

PARTE TERZA

**IL CONTROLLO DEL  
WORK IN PROCESS  
NEI JOB-SHOPS  
E NEGLI FMS: UN MODELLO DI  
SIMULAZIONE PER IL CONFRONTO  
TRA METODOLOGIE DI STIMA**

## CAPITOLO 7

### UN MODELLO DI SIMULAZIONE PER IL CONFRONTO TRA METODOLOGIE DI STIMA DEL WIP NEI JOB-SHOPS E NEGLI FMS

#### 7.1. Introduzione.

In questo capitolo viene presentato il lavoro di approfondimento che è stato compiuto nell'affrontare il tema specifico della misura del materiale in corso di lavorazione (o con terminologia anglosassone work in process) nei sistemi produttivi job-shops e nei sistemi flessibili di produzione.

Nei sistemi produttivi con funzioni differenti operanti disgiuntamente, detti anche job-shops, l'importanza di disporre di strumenti per la stima del work in process (WIP) è dovuta ad una serie di motivi tra cui:

- il materiale in corso di lavorazione costituisce una cospicua porzione del capitale circolante e pertanto il suo controllo è importante dal punto di vista finanziario<sup>1</sup>;
- la rilevazione diretta del WIP è onerosa in termini di risorse impegnate (persone, mezzi, ecc.).

Risultano quindi estremamente utili metodologie più economiche anche se più approssimate per la stima del WIP<sup>2</sup>.

L'individuazione del valore del WIP nel job-shop è inoltre tanto più importante quando, in sede di valutazione di introduzione di sistemi flessibili di produzione, si tenta di confrontare il valore del WIP nei due casi: job-shop e FMS.

Che l'introduzione degli FMS comporti una riduzione del WIP è riconosciuto da tutti. In un recente studio della Boston Consulting Group<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> F. DA VILLA, *Programmazione e controllo della produzione*, Etas Libri, 1985, Appendice 10.3.

<sup>2</sup> In letteratura non mancano contributi in tal senso. Cfr. A. BERLOTTI, C. DE ROSA, G. UGHETTO, *Un metodo semplificato di stima del WIP teorico*, *Produrre*, n. 11, Novembre 1984. Sempre sulla problematica del WIP si veda E. HEARD, G. PLOSSL, *Controlling Through put Time, Inventories & Production Magazine*, September-October, 1983. Per un caso applicativo si veda C. SELLA, F. TURCO, *La gestione del WIP nelle aziende manifatturiere: esame di un caso*, *Logistica d'Impresa*, n. 21, 1984.

<sup>3</sup> THE BOSTON CONSULTING GROUP, *Strategic study of the machine tool industry*, Summary Report, Commission of the European Communities, 1985, pg. 30-35.

sull'industria europea di macchine utensili si valuta che l'introduzione dei sistemi flessibili di produzione possa ridurre di oltre il 50% i costi del valore aggiunto di produzione (vedi fig. 7.1.).

Il WIP viene considerato come una delle tre voci fondamentali, insieme ad ammortamento e manodopera, del costo del valore aggiunto di produzione, con una percentuale di circa il 30% in sistemi manifatturieri convenzionali e di circa il 20% negli FMS. La riduzione in termini assoluti dei costi dovuti al materiale in corso di lavorazione è stimata pertanto essere circa del 66% (2/3).

Nello sviluppo del problema gli obiettivi che ci siamo posti sono stati i seguenti:

- individuare tra i metodi possibili quelli che stimano il WIP nei job-shops in modo migliore;
- verificare l'esistenza di particolari «condizioni» che rendono le stime più o meno approssimate;
- individuare delle possibili analogie formali tra i parametri che determinano il valore del WIP nei job-shops e negli FMS.

La verifica dei diversi livelli di stima realizzati dalle varie metodologie proposte è stata effettuata utilizzando un modello parametrico di simulazione di un job-shop appositamente sviluppato e denominato WIPS (Work in Process Simulator).

Successivamente vengono individuate le analogie formali tra job-shops e FMS. Le modifiche richieste per la applicazione del medesimo simulatore agli FMS non sono ancora state realizzate. Esse comunque sono legate solo ad aspetti marginali che non toccano la analogia formale individuata.

## **7.2. Le metodologie di stima del WIP in un job-shop.**

### **7.2.1. Le grandezze in gioco.**

Consideriamo un sistema produttivo job-shop (vedi fig. 7.2.); le grandezze in gioco ai fini del calcolo del WIP sono le seguenti:

$\alpha$  = tempo di attraversamento medio standard del sistema [giorni];

$\alpha_i$  = tempo di attraversamento standard del lotto i-esimo [giorni];

$m_i$  = valore standard del materiale del lotto i-esimo (materia prima grezza) [lire/lotto];

$\bar{\alpha}_i$  = tempo di attraversamento effettivo del lotto i-esimo [giorni];

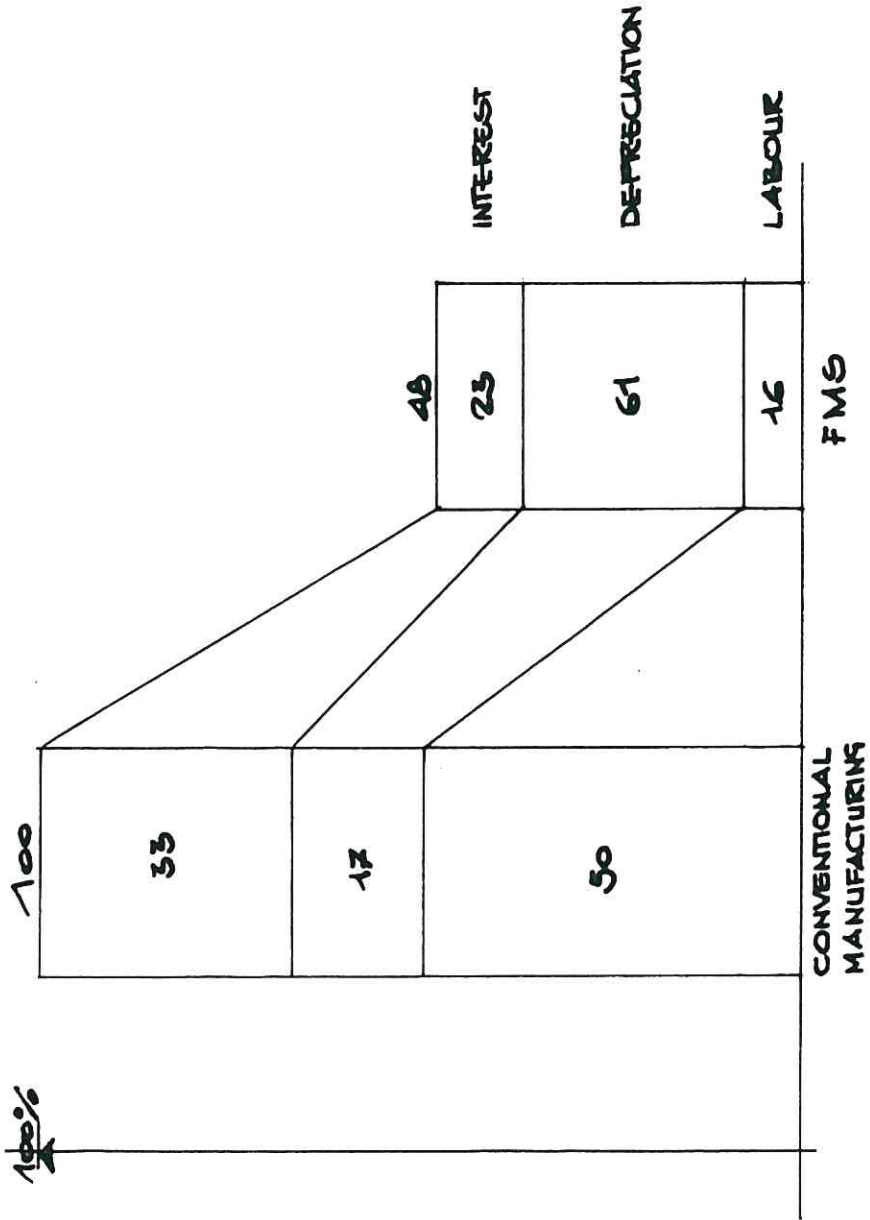


Fig. 7.1 Composizione dei costi del valore aggiunto di produzione  
 Fonte: Boston Consulting Group, 1985, op. cit.

