possono essere modellizzate come realizzazioni

di variabili aleatorie normali (si veda anche la Tabella 4.3 dove sono riportati i p-value del test, dalla Figura 4.3 si osserva che essi sono sempre superiori all' $\alpha$  nominale). In Figura 4.2(b), invece, è riportato il grafico della funzione di auto-correlazione, si rileva che le osservazioni possono essere considerate incorrelate e quindi indipendenti.



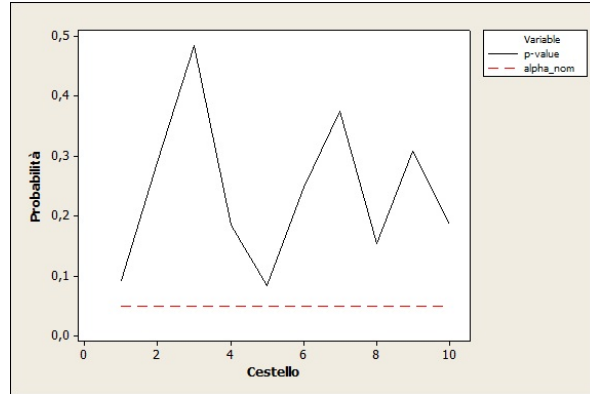
(a) Test di normalità



(b) Test di correlazione temporale

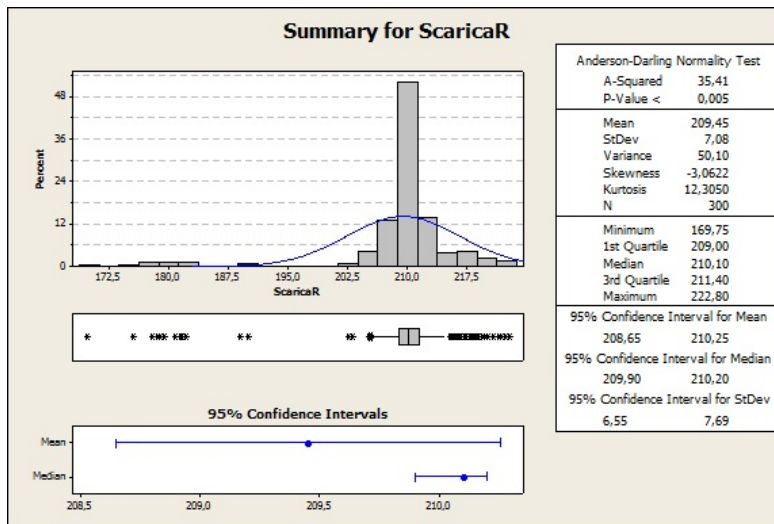
**Figura 4.2:** Test relativi al quarto cestello della produzione di ravioli

Cestello	p-value
1	0,092
2	0,289
3	0,484
4	0,185
5	0,084
6	0,248
7	0,375
8	0,154
9	0,308
10	0,187



**Tabella 4.3:** Esito test di normalità **Figura 4.3:** P-value versus Alpha Nominale, nel caso di produzione di ravioli.

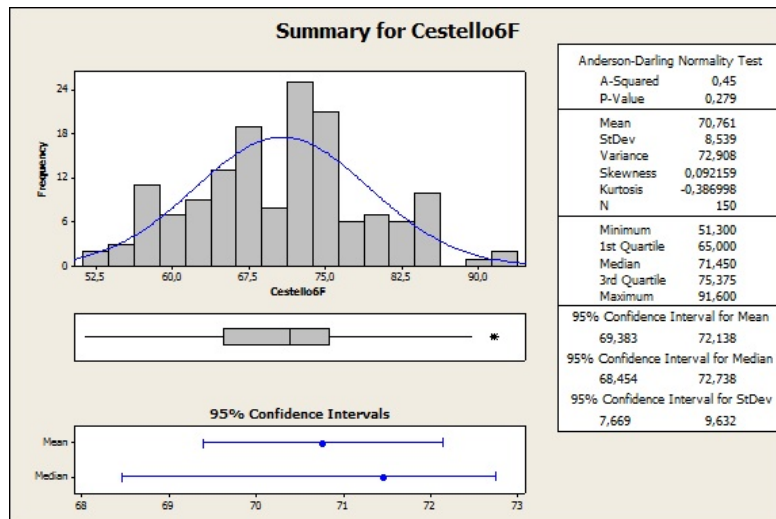
Considerando invece i dati relativi alla quantità scaricata, osservando il grafico riportato in Figura 4.4(b) si può dedurre che tale variabile non segue una distribuzione normale. Tale considerazione è confermata anche dal p-value molto inferiore al 5%.



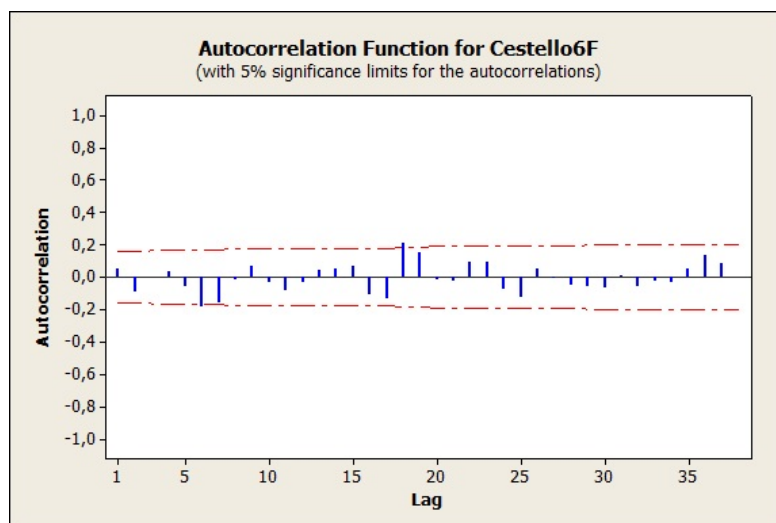
**Figura 4.4:** Istogramma della quantità scaricata per i ravioli

## Fusilli

Analogamente a quanto mostrato per i ravioli, si esamina ora la produzione di fusilli. In Figura 4.5 si riportano i grafici relativi al sesto cestello della pesatrice.



(a) Test di normalità



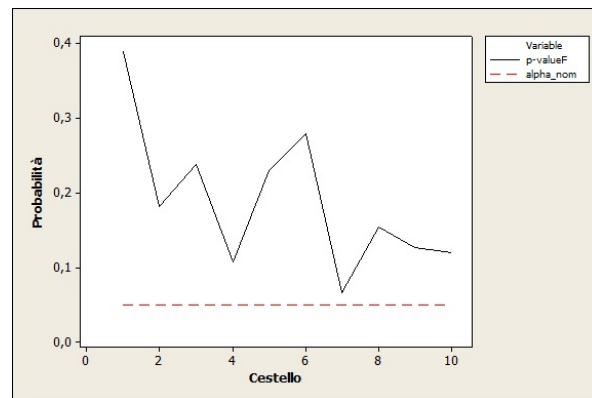
(b) Test di correlazione temporale

**Figura 4.5:** Test relativi al sesto cestello della produzione di fusilli

I risultati ottenuti mostrano che le quantità contenute nei singoli cestelli seguono approssimativamente una distribuzione normale. In Tabella 4.4 si riportano l'esito

dei test di normalità di Anderson - Darling delle quantità caricate nei vari cestelli, mentre in Figura 4.6 li si confronta con l'alpha nominale. Inoltre anche in questo caso si è verificata l'assenza di autocorrelazione temporale delle quantità caricate sui singoli cestelli.

Cestello	p-value
1	0,389
2	0,182
3	0,237
4	0,107
5	0,229
6	0,279
7	0,066
8	0,154
9	0,127
10	0,119



**Tabella 4.4:** Esito test normalità nel caso di produzione di fusilli.

**Figura 4.6:** P-value versus Alpha Nominale, nel caso di produzione fusilli.

In maniera analoga al caso precedente, si considerino i dati relativi alla quantità scaricata. Dal grafico riportato in Figura 4.7(b) si può facilmente dedurre che tale variabile non segue una distribuzione normale. Tale considerazione è confermata anche dal p-value di molto inferiore al 5%.

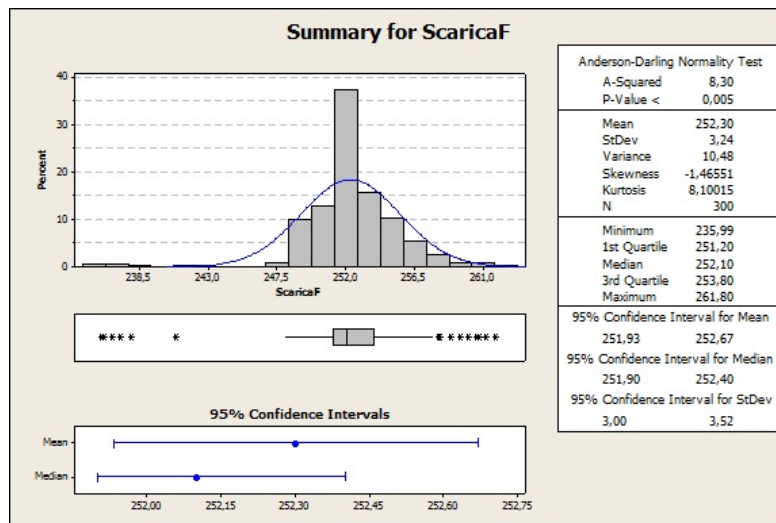


Figura 4.7: Grafici relativi alla quantità scaricata per i fusilli

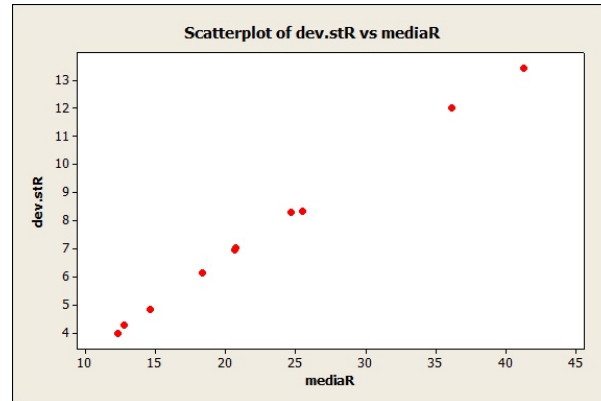
### 4.3.2 Dipendenza lineare tra la media $\mu_{w_i}$ e la deviazione standard $\sigma_{w_i}$

In questo paragrafo si verifica l'ipotesi di dipendenza lineare fra la media  $\mu_{w_i}$  associata a ciascun cestello della pesatrice e la corrispondente deviazione standard  $\sigma_{w_i}$ . In particolare per verificare l'esistenza del parametro  $\alpha$  ( $\sigma_{w_i} = \alpha\mu_{w_i}$ ) per ciascun prodotto in esame è necessario utilizzare un modello di regressione lineare semplice privo di intercetta.