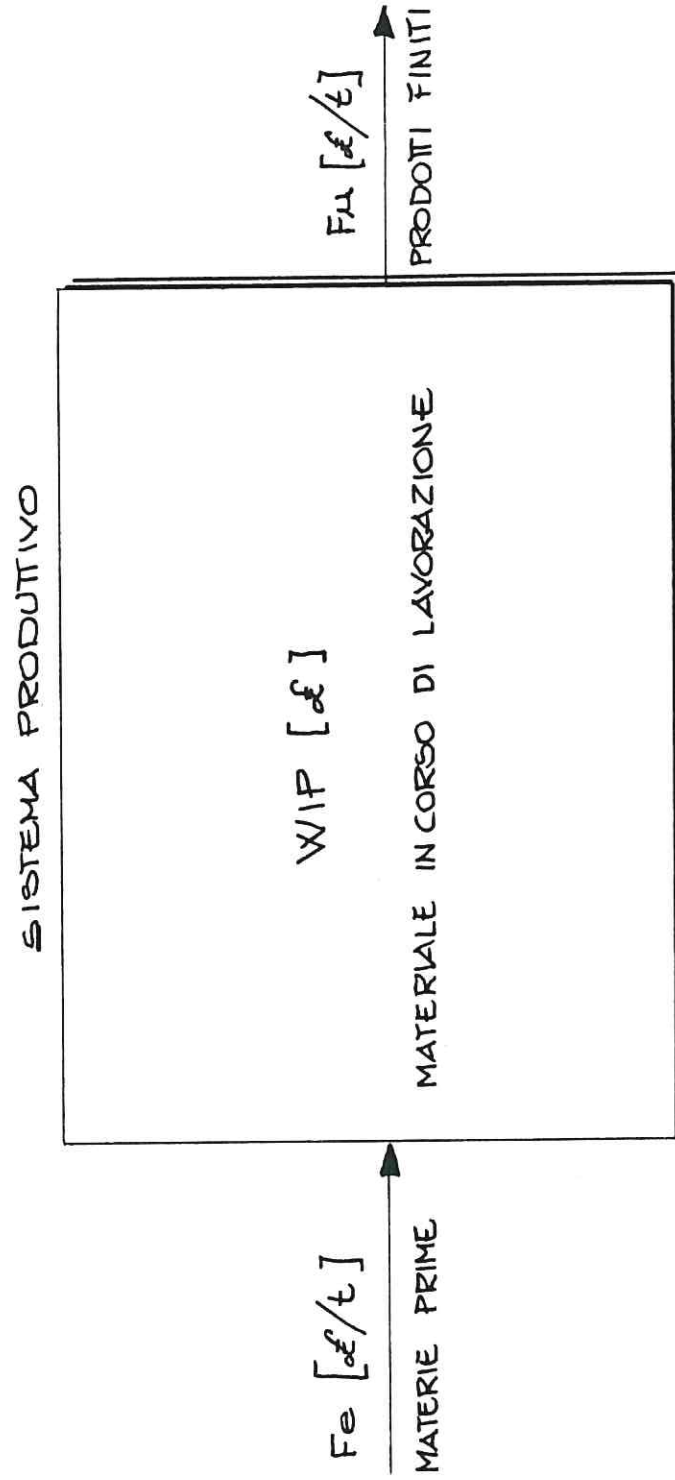


Fig.7.2 - Schematizzazione del sistema produttivo

$\bar{m}_i$  = valore effettivo del materiale del lotto i-esimo (materia prima grezza) [lire/lotto];

$\bar{\ell}_i$  = valore effettivo dei costi diretti (manodopera, ecc.) imputabili a quel lotto [lire/lotto];

$F_e$  = flusso entrante nel sistema nel mese [lire/mese];

$F_u$  = flusso uscente del sistema nel mese [lire/mese].

La valorizzazione di  $F_e$  è in lire/mese dal momento che si riferisce al valore dei materiali entranti nel sistema produttivo in un mese sotto forma di materia prima grezza; quella di  $F_u$  è analoga perché è connessa al valore dei prodotti finiti uscenti dal sistema in un mese.  $F_u$  pertanto è pari al valore della materia prima grezza uscita nel mese, maggiorata del costo della manodopera e degli altri costi imputabili direttamente ai prodotti.

Tali costi nel seguito saranno considerati compresi nel costo della manodopera che pertanto dovrà essere intesa come insieme di tutti i costi diretti.

### 7.2.2. Il metodo basato sui valori mensili globali di ingresso.

Questo metodo presuppone una rilevazione dei dati economici effettivi mensili di ingresso nel sistema produttivo. Si ponga:

$\bar{G}$  = numero effettivo di giorni lavorativi nel mese [giorni/mese];

$E$  = numero di lotti effettivamente entrati nel sistema produttivo nel mese [lotti];

$u$  = numero di lotti effettivamente usciti dal sistema produttivo nel mese [lotti];

$M_e$  = valore di tutti i materiali dei lotti effettivamente entrati nel sistema produttivo nel mese [lire/mese];

$M_u$  = valore di tutti i materiali dei lotti effettivamente usciti nel sistema produttivo nel mese [lire/mese];

$L$  = costi diretti totali effettivamente sostenuti nel mese [lire/mese];

$l_{av_j}$  = costi diretti effettivamente sostenuti nel giorno j-esimo del mese [lire/giorno].

Il simbolo «lav» sta per lavoro; si ricordi che tutti i costi diretti sono inglobati nel costo del lavoro (manodopera).

Possiamo allora scrivere, per il mese che stiamo considerando:

$$M = M_e = \sum_{i=1}^E \overline{m}_i$$

$$M_u = \sum_{i=1}^u \overline{m}_i$$

$$L = \sum_{j=1}^{\overline{q}} \overline{\text{lav}}_j$$

$$F_e = M = M_e$$

$$F_u = M_u + \sum_{i=1}^u \overline{l}_i$$

Introducendo queste due approssimazioni:

$$M = M_e = M_u \quad [ \text{lire} / \text{mese} ]$$

$$L = \sum_{j=1}^{\overline{q}} \overline{\text{lav}}_j = \sum_{i=1}^u \overline{l}_i \quad [ \text{lire} / \text{mese} ]$$

possiamo scrivere:

$$F_e = M_e = M \quad [\text{lire/mese}]$$

$$F_u = M_u + \sum_{i=1}^u \bar{l}_i$$

$$F_u = M_u + \sum_{j=1}^{\bar{q}} \frac{\bar{l}_{av}}{j}$$

$$F_u = M + L \quad [\text{lire/mese}]$$

Ipotizzando infine (terza approssimazione) una linearità nel tempo della crescita del valore del materiale in corso di lavorazione (vedi fig. 7.3.), la stima del WIP nel mese che si sta considerando è:

$$WIP = \frac{F_e + F_u}{2} \frac{a}{G} \quad [\text{lire}]$$

$$WIP = \left( M + \frac{L}{2} \right) \frac{a}{G} \quad [\text{lire}] \quad [1]$$

La formula [1] esprime una stima del WIP e non il WIP effettivo, perché si basa su tre approssimazioni; infatti:

- si è ipotizzato che il flusso entrante nel mese in termini di materie prime sia uguale al valore delle materie prime uscenti, sottoforma di prodotti finiti nello stesso mese ( $M_e = M_u$ ); ciò non è vero in linea di principio perché i lotti entrati nel mese possono differire anche di molto da quelli usciti per quanto riguarda il valore delle materie prime;