#### Ravioli

In Tabella 4.5 sono stati riportati i valori relativi alla media, alla deviazione standard e la numerosità del campione per ogni cestello della pesatrice utilizzata nel processo produttivo dei ravioli.

Cestello	$\mu_{w_i}$ (g)	$\sigma_{w_i}$ (g)
1	12,77	4,25
2	18,34	6,11
3	12,34	3,98
4	20,62	6,94
5	24,64	8,29
6	41,27	13,41
7	36,10	11,99
8	25,46	8,31
9	20,74	7,01
10	14,62	4,84



**Tabella 4.5:** Indici statistici, nel caso di produzione ravioli.

**Figura 4.8:** Scatterplot dev.st vs media, nel caso di produzione ravioli.

Per testare l'ipotesi di dipendenza lineare della deviazione standard dalla media si è utilizzato il software Minitab. Si riporta di seguito l'output del modello regressivo in esame.

Regression Analysis: dev.stR versus mediaR

The regression equation is dev.stR = 0,331 mediaR

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Noconstant				
mediaR	0,330591	0,001641	201,43	0,000

S = 0,126959

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	653,98	653,98	40573,52	0,000
Residual Error	9	0,15	0,02		
Total	10	654,13			



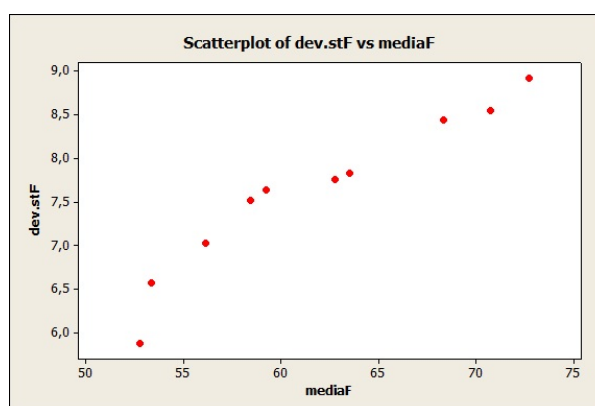
Dalle analisi dei residui, riportate in Appendice, si deduce che il modello lineare in esame è valido. Inoltre dall'osservazione del p-value (0,0000) non è possibile rifiutare l'ipotesi testata e il modello risultante nel caso di produzione di ravioli è:

$$\sigma_{w_i} = 0,331 \cdot \mu_{w_i}$$

### Fusilli

Come nel caso di produzione di ravioli, anche per i fusilli si testa l'ipotesi di dipendenza lineare fra la media  $\mu_{w_i}$  e la deviazione standard  $\sigma_{w_i}$ . Tali valori e la numerosità del campione sono riportati in Tabella 4.6 per ogni cestello analizzato.

Cestello	$\mu_{w_i}$ (g)	$\sigma_{w_i}$ (g)
1	62,75	7,74
2	63,54	7,83
3	58,45	7,51
4	68,35	8,43
5	59,24	7,63
6	70,76	8,53
7	53,36	6,57
8	56,13	7,02
9	52,76	5,88
10	72,71	8,91



**Tabella 4.6:** Indici statistici, nel caso di produzione fusilli.

**Figura 4.9:** Scatterplot dev.st vs media, nel caso di produzione fusilli.

Anche in questo caso attraverso l'uso di un modello di regressione lineare privo di intercetta si verificherà l'esistenza del coefficiente  $\alpha$ , che lega media e deviazione standard di ciascun cestello della pesatrice.

Regression Analysis: dev.stF versus mediaF

The regression equation is dev.stF = 0,123 mediaF

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
-----------	------	---------	---	---

Noconstant

mediaF            0,123143    0,001360    90,56    0,000

S = 0,267333

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	586,15	586,15	8201,71	0,000
Residual Error	9	0,64	0,07		
Total	10	586,79			

Non è possibile rifiutare le ipotesi di validità del modello lineare, le verifiche sui residui sono riportate in Appendice. Dall'osservazione del p-value non è possibile rifiutare quindi l'ipotesi testata, il modello risulta quindi nel caso di produzione dei fusilli:

$$\sigma_{w_i} = 0,123 \cdot \mu_{w_i}$$

## 4.4 Configurazione proposta dall'azienda

In questa sezione si riportano i dati relativi al processo produttivo dei ravioli e di seguito quelli relativi ai fusilli.

In Tabella 4.7 viene presentata la configurazione della pesatrice multitesta utilizzata in azienda per il confezionamento dei ravioli. Si ricorda che con il termine configurazione si vuole indicare la quantità media di prodotto presente nei cestelli pesatori. In Tabella 4.8 si riportano invece i valori relativi alla media della quantità confezionata, suddividendo tale valore tra prodotti conformi, quindi vendibili, e non conformi che necessitano di esser lavorati (oppure scartati nel caso in cui il prodotto non sia più rilavorabile ad esempio a causa dei tempi di scadenza). Inoltre vengono si è voluto mettere in evidenza la percentuale di conformi e infine il profitto associato alla vendita di una confezione.

Cestello	Config. Ravioli (g)
1	12,77
2	18,34
3	12,34
4	20,62
5	24,64
6	41,27
7	36,10
8	25,44
9	20,74
10	14,62

**Tabella 4.7:** Configurazione proposta dall'azienda nel caso di produzione ravioli

Analogamente a quanto visto per i ravioli si riportano le medesime tabelle relative al confezionamento dei fusilli. In particolare in Tabella 4.9 si riporta la configurazione in uso attualmente in azienda e in Tabella 4.10 i parametri relativi al processo produttivo fondamentali per poter calcolare il valore della funzione obiettivo, anch'esso riportato in tabella.

Cestello	Config. Fusilli (g)
1	62,75
2	63,54
3	58,45
4	68,35
5	59,24
6	70,76
7	53,36
8	56,13
9	52,76
10	72,71

**Tabella 4.9:** Configurazione proposta dall'azienda nel caso di produzione fusilli

Dati	
Media Conformi	210,76 (g)
Media Non conformi	180,49 (g)
Percentuale	0,96
Profitto unitario	41,04 (€cent)

**Tabella 4.8:** Dati azienda produzione ravioli

Dati	
Media Conformi	252,6 (g)
Media Non conformi	237,5 (g)
Percentuale	0,98
Risposta unitario	36,56 (€cent)

**Tabella 4.10:** Dati azienda produzione fusilli

## 4.5 Validazione del simulatore coi dati reali

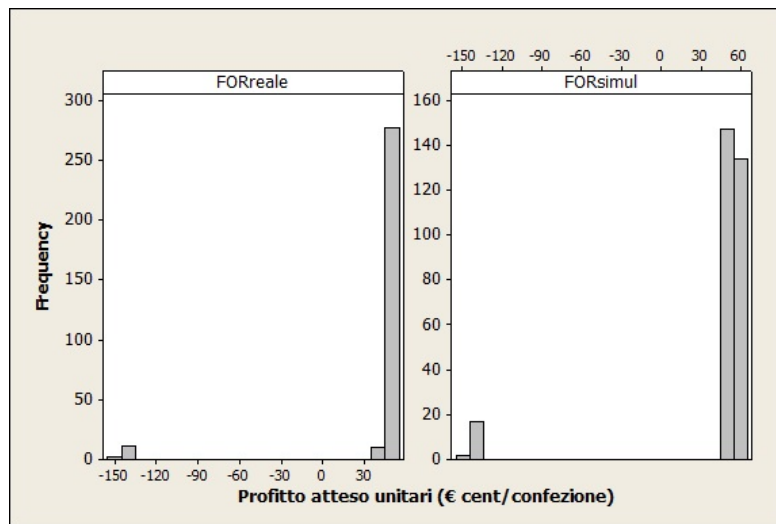
Nel quarto capitolo si è descritto nel dettaglio il comportamento del simulatore e si è evidenziato come esso non sia stato scritto per riprodurre fedelmente il comportamento della macchina. Nello specifico, grazie alla possibilità di scegliere tra tutte le possibili combinazioni di cestelli da aprire, ci si aspetta che il simulatore, una volta inseriti i dati reali, dia risultati statisticamente migliori rispetto a quelli ottenuti dall'azienda in questione.

Si è costruito un vettore contenente la condizione sperimentale da analizzare: la configurazione della pesatrice utilizzata in azienda. Si è generata un'estrazione casuale da una normale avente come media la condizione sperimentale considerata e come deviazione standard la medesima condizione sperimentale moltiplicata per il coefficiente di proporzionalità  $\alpha$ . Si è così ottenuta una matrice, in cui ogni riga corrisponde ad una possibile configurazione della macchina in un determinato istante temporale. Quindi ad ogni riga si è applicata la matrice delle combinazioni per poter individuare in base ai vari criteri la combinazione di cestelli più adeguata. Si riporta ora il confronto tra risultati ottenuti mediante il simulatore e quelli raccolti al Pastificio.

### Ravioli

Il confronto tra i risultati ottenuti dall'azienda con quelli generati dal simulatore può avvenire in differenti maniere. In primo luogo è possibile effettuare un confronto grafico: calcolata la distribuzione della funzione obiettivo relativa sia al caso reale sia alla situazione simulata, essa è stata rappresentata mediante l'utilizzo dell'istogramma. In Figura 4.10 si riportano gli istogrammi di entrambe le distribuzioni. Dall'osservazione del grafico è chiaro che le due distribuzioni sono diverse e sono caratterizzate da indici statistici differenti. L'istogramma relativo ai dati reali risulta infatti concentrato intorno ad un valore pari a 50,5 €cent che corrisponde circa ad una confezione di 210 g, quindi nettamente superiore al valore nominale della confezione. L'azienda ha motivato questo risultato spiegando che i ravioli sono caratterizzati da una data di scadenza molto ravvicinata essendo prodotti freschi, al massimo entro sera essi devono essere rilavorati altrimenti la confezione non risulta più vendibile e dev'esser buttata. L'operatore dovrebbe dunque prestare particolare attenzione a questo processo di confezionamento. Per

evitare spreco di tempo e di materiale la politica dell'azienda ha stabilito che per tali prodotti il target della macchina dev'esser impostato a valori nettamente superiori al valore nominale. Di contro il simulatore nella scelta delle combinazioni da scaricare tiene conto sia del costo di rilavorazione sia del costo di extra-prodotto, ed è in grado di scegliere la combinazione che massimizza il profitto unitario senza dimenticare la soddisfazione del cliente. Quindi si è deciso di impostare il vero valore nominale.