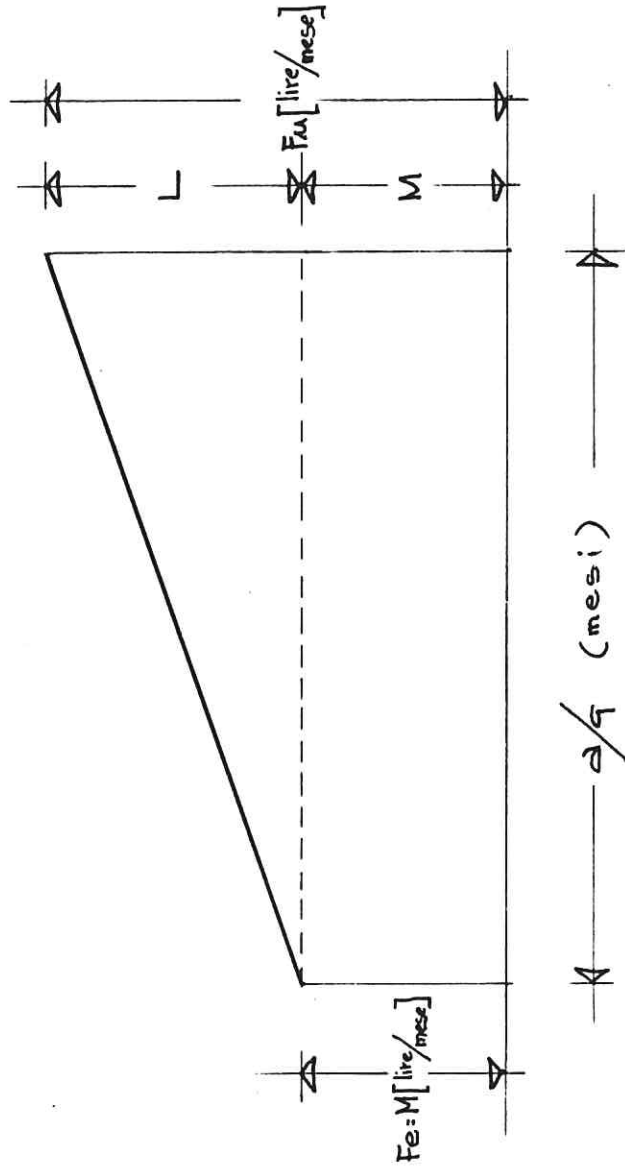


Fig. 7.3. Rappresentazione grafica del WIP

- si è posto che il lavoro effettivamente svolto nel mese sia uguale al lavoro «assorbito» dai lotti di prodotti finiti effettivamente usciti nel mese

$$\left( \sum_{j=1}^G \overline{lav}_j = \sum_{i=1}^u \bar{l} \right);$$

anche in questo caso si tratta di una semplificazione: il lavoro svolto nel mese non coincide con il valore del lavoro attribuibile ai lotti di prodotti finiti usciti dal sistema produttivo nel mese;

- infine si è ipotizzato che l'aumento del valore del materiale in corso di lavorazione sia lineare nel tempo; ciò ovviamente può considerarsi valido solo in prima approssimazione.

L'area sottesa dal trapezio di fig. 7.3. rappresenta il WIP perché il flusso medio (media aritmetica tra entrante e uscente) moltiplicato per il tempo standard di attraversamento (cioè di presenza nel sistema) è proprio una misura della quantità di lire mediamente presente nel sistema durante il mese.

Se quindi, grazie alle procedure di contenibilità industriale, si conoscono i valori effettivi M ed L di un certo mese e se «a» è stimato con sufficiente approssimazione, la formula [1] consente una rapida stima del valore assunto dal WIP come valore medio mensile.

### 7.2.3. I metodi basati sui valori di singoli lotti di uscita.

In questo caso si suppone che esista una rilevazione che permetta di conoscere quali siano i lotti effettivamente usciti dal sistema nel mese in esame. Si ritengono conosciuti inoltre tutti i dati standard relativi all'i-esimo lotto quali:  $a_i$ ,  $m_i$ ,  $l_i$ .

Il contributo al valor medio mensile del WIP dovuto all'i-esimo lotto che è uscito dal sistema in quel mese è:

$$WIP_i = \left( m_i + \frac{l_i}{2} \right) \cdot \frac{a_i}{G}$$

e ciò per lo stesso motivo visto precedentemente. Pertanto la stima del WIP per il mese considerato è:

$$WIP = \sum_{i=1}^u \left( m_i + \frac{l_i}{2} \right) \cdot \frac{a_i}{G} \quad [2]$$

Se si suppone di conoscere anche  $\bar{a}_i$ , ossia il tempo di attraversamento effettivo dei lotti in uscita, è possibile ottenere una terza formula di stima:

$$WIP = \sum_{i=1}^n \left( m_i + \frac{l_i}{2} \right) \frac{\bar{a}_i}{G} \quad [3]$$

Questi primi tre metodi visti, sinteticamente richiamabili con le formule [1], [2] e [3], sono certamente analoghi con le seguenti differenze pratiche:

- il primo metodo:
  - si basa sulla rilevazione mensile delle «entrate» globali M e L;
  - considera M e L che sono valori effettivi;
  - considera la grandezza «a» che è uno standard medio valido per l'insieme dei lotti che entrano nel sistema produttivo;
- il secondo metodo:
  - si basa sulla rilevazione mensile dei lotti usciti;
  - considera per ciascun lotto i parametri  $a_i$ ,  $m_i$ ,  $l_i$ , che sono dei valori standard (e quelli effettivi possono anche non coincidere con gli standard);
- infine il terzo metodo:
  - si basa, come il secondo, sulla rilevazione mensile dei lotti usciti;
  - considera per ciascun lotto i parametri standard  $m_i$ ,  $l_i$  ed il parametro effettivo  $\bar{a}_i$ .

#### 7.2.4. Il metodo «misto».

Questo metodo è detto misto perché utilizza sia le «entrate» mensili globali M e L effettive, che i parametri  $m_i$  e  $l_i$  standard dei lotti usciti nel

mese. Inoltre presuppone la conoscenza del WIP del mese precedente.

Il metodo calcola il WIP del mese sommando al valore del WIP del mese precedente il valore delle materie prime effettivamente entrate nel mese, il valore dei costi di manodopera effettivamente sostenuti nel mese e sottraendo il costo totale dei lotti di prodotti finiti usciti nel mese valorizzati a standard.

La formula di stima del WIP nel mese corrente è data da:

$$WIP_{\text{mese}} = WIP_{\text{mese-1}} + \sum_{i=1}^E \overline{m}_i + \sum_{j=1}^G \overline{law}_j - \sum_{i=1}^u (m_i + l_i)$$

$$WIP_{\text{mese}} = WIP_{\text{mese-1}} + M + L - \sum_{i=1}^u (m_i + l_i) \quad [4]$$

in pratica questo metodo:

- si basa come il primo sulla rilevazione mensile delle «entrate» globali M e L, e come il secondo ed il terzo sulla rilevazione mensile dei lotti usciti;
- considera M e L che sono dei valori effettivi, e i parametri standard  $m_i$  ed  $l_i$  di ciascun lotto;
- presuppone la stima del WIP del mese precedente.

### 7.2.5. L'inventario mensile quale «metodo» di stima.

L'inventario mensile non può realisticamente essere considerato una alternativa praticabile in azienda per il controllo periodico del capitale circolante a causa della sua estrema onerosità. Abbiamo comunque voluto inserirlo quale ultimo «metodo» di stima del WIP perché anche chi, per particolari motivi, procedesse ad un inventario mensile del materiale in corso di lavorazione commetterebbe un errore di stima. Ciò è dovuto al fatto che il WIP «vero» mensile è un valor medio nel mese del WIP giornaliero, mentre il WIP a fine mese è un valore puntuale che può differire anche di molto dal valor medio.

In fig. 7.4. è rappresentato graficamente quanto detto. L'errore che si compie è funzione ovviamente dell'entità dello scostamento tra il valore del WIP medio mensile (= vero) e quello del WIP a fine mese (= WIP stimato).