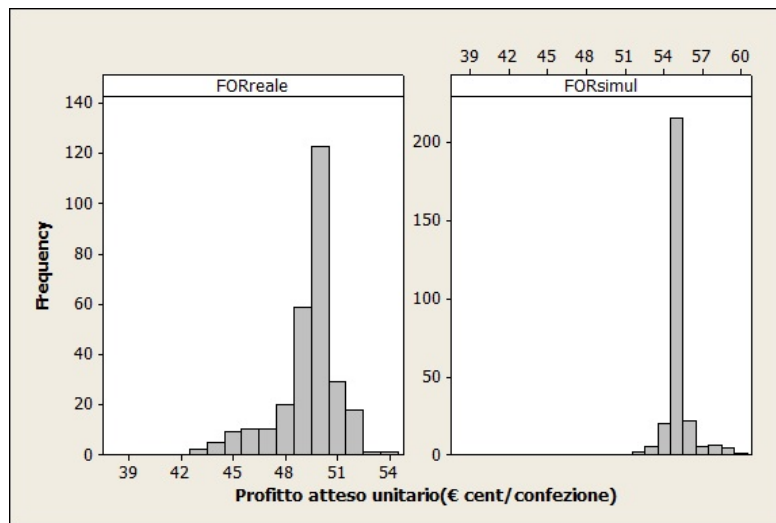


**Figura 4.10:** Istogramma della funzione obiettivo di ravioli del pastificio versus il simulatore

In Figura 4.11 sono stati riportati i medesimi istogrammi, considerando solo la parte di distribuzione maggiore di zero. Si è optato per questa scelta grafica solamente per rappresentare con maggior chiarezza le due distribuzioni.

Osservando l'istogramma relativo al simulatore, la distribuzione risulta concentrata attorno a 55 €cent che corrisponde al profitto unitario relativo alla vendita di una confezione da 200 g, quindi con peso pari al valore nominale.

L'osservazione puramente grafica non è sufficiente per determinare che il simulatore genera soluzioni migliori. In un secondo momento si è quindi deciso di confrontare il profitto unitario atteso e il guadagno che si otterrebbe dalla vendita di 300 confezioni per entrambe le soluzioni. In Tabella 4.11 sono mostrati i risultati: si osserva che il profitto generato dal simulatore è maggiore rispetto a quello



**Figura 4.11:** Istogramma della funzione obiettivo di ravioli del pastificio versus il simulatore, si considerino solo i valori maggior dello zero

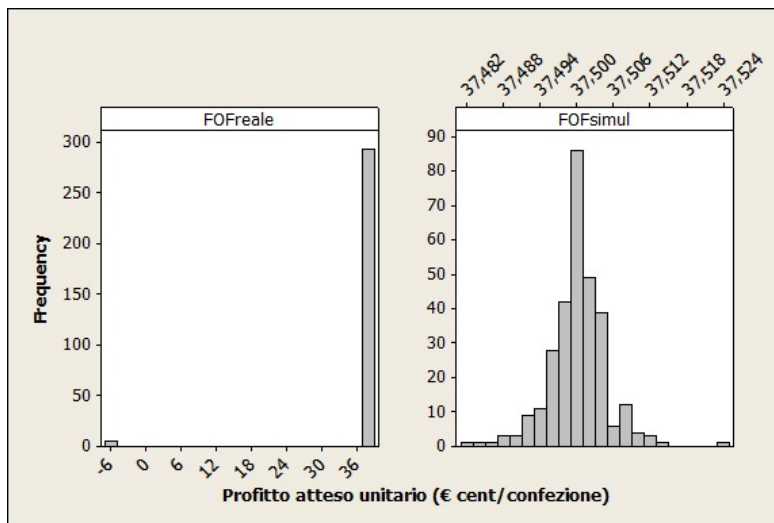
dell'azienda. Il simulatore grazie all'enumerazione esaustiva e ad un'opportuna scelta dei cestelli da aprire assicura quindi un profitto maggiore.

	Azienda	Simulatore
Profitto unitario (€cent/confezione)	41,0463	42,6781
Profitto totale (€cent)	12313,89	12803,43

**Tabella 4.11:** Profitto atteso: Azienda versus simulatore, nel caso di produzione ravioli

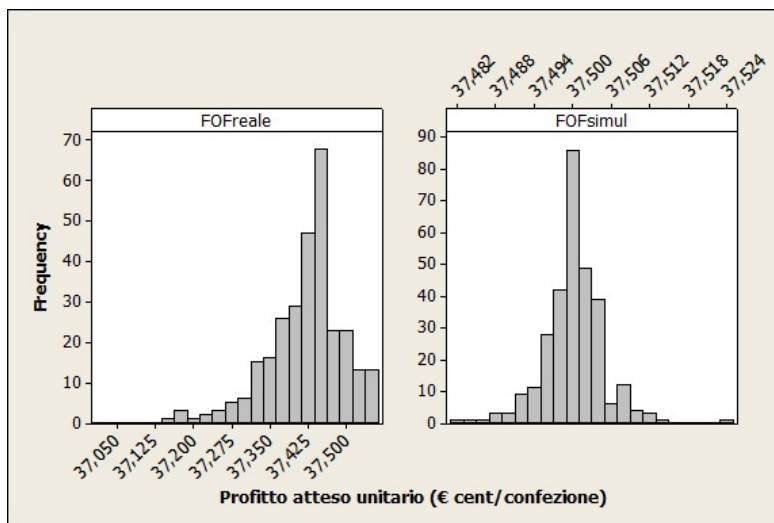
### Fusilli

Analogamente a quanto asserito per il caso di produzione dei ravioli, si riportano le medesime analisi per i fusilli. Si è rappresentata ogni distribuzione della funzione obiettivo mediante l'istogramma, in Figura 4.12 si riporta il grafico relativo al confronto degli istogrammi. Anche in questo caso da una prima analisi puramente grafica si può osservare come l'istogramma relativo alla distribuzione della funzione obiettivo ottenuta mediante il simulatore risulta più concentrata, attorno ad un valore della funzione obiettivo ottenibile mediante vendita di una confezione con peso pari al valore nominale, rispetto al risultato ottenuto dal Pastificio.



**Figura 4.12:** Istogramma della quantità confezionata di ravioli dal pastificio versus il simulatore

In Figura 4.13 si sono riportati gli istogrammi considerando la sola parte di distribuzione maggiore dello zero. È stata effettuata questa scelta per poter osservare con maggior attenzione le differenze tra le due distribuzioni.



**Figura 4.13:** Istogramma della quantità confezionata di ravioli dal pastificio versus il simulatore

Successivamente si è deciso di confrontare il profitto unitario e il profitto derivante dalla vendita di 300 confezioni di entrambe le situazioni. In Tabella 4.12 sono riportati i risultati. Si osserva che il guadagno generato dal simulatore

## 4.6 Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda 117

è maggiore di quello del Pastificio. Anche in questo caso si può confermare che la politica implementata nel simulatore genera risultati migliori.

	Azienda	Simulatore
Profitto unitario (€cent/confezione)	36,5606	37,5
Profitto totale (€cent)	10968,2	11250,04

**Tabella 4.12:** Profitto atteso: Azienda versus simulatore, nel caso di produzione fusilli

## 4.6 Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda

In questo paragrafo si andrà a proporre una configurazione statisticamente migliore sia nel caso di produzione ravioli sia nel caso dei fusilli.

Data in input la configurazione utilizzata in azienda, si è utilizzata la procedura RSM per identificare una configurazione statisticamente migliore, quindi che risultasse maggiormente concentrata intorno al valore nominale della confezione e in grado di massimizzare il profitto atteso associato alla vendita di una confezione.

### Ravioli

Si consideri inizialmente il miglioramento che si è ottenuto nel caso in cui si producessero i ravioli ripieni di verdure. Data la configurazione utilizzata attualmente in azienda, si è utilizzata la procedura RSM (implementata nel simulatore) per proporre una configurazione in grado di generare profitti maggiori. La configurazione individuata dal simulatore è riportata in Tabella 4.13. I parametri relativi alla soluzione trovata sono invece mostrati in Tabella 4.14 .



## 4.6 Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda 118

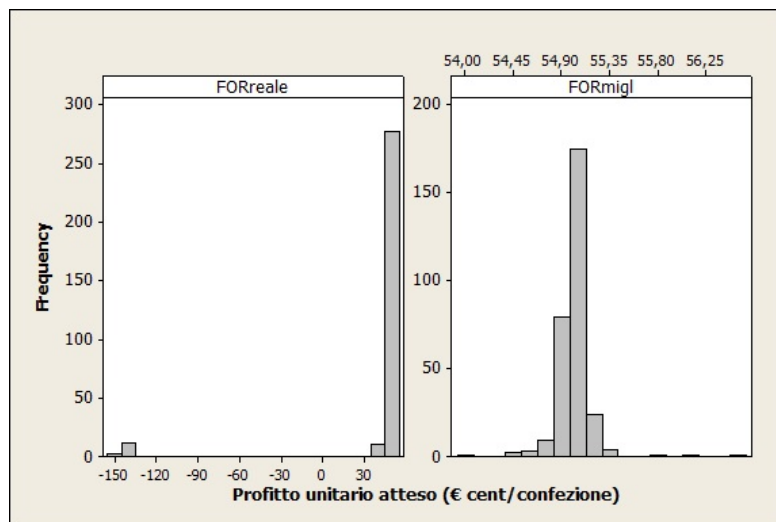
Cestello	Config. Ravioli (g)
1	14,89
2	18,31
3	13,58
4	20,38
5	25,52
6	45,57
7	46,67
8	32,42
9	38,53
10	26,50

Dati	
Media Conformi	199,97 (g)
Media Non conformi	0 (g)
Percentuale	1 (g)
Risposta	55,01 (€cent)

**Tabella 4.14:** Dati relativi al miglioramento ottenuto per i ravioli

**Tabella 4.13:** Miglioramento configurazione nel caso di produzione ravioli

Dopo aver calcolato la distribuzione della funzione obiettivo per la configurazione proposta, la si è rappresentata graficamente mediante l'istogramma. In Figura 4.14 si è messo in luce il confronto grafico tra i risultati ottenuti utilizzando quest'ultima configurazione rispetto a quelli generati dall'azienda.



**Figura 4.14:** Istogramma della funzione obiettivo di ravioli: ottimizzazione versus situazione attuale

## 4.6 Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda 119

Si osserva che l'istogramma della configurazione ottenuta in fase di miglioramento risulta concentrato attorno ad un valore di 55 €cent/confezione. Tale guadagno è ottenibile mediante la vendita di confezioni da 200 g.

Non potendo fare affidamento ai soli risultati grafici si è calcolato il profitto unitario e il guadagno generato dalla vendita di 300 confezioni per poterli confrontare con i guadagni attuali dell'azienda. Osservando i risultati riportati in Tabella 4.15 si deduce che la configurazione proposta genera risultati migliori rispetto a quelli ottenuti implementando l'attuale configurazione aziendale.

	Azienda	Simulatore
Profitto unitario (€cent/confezione)	41,046	55,012
Profitto totale (€cent)	12313,89	16503,01

**Tabella 4.15:** Profitto atteso: Azienda versus ottimizzazione, nel caso di produzione ravioli

Il simulatore è stato quindi in grado di condurre lo sperimentatore in una zona più proficua rispetto al punto di partenza, con un incremento del profitto unitario atteso percentuale del 34% circa.

### Fusilli

Si analizzano ora i risultati relativi al miglioramento ottenuto nel caso di produzione di fusilli, ripetendo in maniera analoga gli stessi passi compiuti nel caso di confezionamento dei ravioli.

Preso la configurazione attualmente utilizzata in azienda come punto di partenza, si è eseguita la procedura RSM. Il simulatore costruito è capace di condurre lo sperimentatore da un punto iniziale ad una configurazione in grado di generare guadagni maggiori. In Tabella 4.16 è riportata la configurazione ottenuta in seguito alla fase di ottimizzazione, mentre in Tabella 4.17 sono mostrati i valori dei parametri più interessanti per il calcolo della funzione obiettivo.

## 4.6 Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda 120

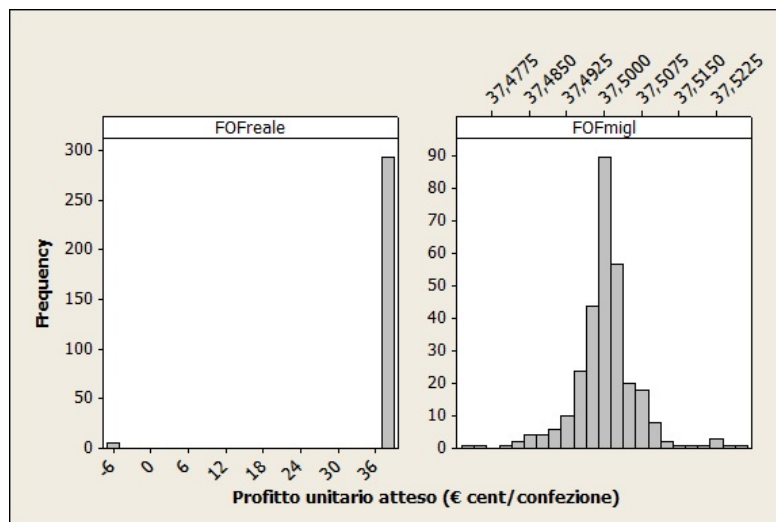
Cestello	Config. Fusilli (g)
1	60,86
2	61,85
3	57,29
4	67,71
5	59,55
6	72,45
7	55,80
8	59,96
9	57,31
10	79,26

Dati	
Media Conformi	250,02 (g)
Media Non conformi	0
Percentuale	1
Risposta	37,49 (€cent)

**Tabella 4.17:** Dati azienda produzione fusilli

**Tabella 4.16:** Miglioramento configurazione nel caso di produzione fusilli

Calcolata la distribuzione della funzione obiettivo associata alla configurazione proposta dal simulatore, la si è rappresentata graficamente mediante l'istogramma. In Figura 4.15 si riporta il confronto grafico tra quest'ultimo istogramma e quello corrispondente ai risultati ottenuti dall'azienda.



**Figura 4.15:** Istogramma della quantità confezionata di fusilli in fase di ottimizzazione

L'istogramma degli esiti relativi alla configurazione relativa al miglioramento

## 4.6 Miglioramento statistico della configurazione proposta dall'azienda 121

risulta maggiormente concentrato attorno ad un valore che corrisponde alla vendita di una confezione da 250g.

Si è deciso di dar maggior peso alle precedenti affermazioni confrontando il profitto unitario e il guadagno ottenuto dalla vendita di 300 confezioni di entrambe le soluzioni. I risultati riportati in Tabella 4.18 confermano quanto asserito precedentemente. Il simulatore anche in questo caso è stato in grado di condurre lo sperimentatore in una zona a cui sono associati guadagni maggiori. L'aumento del profitto unitario atteso si è attestato intorno al 2,5%; questo risultato non ci sorprende: la configurazione iniziale dell'azienda evidentemente operava già in prossimità di una soluzione ottimale.

	Azienda	Simulatore
Profitto unitario (€cent/confezione)	36,5606	37,5
Profitto totale (€cent)	10968,2	11250,07

**Tabella 4.18:** Profitto atteso: Azienda versus ottimizzazione, nel caso di produzione fusilli

## Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro nasce dall'esigenza di individuare una soluzione al problema della configurazione di una pesatrice multitesta. Dopo averne studiato il funzionamento, si è individuato uno strumento di valutazione in grado di confrontare le soluzioni possibili. Per risolvere il problema in esame si è deciso di utilizzare la procedura RSM, metodologia in grado di condurre lo sperimentatore da una situazione iniziale non efficiente ad una zona di ottimo della funzione di risposta presa in considerazione.

Innanzitutto si è determinato il parametro più adeguato per il confronto di due diverse soluzioni: attraverso un'attenta analisi della letteratura esistente relativa al processo di confezionamento si è selezionato il profitto unitario atteso. È stato quindi necessario individuare le variabili caratterizzanti tale funzione obiettivo. Tra questi si individuano due categorie di fattori: *product-specific* (ricavo unitario, costo unitario di materia prima e costo unitario di rilavorazione) e quelli relativi al processo produttivo (media della quantità confezionata e probabilità di produrre una confezione "conforme"). Analizzando il comportamento della funzione in esame essa è risultata caratterizzata da un'unica regione di massimo. La scelta della procedura RSM ben si adatta a questa particolare situazione.

È stato costruito un simulatore in ambiente Matlab in grado di riprodurre i passi della metodologia RSM. Esso è stato validato attraverso l'utilizzo di dati reali raccolti dal processo di confezionamento di un pastificio varesino. La funzione obiettivo è stata quindi implementata nel simulatore in quanto il risultato da essa generato è l'output di interesse del problema. Le diverse configurazioni proposte sono state appunto confrontate in base al valore del profitto unitario atteso.

Data la configurazione utilizzata in azienda è stato possibile individuare una configurazione statisticamente migliore e quindi in grado di generare profitti maggiori grazie all'utilizzo del simulatore. In particolare nel caso di produzione di ravioli,

uno dei due prodotti presi in esame, si è ottenuto un miglioramento del 34% del profitto generato dalla vendita di una singola confezione. L'implementazione della procedura RSM ha quindi portato un risultato economico rilevante per l'azienda. Viceversa per il secondo prodotto, i fusilli, l'incremento del profitto unitario atteso è risultato minimo (2,5% circa) a causa della configurazione di partenza adottata in azienda, vicina ad una zona di ottimo.

Di contro, nonostante i risultati notevoli da un punto di vista economico e significativi da un punto di vista teorico, il presente lavoro di tesi non è esente da limitazioni. In primo luogo la funzione obiettivo è stata costruita ipotizzando la presenza di una bilancia di precisione alla fine della fase di confezionamento per il controllo al 100% del peso delle confezioni prodotte. Non è stato quindi tenuto in considerazione il caso in cui tale bilancia sia assente e risulti necessario implementare i controlli imposti dalla legge n°690 del 1978. Inoltre è stato analizzato il solo funzionamento della pesatrice multitesta: in futuro si dovrebbe analizzarla congiuntamente a quello della confezionatrice poiché macchine interconnesse tra di loro nel processo di confezionamento. In ultimo non è stato tenuto in considerazione il tempo macchina nel calcolo delle combinazioni di cestelli da aprire: ciò può risultare limitante a causa della possibile scarsità di tempo per l'elaborazione della soluzione.

# Bibliografia

- [Als94] K. S. Al Sultan, *An algorithm for determination of the optimal target values for two machines in series with quality sampling plans*, International Journal of Production Research 32, pp. 37-45, 1994.
- [Als95] K. S. Al Sultan, Al Fawzan, *Variance reduction in a process with random linear drift*, International Journal of Production Research Accepted, 1995.
- [Als97] Al Sultan, M. Pulak, *Process improvement by variance reduction for a single filling operation with rectifying inspection*, Production Planning and Control 8, pp. 431-436, 1997.
- [Bet62] D.C. Bettes, *Finding an optimal target value in relation to a fixed lower limit and an arbitrary upper limit*, Applied Statistics 11, pp. 202-210, 1962.
- [Bis84] S. Bisgaard, W.G. Hunter, L. Pallessen, *Economic selection of quality of manufactured product*, Technometrics 26, pp. 9-18, 1984.
- [Box57] G. E. P. Box, J. S. Hunter, *Multifactor Experimental Factorial Design for Exploring Response Surface*, Annals of Mathematical Statistics, Vol. 28, pp. 195-242, 1957.
- [Bou91] T. O. Boucher, M. A. Jafari, *The Optimum Target Value for Single Filling Operations with Quality Sampling Plans*, Journal of Quality Technology 23, pp. 44-47, 1991.
- [Car84] O. Carlsson, *Determining the most profitable process level for a production process under different sales conditions*, Journal of Quality Tecnology 16, pp.44-49, 1984.

- [Car89] O. Carlsson, *Economic selection of a process level under acceptance sampling by variables*, Engineer Costs and Production Economics 16, 1989.
- [Cur97] R. Curti M. Grandi, *Per niente fragile. Bologna capitale del packaging*, Editrice Compositori, Bologna, 1997.
- [Dur06] F. Durante, *Applicazione della RSM per la configurazione di una pesatrice multitesta*, 2006.
- [Ferr99] F. Ferrario, P. Laghezza, *Proposta di una metodologia di configurazione e gestione di una pesatrice multitesta*, 1999.
- [Gol87] D. Y. Golhar, *Determination of the best mean contents for a canning problem*, Journal of Quality Tecnology 19, pp. 82-84, 1987.
- [Gol88] D. Y. Golhar, S. M. Pollock, *Determination of the Optimal Process Mean and the Upper Limit for a Canning Problem*, Journal of Quality Technology 20, pp. 188-192, 1988.
- [Hun77] W.G. Hunter, C.P. Kartha, *Determining the Most Profitable Target Value for a Production Process*, Journal of Quality Technology 9, pp. 176-181, 1977.
- [Liu97] J. Liu, K. Tang, Y. H. Chun, *Economic selection of the mean and upper limit for a container-filling process under capacity constraints*, in Optimization in Quality Control a cura di K. S. Al Sultan, M.A. Rahim Kluwer Academic publishers, 1997.
- [Mel91] B. J. Melloy, *Determining the optimal process mean and screening limits for packages subject to compliance testing*, Journal of Quality Tecnology 23, pp. 318-323, 1991.
- [Mih95] D.P. Mihalko, D.Y. Golhar, *Estimation of optimal profit for a production process with unknown variance*, International Journal of Production Research 33, pp. 2125-2131, 1995.
- [Mon91] D.C. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*, J.Wiley, New York, 1991.
- [Mon04] D.C. Montgomery, *Statistica per ingegneria*, Egea, Milano, 2004.