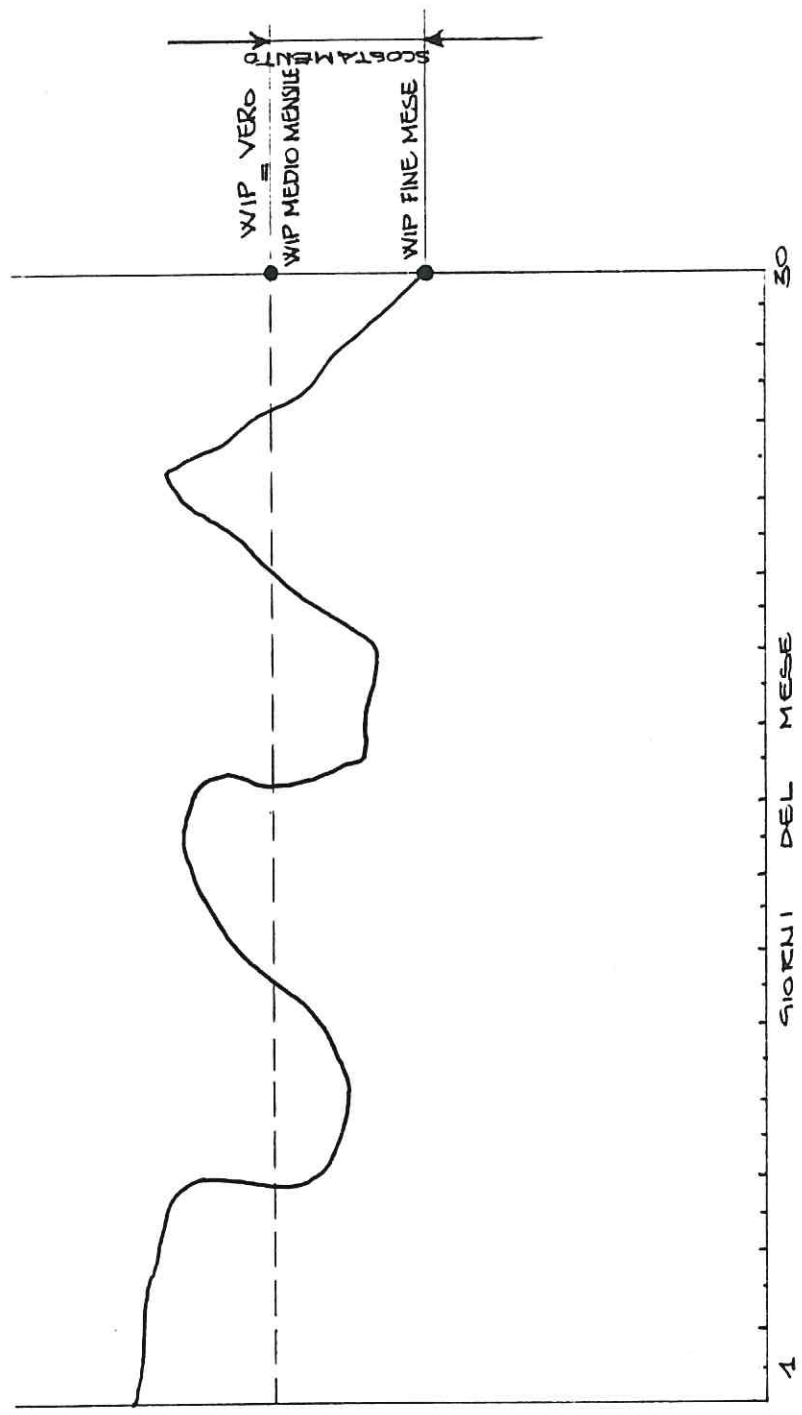


Fig. 7.4 - WIP medio mensile e WIP rilevato a fine mese

Il valore del WIP a fine mese deriva da procedure inventariali della contabilità industriale e pertanto non richiede la conoscenza di valori effettivi mensili quali  $M$  o  $L$ , o valori di parametri effettivi di lotto quali  $\bar{m}_i$ ; o  $I_i$ . Per raggiungere i nostri obiettivi di confronto tra le diverse metodologie di stima è stato comunque necessario esprimere analiticamente il WIP calcolato tramite inventario mensile utilizzando i parametri appena detti.

In formula il calcolo dell'inventario mensile può essere infatti così espresso:

$$WIP_{\text{mese}} = WIP_{\text{mese-1}} + \sum_{i=1}^E \bar{m}_i + \sum_{j=1}^u \overline{law}_j - \sum_{i=1}^u (\bar{m}_i + \bar{l}_i)$$

$$WIP_{\text{mese}} = WIP_{\text{mese-1}} + M + L - \sum_{i=1}^u (\bar{m}_i + \bar{l}_i) \quad [5]$$

Cioè il valore del WIP a fine mese, individuato in realtà da procedure di inventario mensile, può essere posto uguale al valore del WIP effettivo del mese precedente, aumentato del valore dei costi di manodopera effettivamente sostenuti, e diminuito del costo effettivo dei prodotti finiti usciti nel mese.

È possibile sin d'ora notare come la formula [5] si differenzi dalla [4] solo perché utilizza i valori consuntivi di lotto  $\bar{m}_i$  e  $I_i$ , anziché i corrispondenti standard  $m_i$  e  $l_i$ .

#### 7.2.6. Il WIP «vero» mensile.

Abbiamo già detto che il WIP «vero» mensile, ossia il valore del materiale in corso di lavorazione mediamente presente nel mese all'interno del sistema produttivo, può essere a ragione considerato come la media nel mese della «variabile» WIP giornaliero.

Per poter quindi esprimere analiticamente il WIP vero mensile è prima necessario esplicitare mediante formula il valore del WIP giornaliero.

Possiamo porre il WIP alla fine del generico giorno  $j$  del mese come uguale a quello della fine del giorno precedente, aumentando di

— costi effettivi delle materie prime dei lotti entrati nel giorno j

$$\left( \sum_1 \bar{m}_i \right);$$

— costi diretti totali (manodopera) effettivamente sostenuti nel giorno j

$$\left( \bar{law}_j \right);$$

e diminuito di:

— costi totali dei lotti usciti nel giorno j  $\left( \sum_2 \left( \bar{m}_i + \bar{l}_i \right) \right)$

in formula:

$$WIP_j = WIP_{j-1} + \sum_1 \bar{m}_i + \bar{law}_j - \sum_2 \left( \bar{m}_i + \bar{l}_i \right)$$

A questo punto è possibile ricavare sempre in formula il valore del WIP medio mensile ossia del WIP «vero»:

$$WIP_{vero} = \frac{\sum_{j=1}^G WIP_j}{G} \quad [6]$$

### 7.2.7. Modalità di calcolo dell'errore di stima.

Per poter individuare tra le diverse metodologie proposte quella che approssima il WIP in modo migliore è stato necessario definire, in via preliminare, le modalità di calcolo dell'errore di stima.

A partire dalla definizione di MAD (deviazione media assoluta) si è assunta quale formula di calcolo dell'errore la seguente:

$$ERRORE = \frac{\sum_{i=1}^{MM} \frac{|WIP_{STIMATO_j} - WIP_{VERO_j}|}{WIP_{STIMATO_j}}}{MM} \quad [7]$$

dove  $WIP\ STIMATO_s$  = valore calcolato mediante la formula del metodo adottato nel mese generico  $s$ ;

$WIP\ VERO_s$  = valore calcolato mediante la formula [6] nel mese generico  $s$ ;

$MM$  = numero totale di mesi nel periodo considerato (uno o più anni).

### **7.2.8. Onerosità delle diverse metodologie di stima.**

In tab. 7.1. sono riportati i parametri richiesti da ciascuna metodologia per la stima del materiale in corso di lavorazione.

Da un esame comparato dei dati di tabella è possibile fin d'ora classificare le varie metodologie sulla base della loro diversa onerosità, cioè sulla base dei costi in termini di persone e mezzi da sostituire per la rilevazione dei parametri richiesti.

In linea generale i costi hanno un andamento crescente passando nell'ordine dalla metodologia [1] alla metodologia [5].

Il primo metodo richiede una stima del tempo medio di attraversamento del sistema ( $a$ ), la rilevazione dei costi di materie prime effettivamente entrate nel sistema produttivo ( $M$ ) e la rilevazione dei costi di manodopera (comprensiva di tutti i costi diretti) sostenuti nel mese ( $L$ ).

Il secondo metodo invece richiede la definizione per ogni lotto che transita nel sistema produttivo, dei dati standard  $a_i$ ,  $m_i$ ,  $l_i$  e quindi in ultima analisi necessita di dati la cui disponibilità è più costosa rispetto a quella del metodo precedente.

La terza metodologia di stima differisce dalla seconda per la rilevazione del dato consuntivo di lotto  $\bar{a}_i$  rispetto alla definizione dello standard  $a_i$ ; è questo il motivo che determina la maggiore onerosità del terzo metodo rispetto al secondo.

Per quanto riguarda il quarto metodo, la sua applicabilità richiede sia i valori globali di ingresso  $M$  ed  $L$ , che i dati standard dei lotti in uscita  $m_i$  ed  $l_i$ ; il maggior costo di questo metodo rispetto ai precedenti è pertanto evidente.

Infine gli impegni di risorse derivanti da una procedura di inventario mensile pongono questo ultimo «metodo» di stima sicuramente al primo posto nella classifica dei costi.

Quanto sopra detto deve ritenersi valido a livello generale: possono in realtà riscontrarsi dei contesti aziendali in cui il reciproco posizionamento delle metodologie di stima rispetto ai costi è diverso rispetto a quello descritto.

Ciò che a noi preme aver sottolineato è il differente costo che ogni metodologia di stima comporta. Infatti a livello aziendale la scelta di una



		PARAMETRI RICHIESTI		
FORMULA DI STIMA DEL WIP		ATTRAVERSAMENTO	COSTI MATERIE PRIME	COSTI DIRETTI (LAVORO)
1	$(M + \frac{L}{2}) \frac{a}{q}$	a	$M = \sum_{i=1}^n \bar{m}_i$	$L = \sum_{j=1}^5 \bar{l}_{avj}$
2	$\frac{1}{q} \sum_{i=1}^n (m_i + \frac{l_i}{2}) a_i$	a <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	l <sub>i</sub>
3	$\frac{1}{q} \sum_{i=1}^n (m_i + \frac{l_i}{2}) \bar{a}_i$	$\bar{a}_i$	m <sub>i</sub>	l <sub>i</sub>
4	$WIP_{mese-1} + M + L - \sum_{i=1}^n (m_i + l_i)$	—	$M = \sum_{i=1}^n \bar{m}_i$ m <sub>i</sub>	$L = \sum_{j=1}^5 \bar{l}_{avj}$ l <sub>i</sub>
5	$WIP_{mese-1} + M + L - \sum_{i=1}^n (\bar{m}_i + \bar{l}_i)$	INVENTARIO MENSILE		

Tab. 7.1 - Parametri richiesti dalle metodologie di stima

metodologia rispetto ad un'altra è basata sul rapporto costo-prestazioni, e cioè sui valori assunti dalle seguenti grandezze:

- livello di approssimazione raggiunto dalla metodologia nella stima del WIP (prestazioni);
- costi da sostenere per l'applicazione del metodo.

### **7.3. Impostazione teorica del problema**

#### **7.3.1. Il modello di job-shop.**

Per realizzare il confronto tra le varie metodologie proposte per la stima del WIP è stato necessario sviluppare un modello di simulazione.

L'obiettivo di effettuare tale confronto in diversi contesti produttivi, ossia al variare delle condizioni operative, ha reso necessario la definizione di un modello di job-shop completamente parametrico da cui derivare successivamente un modello di simulazione anch'esso parametrico.

Solo in questo modo è stato infatti possibile raggiungere l'obiettivo posto inizialmente di verificare l'esistenza di particolari «condizioni» che rendono le stime più o meno approssimate.

#### *Un esempio numerico*

Per maggior chiarezza espositiva riteniamo opportuno riferirci ad un caso che viene esemplificato tramite i suoi valori caratteristici. Il passo successivo sarà quello di giungere ad un modello generale.

L'esempio è tratto da Corke<sup>4</sup> e ripreso da Da Villa<sup>5</sup>. Si consideri una officina meccanica che costruisce componenti destinati ad una fase di montaggio. I dati caratteristici dell'officina sono:

- numero di differenti componenti che costituiscono la gamma dei codici lavorati in officina : 4000 codici
  
- numero dei centri di lavorazione : 60 centri

---

<sup>4</sup> D. CORKE, *Production Control is Management*, E. Arnold, 1969.

<sup>5</sup> F. DA VILLA, *op. cit.*, pag. 161-173.

- cicli di lavorazione: tutti diversi l'uno dall'altro
- numero medio di operazioni di un ciclo : 6 operazioni
- campo di variazione del numero di operazioni per ciclo : da 2 a 20 operazioni
- durata media di una operazione : 6 ore
- flusso medio di ingresso/uscita : 40 lotti/giorno
- WIP medio : 800 lotti pari a 1000 milioni di lire
- tempo medio di attraversamento :  $800 \text{ lotti} / 40 \text{ lotti/giorno} = 20 \text{ giorni}$
- numero medio di operazioni eseguite in un giorno : 240 operazioni/giorno;  $(6 \text{ operazioni/lotto} \times 40 \text{ lotti/giorno})$
- numero medio di operazioni eseguite su un lotto in un giorno : 0,3 operazioni/lotto giorno;  $(6 \text{ operazioni per lotto in media eseguite mediamente in } 20 \text{ giorni})$
- numero di operazioni relative ai lotti che costituiscono il WIP  $(800 \text{ lotti} \times 6 \text{ operazioni/lotto})$  : 4800 operazioni
- numero di operazioni mediamente già eseguite in ogni istante: 50% (il lotto «medio» del WIP ha 50% di operazioni fatte e 50% da fare) cioè 2400 operazioni
- tempo di attraversamento del lotto con ciclo più breve:  $2 \text{ operaz.} / 0,3 \text{ operaz./giorno} = 6,6 \text{ giorni}$

- tempo di attraversamento del lotto con ciclo più lungo: 20 operaz./0,3 operaz./giorno = 66,6 giorni
- capacità produttiva giornaliera (240 operaz./giorno : 8 ore/giorno) : 1140 ore macchina/giorno
- numero macchine (1140 ore macchina/giorno : 8 ore/giorno)
- numero medio di macchine per centro di lavorazione (180 macchine/60 centri) : 3 macchine

Vale la pena di precisare che per durata media di una operazione ( $t = 6$  ore) si intende la somma del tempo di preparazione ( $t_p$ ) e del prodotto del tempo unitario di lavorazione ( $t_u$ ) per la numerosità del lotto ( $\eta$ ), cioè vale la seguente relazione:

$$t = t_p + \eta t_u$$

*Il «numero di operazioni per lotto e per giorno»*

Una particolare attenzione merita il parametro «numero di operazioni per lotto e per giorno» indicato con  $X$ . Specifici approfondimenti sull'argomento si trovano in Corke e Da Villa. Brevemente possiamo dire che la  $X$  è una caratteristica di ciascun sistema produttivo.

Nei casi realmente osservati tale parametro assume valori che oscillano tra 0,2 e 0,4<sup>6</sup>.

Se poniamo:

$n$  = numero medio di operazioni di un lotto [operazioni/lotto]

$a$  = tempo di attraversamento medio del sistema [giorni]

è possibile scrivere:

$$X = \frac{\text{N}^\circ \text{OPERAZIONI/LOTTO}}{\text{GIORNI DI ATTRAVERSAMENTO}} = \frac{n}{a} \quad [\text{operazioni/lotto giorno}]$$

<sup>6</sup> D. CORKE, *op. cit.*, pag. 210 e segg.

Nell'esempio considerato è  $X = 6/20 = 0,3$

Un'altra possibile definizione della  $X$ , emersa durante la ricerca, è la seguente:

$$X = \frac{\text{OPERAZIONI ESEGUITE/GIORNO}}{\text{LOTTI PRESENTI}} \quad [\text{operazioni/lotto giorno}]$$

Utilizzando i dati dello stesso esempio si ha:  $X = 240/800 = 0,3$

In pratica la  $X$  rappresenta il numero medio di operazioni eseguite su un lotto in un giorno; ad esempio un valore di  $X$  pari a 0,25 significa che ogni lotto subisce mediamente una operazione ogni quattro giorni. Invertendo la relazione della  $X$  e scrivendola a livello di lotto  $i$ -esimo otteniamo:

$$a_i = \frac{n_i}{X}$$

Quest'ultima formula sta ad indicare che i giorni di attraversamento standard di un lotto  $i$ -esimo sono funzione di  $n_i$ , ossia del numero di operazioni a cui deve essere sottoposto il particolare lotto  $i$ -esimo, e della  $X$ , ossia del numero di operazioni per lotto e per giorno, che come detto pocanzi è un valore caratteristico di ogni job-shop. Sia dato ad esempio  $X = 0,25$ :

se  $n_i = 2$  ne consegue che  $a_i = 2/0,25 = 8$  giorni

se  $n_i = 6$  ne consegue che  $a_i = 6/0,25 = 24$  giorni

se  $n_i = 10$  ne consegue che  $a_i = 10/0,25 = 40$  giorni

Il parametro  $X$  è quindi di estrema utilità in programmazione della produzione per la determinazione degli attraversamenti standard dei singoli lotti in funzione del numero di operazioni.

Vogliamo infine evidenziare come possa essere definito un valore minimo teorico per la  $X$ ; nel caso di  $n = 1$  si ha:

$$X_{\text{MIN. TEORICA}} = 1/a$$

## Il modello generale

### Descrizione a livello aggregato

Ai nostri scopi ogni sistema produttivo può essere descritto, a livello aggregato, in funzione dei valori assunti dai seguenti parametri:

- $a$  = tempo di attraversamento medio del sistema [giorni];  
 $m$  = valore medio del materiale dei lotti [lire/lotto];  
 $l$  = valore medio dei costi diretti (manodopera, ammortamento, ecc.) imputabile ai lotti [lire/lotto];  
 $n$  = numero medio di operazioni di un lotto [operazioni/lotto];  
 $X = m/a$  = numero medio di operazioni eseguite su un lotto in un giorno [operazioni/lotto giorno];  
 $\lambda = l/m$  = valore medio dei costi diretti (manodopera, ammortamento, ecc.) imputabile ad ogni operazione di un lotto [lire/operazione];  
 $\Delta T$  = intervallo medio di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo di un lotto ed un altro [giorni/lotto];  
 $G$  = numero medio di giorni lavorativi nel mese [giorni/mese];  
 $G/\Delta T$  = numero medio di lotti entranti uscenti nel mese [lotti/mese];  
 $\omega/\Delta T$  = numero medio di lotti presenti nel sistema produttivo [lotti];  
 $l/\Delta T$  = valore medio dei costi diretti (manodopera, ammortamento, ecc.) da imputare giornalmente [lire/giorno];  
 $m/\Delta T$  = numero medio di operazioni eseguite in un giorno [operazioni/giorno].