- [Mon05] D.C. Montgomery, *Progettazione e analisi degli esperimenti*, McGraw-Hill, Milano, 2005.
- [Mon09] D.C. Montgomery, *Response Surface Methodology*, J.Wiley, New York, 2009.
- [Moo92] A. Mood, F. Graybill, D. Boes, *Introduzione alla statistica*, Mc Graw Hill, 1992.
- [Nel78] L. S. Nelson, *Best target value for a production process*, Journal of Quality Tecnology 12, pp. 75-87, 1978.
- [Nel79] L. S. Nelson, *Nomograph for setting process to minimize scrap cost*, Journal of Quality Tecnology 11, pp.48-49, 1979.
- [Pie79] L. Piergiovanni, S. Limbo, *Food packaging. Materiali, tecnologie e qualità degli alimenti*, Springer-Verlag Italia, Milano, 2010.
- [Sal08] A. Saltelli, M. Ratto, *Global Sensitivity analysis*, J.Wiley, New York, 2008.
- [Sch89] R. L. Schimdt, P. E. Pfeifer, *An Economic evaluation of improvements in process capability for a single level canning problem*, Journal of Quality Tecnology 21, pp.16-19, 1989.
- [Sch91] R. L. Schimdt, P. E. Pfeifer, *Economic selection of the mean and upper limit for a canning problem with limited capacity*, Journal of Quality Tecnology 23, pp. 312-317, 1991.
- [Spr51] C. H. Spinger, *A method of determining the most economic position of a process mean*, Industrial Quality Control 8, pp. 36-39, 1951.
- [UCI10] *Rapporto di settore*, UCIMA, 2010.

# Appendice A

## Indicatori economici

In questa sezione vengono spiegati gli indici economici utilizzati nel primo capitolo.

- **Fatturato medio:** calcolato come Ricavo netto, ossia il fatturato è stato considerato al netto di Iva, resi, sconti, sostituzioni ed eventuali provvigioni;
- **EBITDA mgn:** è l'EBITDA/fatturato. L'EBITDA è molto simile al valore dei flussi di cassa prodotti da una azienda, diviso per il fatturato dà un'idea di quanto è efficace la gestione operativa dell'azienda rispetto ai ricavi generati;
- **CAGR fatt:** CAGR (Compound Annual Growth Rate), o tasso annuo di crescita composto, è un indice che rappresenta il tasso di crescita medio di un certo valore in un dato arco di tempo. CAGR fatt è quindi il tasso di crescita del fatturato;
- **EBIT/DIP:** è il reddito operativo aziendale (prima degli oneri finanziari), generato da ciascun dipendente;
- **ROI:** esprime la redditività di tutto il capitale investito dall'azienda, a prescindere dalla natura delle fonti utilizzate (capitale di debito o capitale proprio);
- **PFN/EBITDA:** il PFN è la Posizione Finanziaria Netta; questa voce, se negativa, fornisce una misura dell'indebitamento finanziario netto, cioè dell'ammontare dei debiti di natura finanziaria contratti dall'azienda da cui vengono sottratte le disponibilità finanziarie. Se positiva, indica che le attività finanziarie compensano l'esposizione debitoria.

---

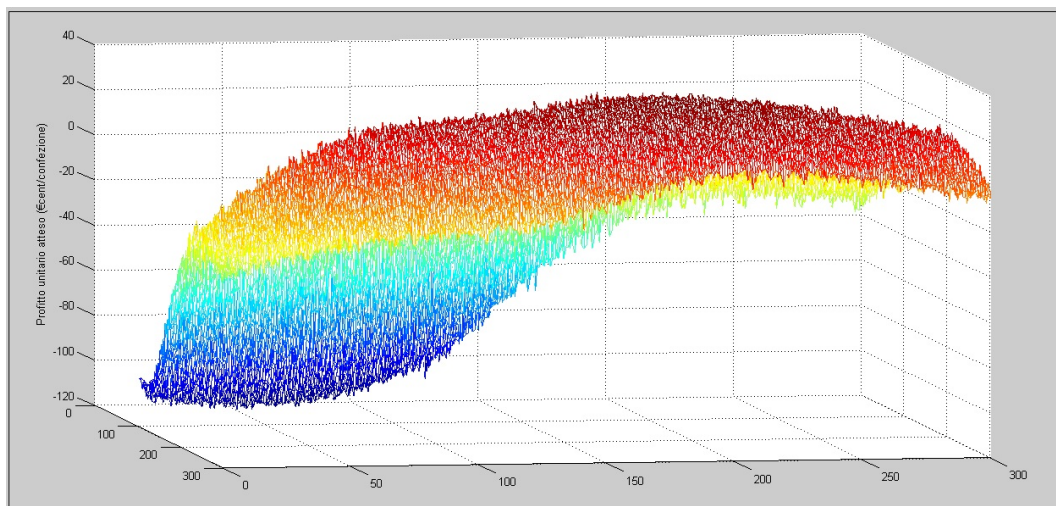
L'indicatore considerato, esprime il rapporto tra l'indebitamento finanziario netto e il margine operativo lordo, cioè segnala di quante volte l'indebitamento finanziario netto supera la marginalità lorda dell'impresa considerata, ossia la capacità dell'azienda di generare reddito con la sua gestione caratteristica. Esprime, quindi, un'indicazione sulla capacità della medesima azienda di finanziare i mezzi di terzi. Quanto più il valore del rapporto risulta elevato tanto più è remota nel tempo la capacità per l'azienda di ridurre il suo livello di indebitamento (i debiti sono molto più grandi degli utili). V'è tenuto presente che i debiti di un'azienda sono funzione del settore di appartenenza e della propria redditività;

- **D/E**: rapporto di leva, che indica l'entità dell'indebitamento rispetto al capitale sociale. Sfruttare la leva finanziaria, vuol dire prendere in prestito dei capitali confidando nella propria capacità di investirli ottenendo un rendimento maggiore del tasso di interesse richiesto dal prestatore. Le imprese che fanno maggiore ricorso all'indebitamento sono tipicamente quelle di dimensione maggiore: questo è correlato anche al fatto che la scala dimensionale dell'impresa agevola la concessione di prestiti da parte di terzi;
- **Aziende**: il campione comprende quasi completamente aziende di piccola dimensione (75% del campione), per rispecchiare fedelmente la struttura del mercato italiano.

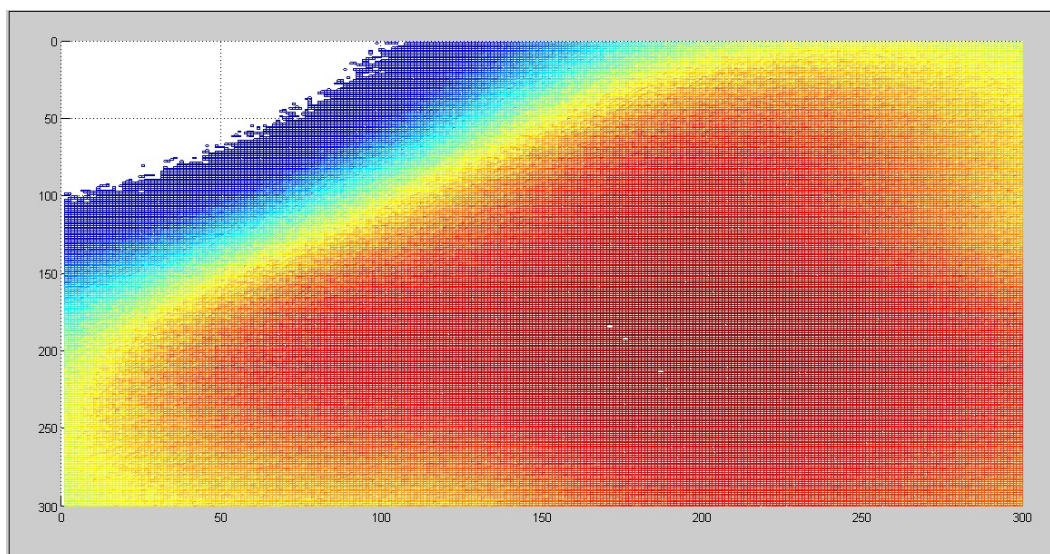
# Appendice B

## Analisi funzione obiettivo

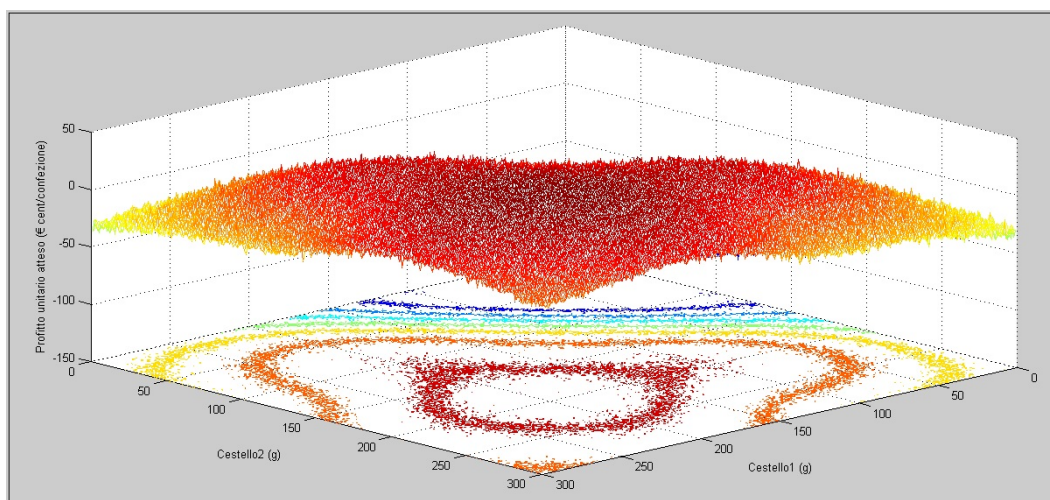
In questo capitolo sono presentate le diverse viste della funzione obiettivo analizzata nel Capitolo 2.3.



**Figura B.1:** Analisi della funzione obiettivo di una pesatrice a due teste, di lato



**Figura B.2:** Analisi della funzione obiettivo di una pesatrice a due teste, dall'alto



**Figura B.3:** Analisi della funzione obiettivo di una pesatrice a due teste mediante le curve di livello

# Appendice C

## Analisi dati reali

In questa appendice si riportano le principali analisi relative ai dati reali raccolti durante l'esperienza in azienda. In primo luogo si analizzano i dati relativi alla produzione di ravioli ripieni di verdure, nella seconda parte del capitolo si ripetono in maniera analoga le analisi nel caso di produzione di fusilli.