È opportuno precisare che:

- la grandezza  $G$  = numero medio di giorni lavorativi nel mese, utile nella definizione di altre grandezze, non è in realtà un parametro perché è un'invariante rispetto al sistema produttivo;
- il reciproco del parametro  $\Delta T$  non è altro che il flusso entrante, ossia il numero di lotti entranti mediamente in un giorno nel sistema produttivo, dimensionalmente infatti la sua unità di misura è [lotti/giorno];
- la grandezza  $l$  è ottenibile come prodotto dei fattori:
  - numero medio di ore di lavorazione per lotto;
  - costo orario di lavorazione comprensivo di tutti gli oneri imputabili ai prodotti: ammortamento impianti, manodopera, ecc.

Nell'ipotesi che il costo orario di lavorazione sia unitario  $l$  coincide numericamente con il tempo ciclo di lavorazione del lotto [ore/lotto];

- il rapporto  $l/\Delta T$  rappresenta la capacità produttiva del sistema espressa in [lire/giorno] anziché in [ore/giorno]; e ciò per il fatto che l'unità di misura di  $l$  è [lire/lotto].

I valori dei parametri sopra definiti non sono tra loro indipendenti essendo alcuni calcolati in funzione di altri.

È facilmente verificabile che a livello aggregato un job-shop può essere descritto in funzione di cinque parametri tra loro indipendenti. Successivamente si sono assunti come parametri indipendenti a livello aggregato:  $a, m, l, \Delta T, X$ , ricavando in particolare i parametri  $n$  e  $\lambda$  delle relazioni:

$$n = a \times \quad \lambda = l / a \times$$

Lo stesso work in process (WIP) può essere espresso in funzione dei parametri assunti come indipendenti. Se si utilizza il metodo dei valori mensili globali di ingresso la stima del WIP è data da:

$$WIP = \left( M + \frac{L}{2} \right) \cdot \frac{a}{\bar{G}} \quad [1]$$

dove

$M$  = valore dei materiali dei lotti effettivamente entrati nel sistema produttivo nel mese [lire/mese]

$L$  = costi diretti totali effettivamente sostenuti nel mese [lire/mese]

$\bar{G}$  = numero effettivo di giorni lavorativi nel mese [giorni/mese]

In media possiamo porre:

$$\bar{G} = G$$

$$L = G \cdot \frac{l}{\Delta T}$$

$$M = \frac{G}{\Delta T} \cdot m$$

da cui sostituendo in [1] si ottiene:

$$WIP = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) \quad [8]$$

Formule come quest'ultima sono ricavabili anche per le altre quattro metodologie di stima (vedi paragrafo successivo 7.3.3.).

La relazione [8] (vedi fig. 7.5.) sta a significare che il valore del materiale in corso di lavorazione è uguale al prodotto di

- $a/\Delta T$ , ossia del numero di lotti mediamente presenti nel sistema;
- $(m + l/2)$ , ossia della somma del valore delle materie prime e della metà dei costi diretti del lotto medio; mediamente ogni lotto ha un 50% di costi già assorbiti e un 50% di costi da assorbire.

Sia in fig. 7.3. derivante da [1] che in fig. 7.5. derivante da [8] l'area del trapezio rappresenta il WIP. Nel primo caso si moltiplica un flusso ( $M = L/2$ ) per un tempo ( $a/\bar{G}$ ), nel secondo una quantità ( $m = l/2$ ) per un numero puro ( $a/\Delta T$ ): sono due modi alternativi di rappresentare lo stesso fenomeno.

Sempre grazie alle relazioni formulate è facilmente ricavabile analiticamente la coincidenza delle due definizioni del parametro X dato al paragrafo precedente. Infatti è:

$$X = \frac{\text{N° OPERAZIONI/LOTTO}}{\text{GIORNI ATTRAVERSAMENTO}} = \frac{m}{a}$$

$$X = \frac{\text{OPERAZIONI ESEGUITE/GIORNO}}{\text{LOTTI PRESENTI}} = \frac{m/\Delta T}{a/\Delta T} = \frac{m}{a}$$



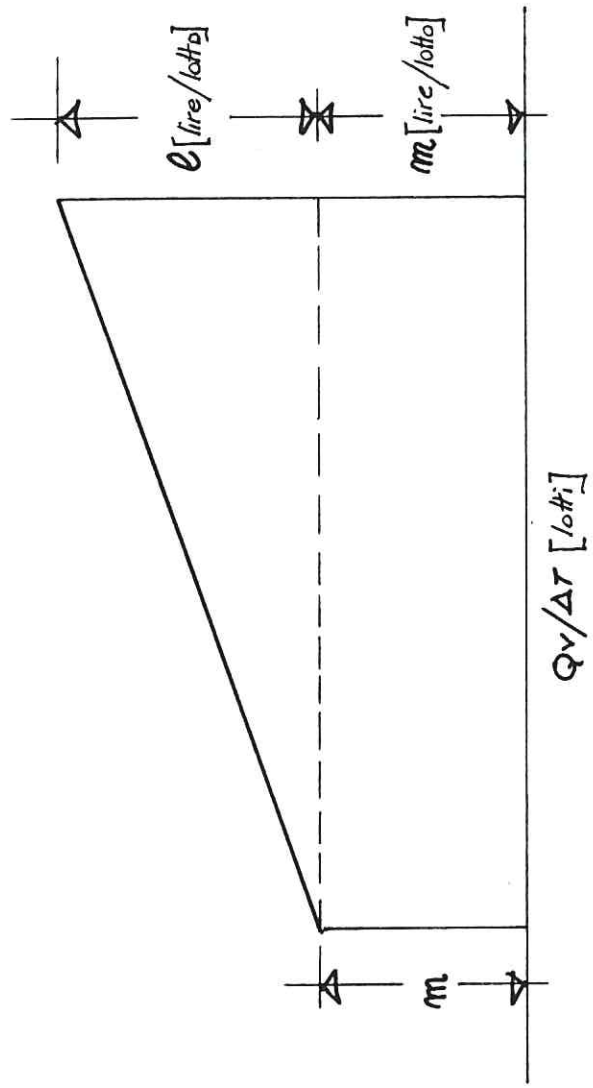


Fig. 7.5 - Altra rappresentazione grafica del VVP

Con riferimento all'esempio numerico precedente, si può facilmente dimostrare come a partire dai valori attribuiti ai cinque parametri indipendenti siano ricavabili tutte le grandezze numeriche del caso descritto. Se poniamo:

$$\begin{aligned} a &= 20 \text{ [giorni]} \\ m &= 1,07 \text{ [milioni/lotto]} \\ l &= 0,36 \text{ [milioni/lotto]} \text{ ovvero } l = 36 \text{ [ore/lotto]} \\ \Delta T &= 0,025 \text{ [giorni/lotto]} \\ X &= 0,3 \text{ [operazioni/lotto giorno]} \end{aligned}$$

si può ottenere:

- numero medio di operazione per ciclo =  $n = ax = 6$  [operazioni]
- durata media di una operazione =  $\lambda = 1/n = 6$  [ore] ovvero 0,06 [milioni/operazione]
- flusso medio di ingresso /uscita =  $1/\Delta T = 40$  [lotti/giorno]
- numero medio di lotti presenti =  $a/\Delta T = 800$  [lotti]

$$WIP = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) = \frac{20}{0,025} \left( 1,07 + \frac{0,36}{2} \right) = 1000 \text{ [milioni]}$$

- numero medio di operazioni =  $n/\Delta T = 240$  [operazioni] eseguite in un giorno
- numero di operazioni relative ai lotti che costituiscono il WIP =  $na/\Delta T = 4800$  [operazioni]
- capacità produttiva giornaliera =  $1/\Delta T = 1140$  [ore/giorno]

#### *Descrizione a livello di lotto*

Se da un livello aggregato di descrizione scendiamo a livello dei singoli lotti, abbiamo che ogni lotto è rappresentato dai valori i-esimi assunti dai primi sette parametri tra quelli che precedentemente abbiamo utilizzato per descrivere il sistema produttivo nel suo insieme:

- $a_i$  = tempo di attraversamento standard del lotto i-esimo [giorni];
- $m_i$  = valore standard del materiale del lotto i-esimo [lire/lotto];
- $l_i$  = valore standard dei costi diretti (manodopera, ecc.) del lotto i-esimo [lire/lotto];

$n_i$  = numero di operazioni del lotto i-esimo [operazioni/lotto];

$X_i = \frac{m_i}{a_i}$  = numero standard di operazioni eseguite sul lotto i-esimo in un giorno [operazioni/lotto giorno];

$\lambda_i = \frac{l_i}{m_i}$  = valore standard di costi diretti (manodopera, ecc.) di operazione del lotto i-esimo [lire/operazione];

$\Delta T_i$  = intervallo di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo del lotto i-esimo ed il precedente [giorni/lotto].

In questo caso il numero di parametri indipendenti è quattro anziché cinque; infatti  $X_i = X$  per definizione:

$$X_i = \frac{m_i}{a_i} = \frac{m_i}{m_i/X} = X$$

Nel modello di simulazione si sono assunti come indipendenti:  $\Delta T_i$ ,  $n_i$ ,  $m_i$ ,  $\lambda_i$ , calcolando il valore dei rimanenti parametri dipendenti mediante le formule:

$$a_i = m_i/X$$

$$l_i = m_i \lambda_i$$

$$X_i \equiv X$$

Il valore di  $\Delta T_i$  permette di individuare in particolare il giorno di ingresso nel sistema del lotto i-esimo, mentre la data di uscita è ricavabile dalla data di ingresso aumentata dei giorni impiegati per l'attraversamento.

In in dato sistema produttivo una volta definiti:

- i valori medi di sistema
- i valori massimi e minimi assunti dai parametri indipendenti di lotto ossia:

- $\Delta T_{MIN}$ ,  $\Delta T_{MAX}$
- $m_{MIN}$ ,  $m_{MAX}$
- $m_{MIN}$ ,  $m_{MAX}$
- $\lambda_{MIN}$ ;  $\lambda_{MAX}$

è possibile verosimilmente ottenere i quattro valori specifici di ciascun lotto  $\Delta T$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\lambda$ , come valori delle variabili casuali discrete  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $K$ , con proprie funzioni di probabilità  $P(X)$ ,  $Q(Y)$ ,  $R(Z)$ ,  $S(K)$  e media:<sup>7</sup>

$$E(X) = \sum_i x_i p_i = \Delta T$$

$$E(Y) = \sum_i y_i q_i = m$$

$$E(Z) = \sum_i z_i r_i = m$$

$$E(K) = \sum_i k_i s_i = \lambda$$

dove  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  e  $K$  variano all'interno dei sottostanti range:

$$\Delta T_{MIN} \leq X \leq \Delta T_{MAX}$$

$$m_{MIN} \leq Y \leq m_{MAX}$$

$$m_{MIN} \leq Z \leq m_{MAX}$$

$$\lambda_{MIN} \leq K \leq \lambda_{MAX}$$

<sup>7</sup> B. MARTINOLI: *Guida alla simulazione*, Angeli, 1982, cap. 4.

Ogni lotto i-esimo resta completamente definito dagli ulteriori parametri rilevati a consuntivo:

$\bar{a}_i$  = tempo di attraversamento effettivo del lotto i-esimo [giorni];

$\bar{m}_i$  = valore effettivo del materiale del lotto i-esimo [lire/lotto];

$\bar{l}_i$  = valore effettivo dei costi diretti (manodopera, ecc.) del lotto i-esimo [lire/lotto].

Possiamo porre:

$$\bar{a}_i = \alpha_i a_i = \alpha_i m_i / x$$

$$\bar{m}_i = \beta_i m_i$$

$$\bar{l}_i = \gamma_i l_i = \gamma_i m_i \lambda_i$$

dove:

$\alpha_i$  = coefficiente di scostamento standard-consuntivo del lotto i-esimo relativo all'attraversamento;

$\beta_i$  = coefficiente di scostamento standard-consuntivo del lotto i-esimo relativo ai costi del materiale;

$\gamma_i$  = coefficiente di scostamento standard-consuntivo del lotto i-esimo relativo ai costi diretti (manodopera).

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  possono quindi considerarsi altri tre parametri indipendenti di lotto che vanno ad aggiungersi a  $\Delta T_i, n_i, m_i, \lambda_i$  per un totale di sette parametri indipendenti di lotto.

Prima di procedere oltre apriamo una breve parentesi sul coefficiente  $\alpha_i$ . Esso è definito come il rapporto tra i giorni di attraversamento consuntivo e i giorni di attraversamento standard per il generico lotto i-esimo;  $\alpha_i$  può ovviamente assumere valori maggiori o minori di 1.

Un  $\alpha_i > 1$  significa che il lotto ha impiegato un tempo di attraversamento maggiore di quello standard previsto e viceversa. Se in un certo arco di tempo (ad esempio un anno), sono transitati  $t$  numero totale di lotti nel sistema produttivo, non sarà:

$$\frac{\sum_{i=1}^t \lambda_i}{t} = 1$$

bensi sarà:

$$\frac{\sum_{i=1}^t 1/\lambda_i}{t} = 1$$

Tale ultima relazione è di seguito dimostrata:

$$X = \frac{m_i}{a_i} \equiv x_i$$

n. standard di operazioni per lotto e per giorno del lotto i-esimo

$$\frac{m_i}{a_i} = \bar{x}_i$$

n. consuntivo di operazioni per lotto e per giorno del lotto i-esimo

deve essere:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^t \bar{x}_i}{t} = \frac{\sum_{i=1}^t \frac{m_i}{a_i}}{t} = \frac{\sum_{i=1}^t x_i \frac{a_i}{a_i}}{t}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^t x_i \frac{1}{\alpha_i}}{t}$$

$$1 = \frac{\sum_{i=1}^t \frac{1}{\alpha_i}}{t} \quad \text{c. v. d.}$$

Tutto ciò concretamente sta a significare che se un lotto  $i$ -esimo accelera di  $\alpha_i$ , un altro lotto  $j$ -esimo decellera di  $\alpha_j$ , con la condizione:

$$\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_j} = 2$$

In termini più generali, se su un totale di  $t$  lotti che transitano in un arco definito di tempo nel sistema produttivo ne sono accelerati  $s$ , i rimanenti  $t-s$  sono decelerati con la seguente condizione:

$$\sum_{i=1}^s 1/\alpha_i + \sum_{j=s+1}^t 1/\alpha_j = t \quad \begin{array}{l} \alpha_i > 1 \\ 0 < \alpha_j < 1 \end{array}$$

e questo per le caratteristiche intrinseche del sistema produttivo job-shop.

Se dunque sono disponibili i valori massimi e minimi assunti da coefficienti  $\alpha, \beta, \gamma$  nel particolare sistema produttivo, ossia:

- $\alpha_{\min} = \frac{1}{\alpha_{\max}}$  ,  $\alpha_{\max} = \frac{1}{\alpha_{\min}}$
- $\beta_{\min}, \beta_{\max}$       •  $\gamma_{\min}, \gamma_{\max}$

è possibile anche questa volta ottenere verosimilmente i valori specifici di ciascun lotto  $\alpha_i = 1/\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$

come valori delle variabili casuali discrete  $Y1, Z1, K1$

con proprie funzioni di probabilità  $Q1(Y1), R1(Z1), S1(K1)$  e medie:

$$E(Y_1) = \sum_i Y_{1i} P_i^1 = 1$$

$$E(Z_1) = \sum_i Z_{1i} q_i^1 = 1$$

$$E(K_1) = \sum_i K_{1i} r_i^1 = 1$$

con  $Y_1, Z_1, K_1$  che variano all'interno dei sottostanti range:

$$\frac{1}{\alpha_{MAX}} = \delta_{MIN} \leq Y_1 \leq \delta_{MAX} = \frac{1}{\alpha_{MIN}}$$

$$\beta_{MIN} \leq Z_1 \leq \beta_{MAX}$$

$$\gamma_{MIN} \leq K_1 \leq \gamma_{MAX}$$

I valori consuntivi del lotto generico  $\bar{a}_i, \bar{m}_i, l_i$ , sono stati definiti come i prodotti dei rispettivi valori standard per i rispettivi coefficienti standard-consuntivo.