### C.0.1 Analisi grafica dei dati reali relativi alla produzione di ravioli

In questo paragrafo si mostrano i risultati relativi all'analisi di normalità e di autocorrelazione delle quantità che riempiono i singoli cestelli

#### Verifica normalità quantità contenute all'interno dei singoli cestelli

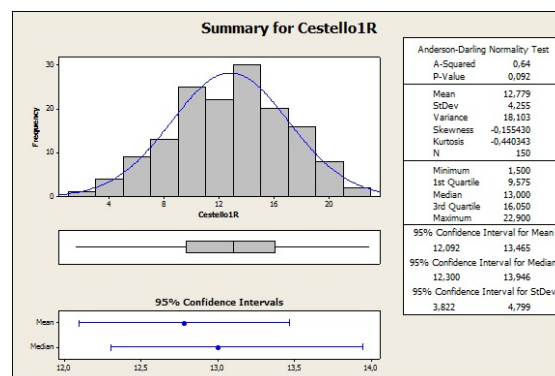


Figura C.1: Test di normalità cestello1, ravioli

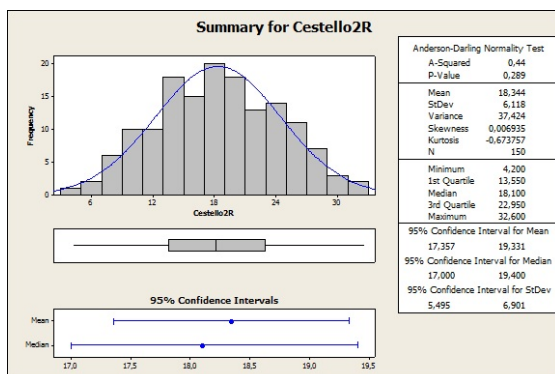


Figura C.2: Test di normalità cestello2, ravioli

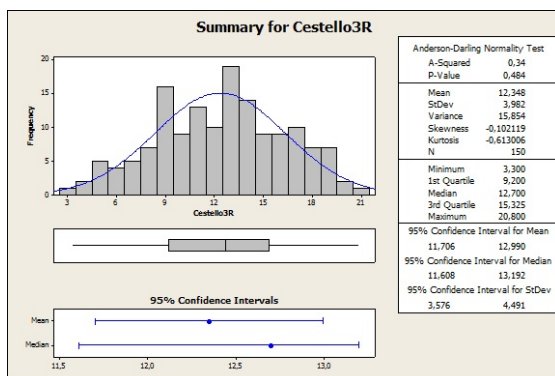


Figura C.3: Test di normalità cestello3, ravioli

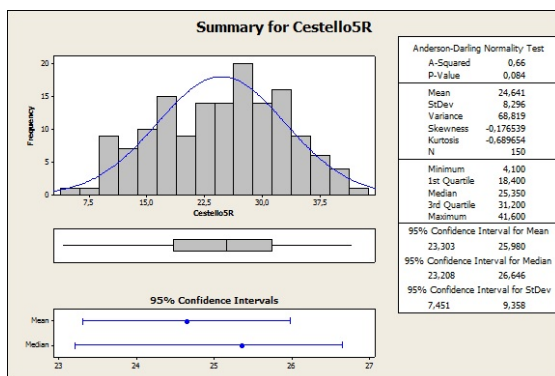


Figura C.4: Test di normalità cestello5, ravioli

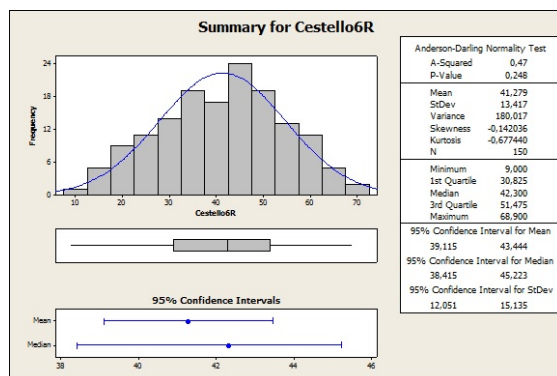


Figura C.5: Test di normalità cestello6, ravioli

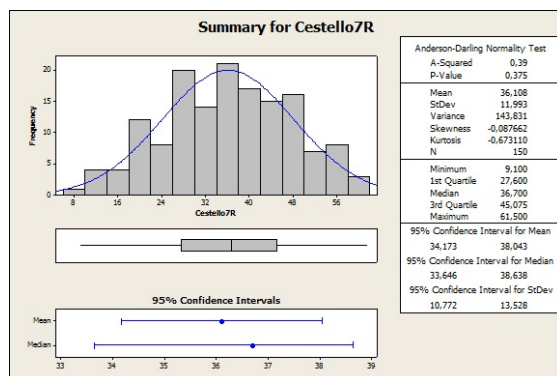


Figura C.6: Test di normalità cestello7, ravioli

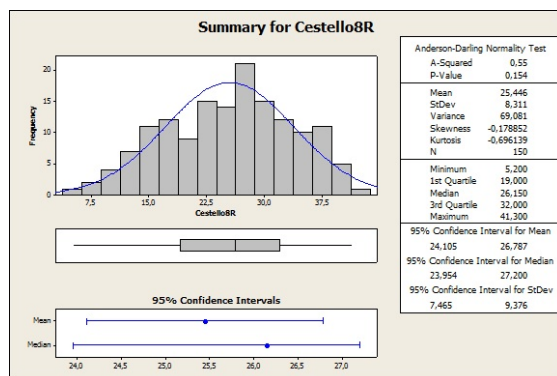


Figura C.7: Test di normalità cestello8, ravioli



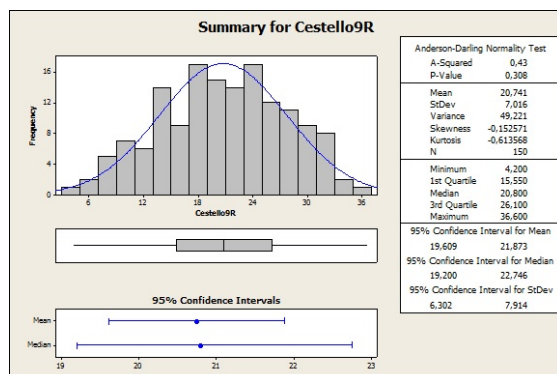


Figura C.8: Test di normalità cestello9, ravioli

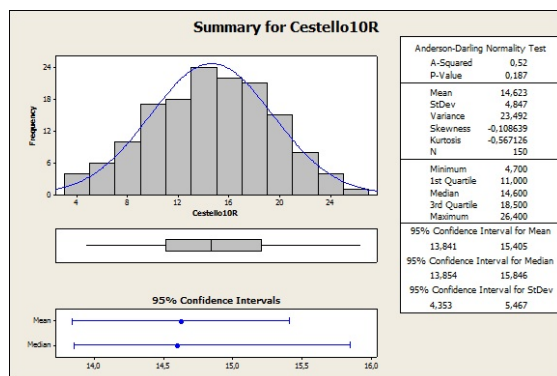


Figura C.9: Test di normalità cestello10, ravioli

Verifica autocorrelazione temporale delle quantità contenute all'interno dei singoli cestelli

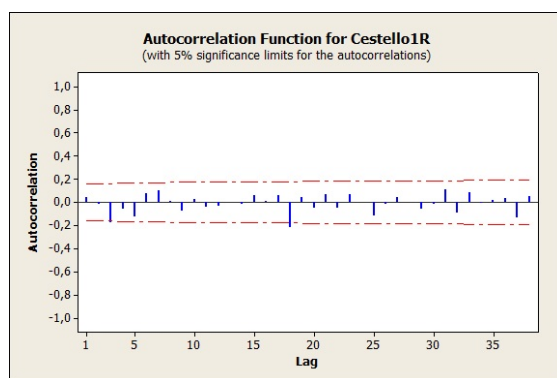


Figura C.10: Analisi autocorrelazione cestello1, ravioli

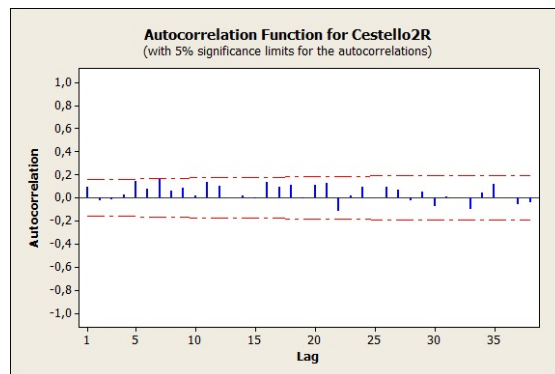


Figura C.11: Analisi autocorrelazione cestello2, ravioli

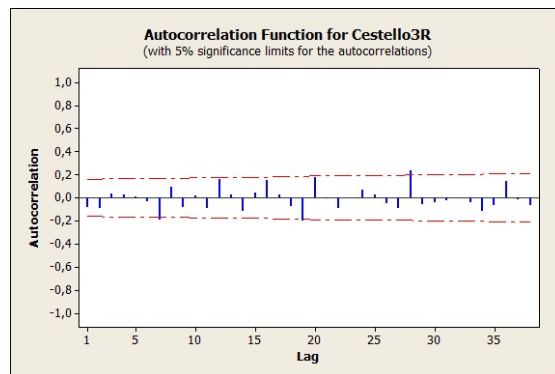


Figura C.12: Analisi autocorrelazione cestello3, ravioli

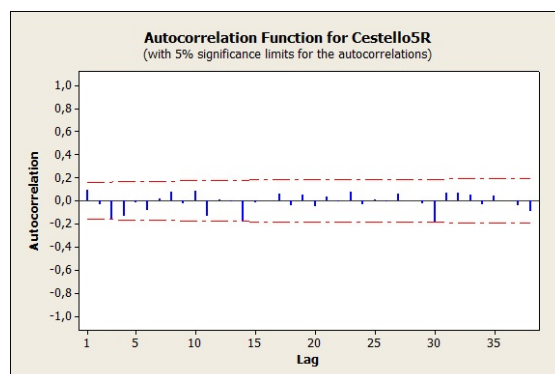


Figura C.13: Analisi autocorrelazione cestello5, ravioli

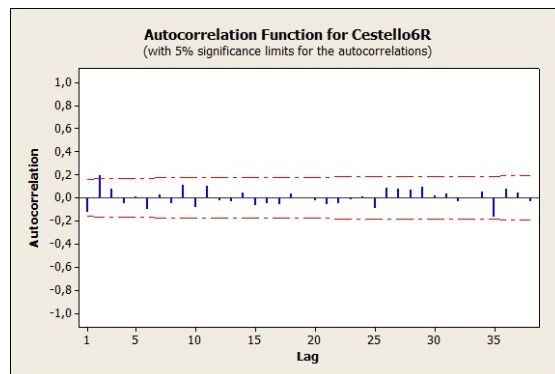


Figura C.14: Analisi autocorrelazione cestello6, ravioli

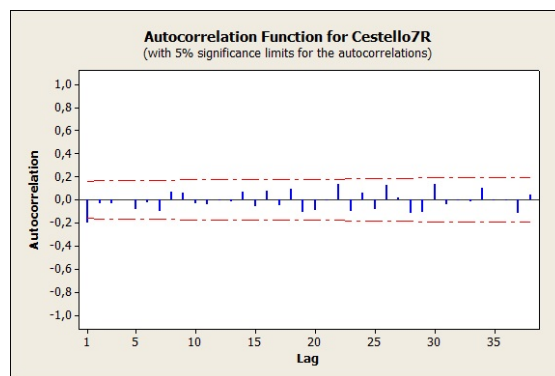


Figura C.15: Analisi autocorrelazione cestello7, ravioli

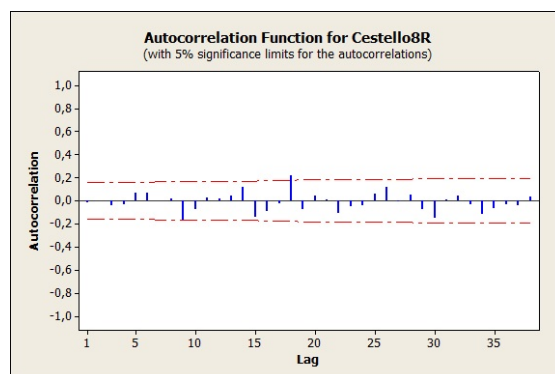
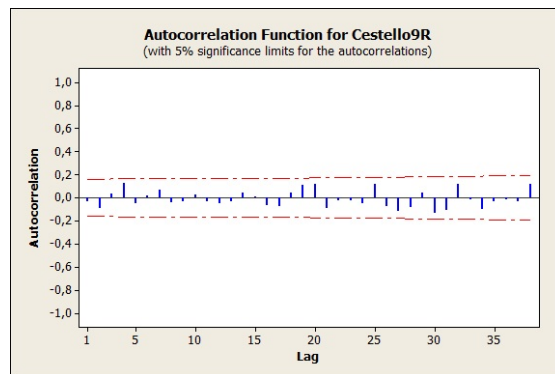
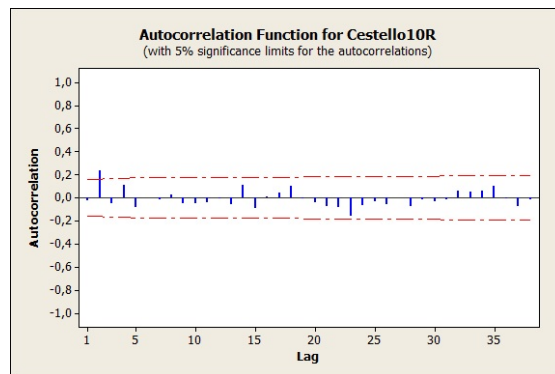


Figura C.16: Analisi autocorrelazione cestello8, ravioli



**Figura C.17:** Analisi autocorrelazione cestello9, ravioli



**Figura C.18:** Analisi autocorrelazione cestello10, ravioli

## C.0.2 Analisi residui

In Figura C.19 sono riportate le principali analisi relative ai residui. In primo luogo è stata verificata la loro normalità. In un secondo momento si è effettuato un plot dei residui versus i fits, la distribuzione dei punti nel grafico appare omogenea. Le verifiche relative al modello sono quindi superate: il modello in analisi è da considerarsi valido.

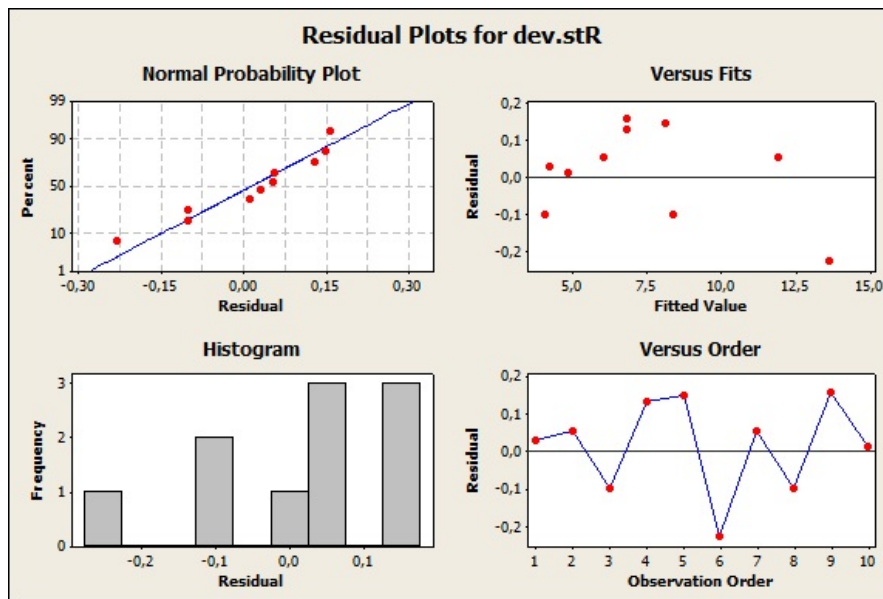


Figura C.19: Grafici relativi alle analisi dei residui, ravioli

### C.0.3 Analisi grafica dati reali relativi alla produzione di fusilli

Si riportano gli esiti statistici del test di normalità e autocorrelazione temporale applicati alle quantità che riempiono i singoli cestelli. **Verifica normalità quantità contenute all'interno dei singoli cestelli**

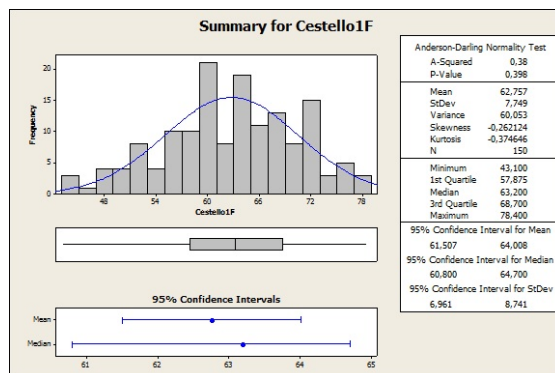


Figura C.20: Test di normalità cestello1, fusilli

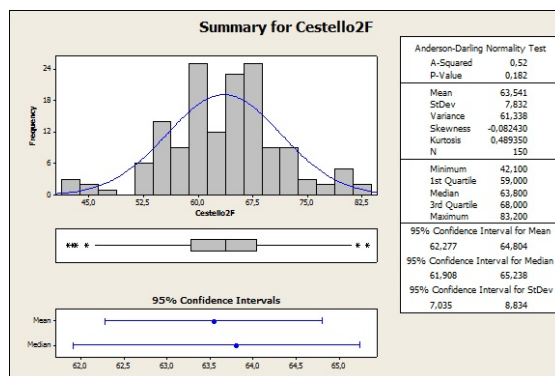


Figura C.21: Test di normalità cestello2, fusilli

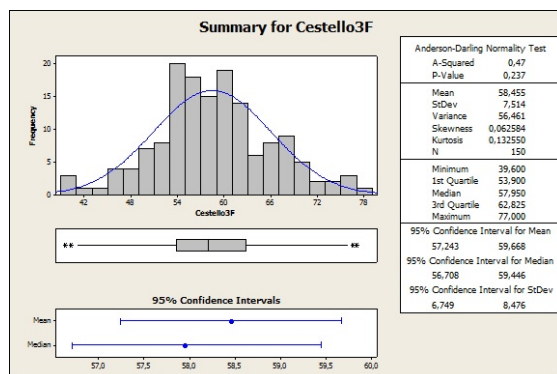


Figura C.22: Test di normalità cestello3, fusilli

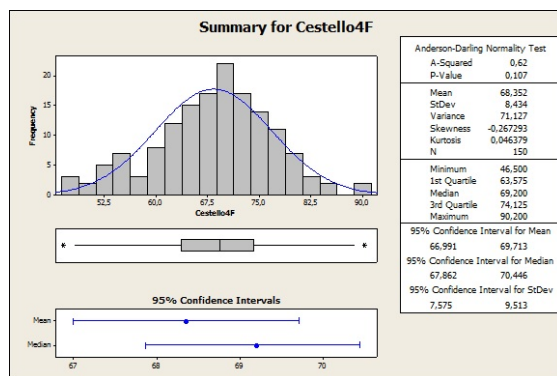


Figura C.23: Test di normalità cestello4, fusilli

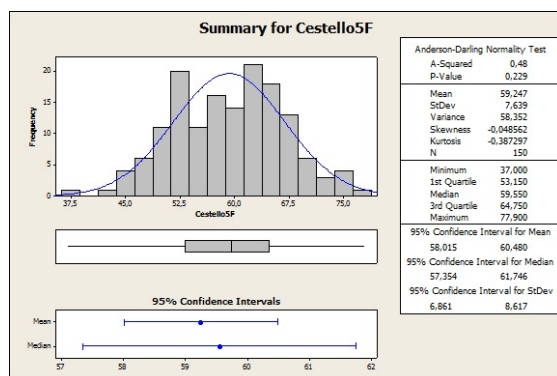


Figura C.24: Test di normalità cestello5, fusilli

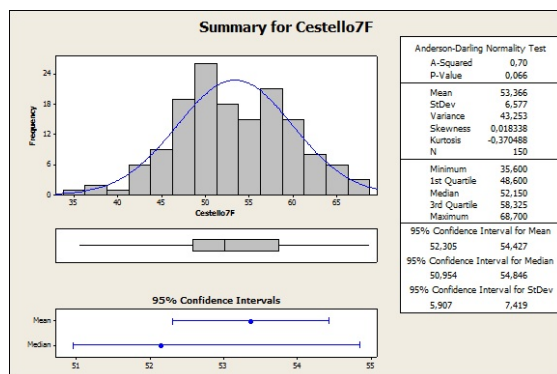


Figura C.25: Test di normalità cestello7, fusilli

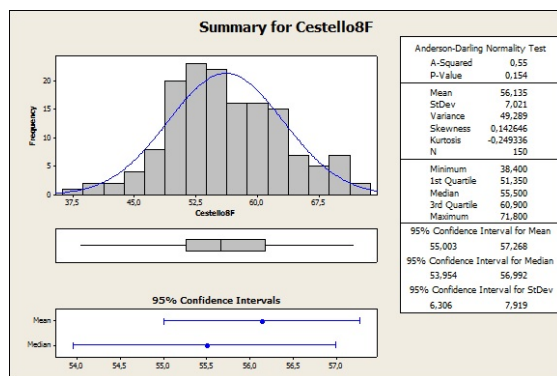


Figura C.26: Test di normalità cestello8, fusilli

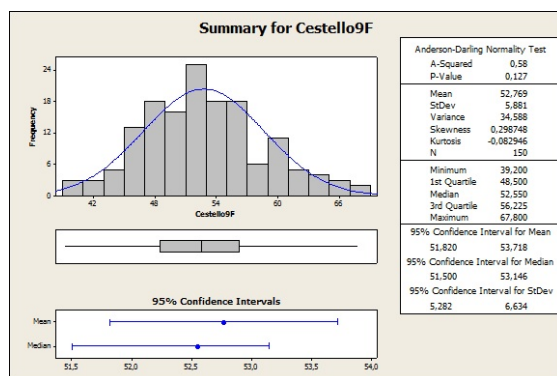


Figura C.27: Test di normalità cestello9, fusilli



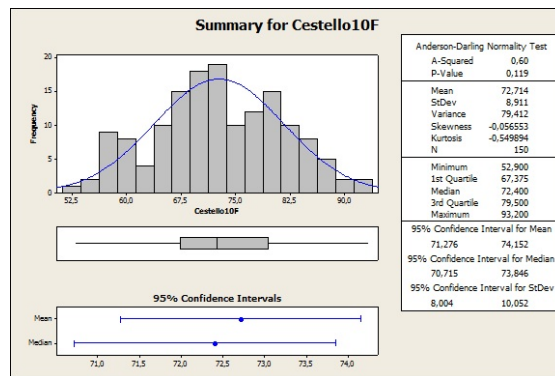


Figura C.28: Test di normalità cestello10, fusilli

Verifica autocorrelazione temporale delle quantità contenute all'interno dei singoli cestelli

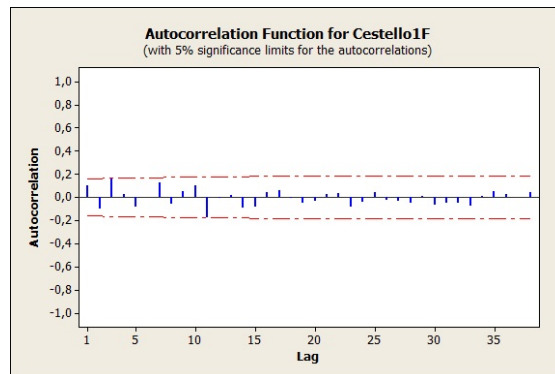


Figura C.29: Analisi autocorrelazione cestello1, fusilli

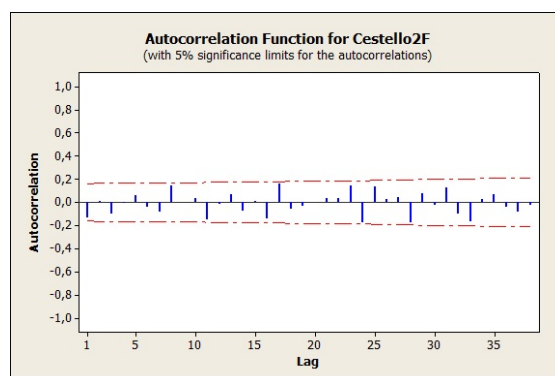


Figura C.30: Analisi autocorrelazione cestello2, fusilli

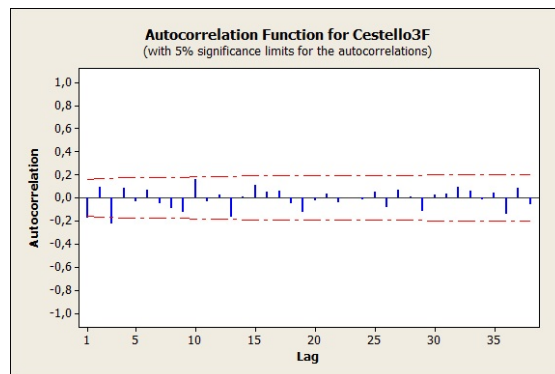


Figura C.31: Analisi autocorrelazione cestello3, fusilli

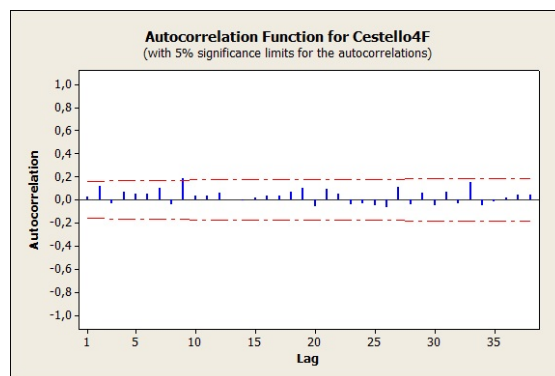


Figura C.32: Analisi autocorrelazione cestello4, fusilli

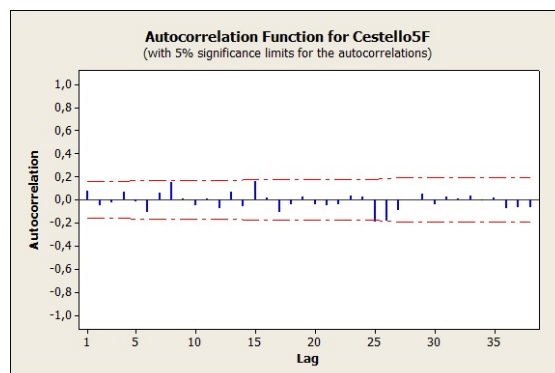


Figura C.33: Analisi autocorrelazione cestello5, fusilli

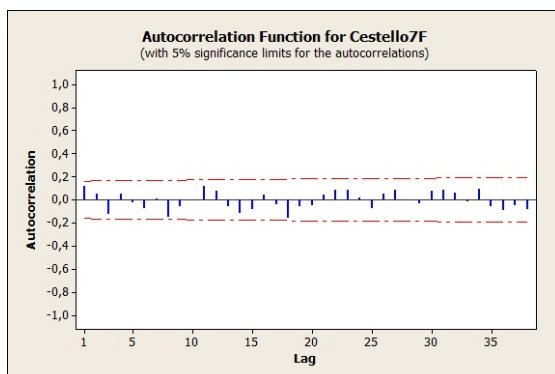


Figura C.34: Analisi autocorrelazione cestello7, fusilli

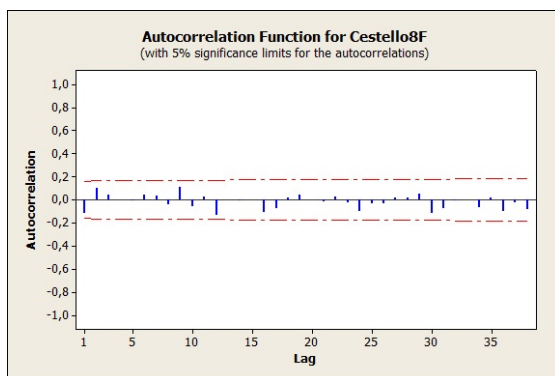


Figura C.35: Analisi autocorrelazione cestello8, fusilli

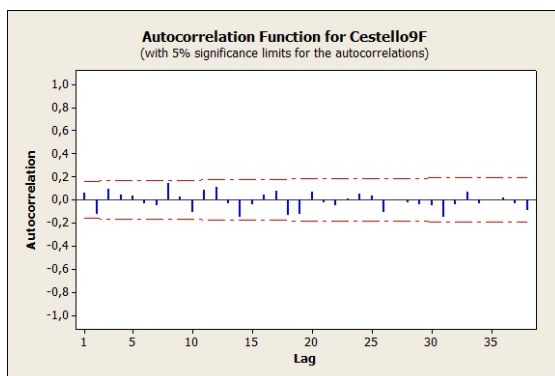


Figura C.36: Analisi autocorrelazione cestello9, fusilli

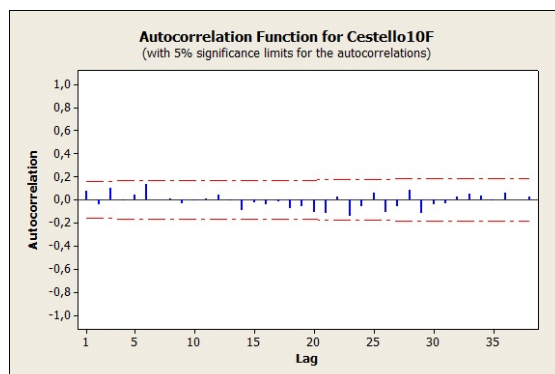


Figura C.37: Analisi autocorrelazione cestello10, fusilli

### C.0.4 Analisi residui

In Figura C.38 sono riportate le principali analisi relative ai residui. In primo luogo è stata verificata la loro normalità. In un secondo momento si è effettuato un plot dei residui versus i fits, la distribuzione dei punti nel grafico appare omogenea. Le verifiche relative al modello sono quindi superate: il modello in analisi è da considerarsi valido.

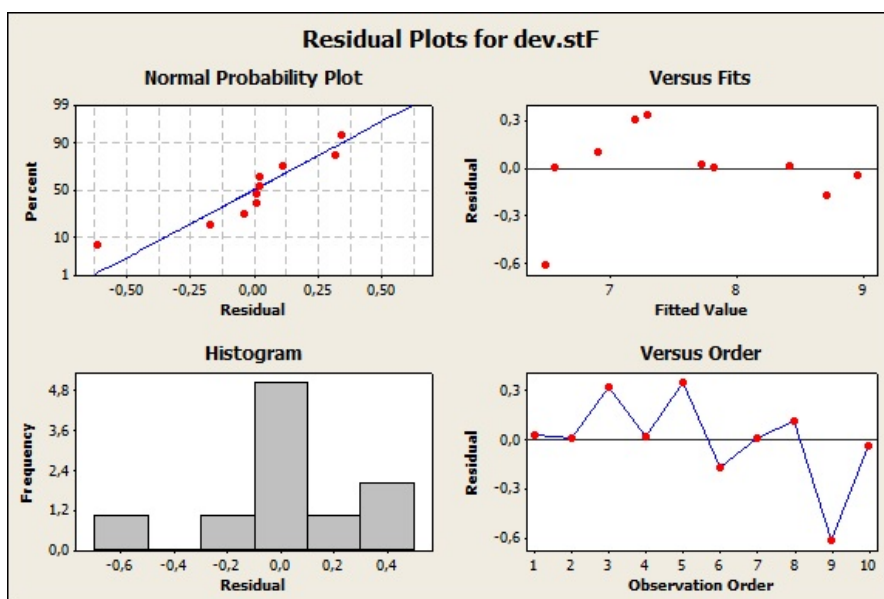


Figura C.38: Grafici relativi alle analisi dei residui, fusilli