In realtà  $\bar{a}_i, \bar{m}_i, l_i$ , differiscono da  $a_i, m_i, l_i$  per i soli coefficienti  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ , a patto che gli stessi standard  $a_i, m_i, l_i$  siano stati definiti correttamente. Per tener conto di eventuali errori nella determinazione degli standard (si pensi ad esempio ad un aumento nei costi delle materie prime), è necessario pertanto introdurre degli ulteriori coefficienti correttivi degli stessi standard. Dal momento che a livello di lotto  $i$ -esimo si sono assunti come parametri indipendenti  $n_i, m_i, \lambda_i$ , sono stati definiti rispettivamente i seguenti coefficienti validi per tutti i lotti:

$$D_n = m_i \text{ vero} / m_i$$

$$D_m = m_i \text{ vero} / m_i$$

$$D_\lambda = \lambda_i \text{ vero} / \lambda_i$$

Il fenomeno rappresentato dalle relazioni sopra scritte è stato denominato «effetto derive», da cui la simbologia  $D$ . In ultima analisi i valori consuntivi  $\bar{a}_i, \bar{m}_i, l_i$  del lotto  $i$ -esimo sono così determinati:



$$\bar{a}_i = \alpha_i (m_i D_m) / x$$

$$\bar{m}_i = \beta_i (m_i D_m)$$

$$\bar{l}_i = \gamma_i (m_i D_m) (\lambda_i D_\lambda)$$

Alla fine le variabili grazie a cui è possibile definire tutte le caratteristiche dei lotti sono:

- i sette parametri indipendenti di lotto  $\Delta T_i, m_i, \mu_i, \lambda_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ;
- i tre coefficienti di deriva  $D_m, D_\mu, D_\lambda$

#### *I valori da definire*

In sintesi è possibile descrivere un job-shop se:

- si attribuiscono i valori ai cinque parametri indipendenti di sistema  $a, m, l, \Delta T, X$ ;
- si definiscono i limiti dei range di variazione dei sette parametri indipendenti di lotto

$$\Delta T_i, m_i, \mu_i, \lambda_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i:$$

$$\bullet \Delta T_{MAX}, \Delta T_{MIN}$$

$$\bullet \mu_{MAX}, \mu_{MIN}$$

$$\bullet m_{MAX}, m_{MIN}$$

$$\bullet \lambda_{MAX}, \lambda_{MIN}$$

$$\bullet \alpha_{MAX}, \alpha_{MIN}$$

$$\bullet \beta_{MAX}, \beta_{MIN}$$

$$\bullet \gamma_{MAX}, \gamma_{MIN}$$

e le rispettive funzioni di probabilità;

- si attribuiscono i valori ai tre coefficienti di deriva  $D_n, D_m, D_\lambda$ .

In particolare se si assume come funzione di probabilità per tutti i parametri indipendenti di lotto una distribuzione uniforme discreta si ha che:

$$\frac{\Delta T_{MAX} + \Delta T_{MIN}}{2} = \Delta T$$

$$\frac{m_{MAX} + m_{MIN}}{2} = m = a \times$$

$$\frac{\beta_{MAX} + \beta_{MIN}}{2} = 1$$

$$\frac{m_{MAX} + m_{MIN}}{2} = m$$

$$\frac{\gamma_{MAX} + \gamma_{MIN}}{2} = 1$$

$$\frac{\lambda_{MAX} + \lambda_{MIN}}{2} = \lambda = l/a \times$$

$$\frac{\alpha_{MAX} + \alpha_{MIN}}{2} = 1$$

### 7.3.2 I quesiti posti

Con riferimento al modello di job-shop appena descritto, i quesiti che ci siamo posti sono stati i seguenti:

— dato un determinato sistema produttivo caratterizzato dai valori medi  $a, m, l, \Delta T, X$  (parametri indipendenti di sistema), con  $n = aX$ ,  $\lambda = l/aX$ :

- come variano gli errori di stima all'aumentare della variabilità dei parametri indipendenti di lotto  $\Delta T, n, m, \lambda$ , attorno ai valori medi di sistema  $\Delta T, n, m, \lambda$ , ossia all'aumentare dei range di variazione:

$$\Delta T_{MAX} - \Delta T_{MIN},$$

$$m_{MAX} - m_{MIN},$$

$$n_{MAX} - n_{MIN},$$

$$\lambda_{MAX} - \lambda_{MIN} ?$$

- come variano gli errori di stima all'aumentare della variabilità dei parametri indipendenti di lotto  $\alpha_i = 1/a_i, \beta_i, \gamma_i$  (scostamenti standard-consuntivo), attorno al valor medio costante 1, ossia all'aumentare dei range di variazione:

$$\alpha_{MAX} - \alpha_{MIN},$$

$$\beta_{MAX} - \beta_{MIN},$$

$$\gamma_{MAX} - \gamma_{MIN} ?$$

- come variano gli errori di stima all'aumentare degli errori compiuti in fase di determinazione degli standard, ossia all'aumento dello scostamento del valore unitario di  $D_n$ ,  $D_m$ ,  $D$   $\lambda$  (effetto derive)?;
- come variano gli errori di stima al variare dei contesti produttivi, cioè al variare dei valori medi  $a$ ,  $m$ ,  $l$ ,  $\Delta T$ ,  $X$  che caratterizzano i diversi job-shops? o ponendo in altri termini la domanda: esistono particolari «condizioni» che rendono le stime più o meno approssimate?

### 7.3.3. Gli errori sistematici.

Durante lo svolgimento della ricerca è stata notata la presenza di errori sistematici. La causa di tali errori è stata individuata nella discontinuità del flusso entrante/uscente.

Infatti, in condizioni di costanza di tutti i parametri in gioco, gli errori di stima per tutte le formule risultano nulli, purché il flusso entrante/uscente non sia discontinuo. Abbiamo definito:

$\Delta T$  = intervallo medio di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo di un lotto ed un altro [giorni/lotto];

$1/\Delta T$  = numero medio di lotti entranti nel sistema produttivo [lotti/giorno].

Un esempio di flusso costante è dato da  $\Delta T = \text{cost.} = 1$  o  $0,5$ ; in tali casi si determina l'ingresso giornaliero di un numero costante di lotti: uno al giorno nel primo caso e due al giorno nel secondo.

Valori ad esempio di  $\Delta T = \text{cost.} = 2$  o  $0,75$  comportano viceversa una discontinuità nel flusso entrante/uscente: nel primo caso entra un lotto a giorni alterni, nel secondo entrano quattro lotti in tre giorni.

Nei casi  $\Delta T$  intero costante  $> 1$  e  $0 < \Delta T = \text{cost.} > 1$  è stato possibile giungere ad una formulazione analitica degli errori coincidenti con quelli ottenuti tramite il modello di simulazione.

#### **Errori sistematici dovuti a flussi in ingresso con $\Delta T$ intero costante maggiore di uno.**

Consideriamo un sistema produttivo in cui tutti i lotti sono caratterizzati da valori costanti pari a quelli medi di sistema:

$a = 12$  [giorni],

$$l = 36 \text{ [lire/lotto]},$$

$$m = 54 \text{ [lire/lotto]}$$

In tab. 7.2., per alcuni valori di  $\Delta T$ , è simulato il valore assunto dal WIP nei primi giorni di funzionamento del sistema. Nel calcolo si è ipotizzato che:

- il valore iniziale del materiale in corso di lavorazione sia pari al WIP medio  $WIP_{medio} = \frac{a}{\Delta T} (m + \frac{l}{2})$
- (vedi formula [8])
- la capacità produttiva del sistema, espressa ai nostri fini in [lire/giorno], sia pari a  $l/\Delta T$ ;
  - siano presenti inizialmente un numero di lotti pari a quello medio  $a/\Delta T$ ;
  - il primo lotto di prodotto finito esca dal sistema nella giornata iniziale.

È possibile notare come il WIP giornaliero assuma:

- nel caso di  $\Delta T = 1$ , un valore costante pari a quello medio;
- nel caso di  $\Delta T = 2$ , due valori costanti alternativamente;
- nel caso di  $\Delta T = 3$ , tre valori costanti secondo una sequenza ripetitiva.

In altre parole sono individuabili tanti «tipi giorno», indicati con TG, quanti il valore di  $\Delta T$  ( $1 \leq TG \leq \Delta T$ ); in ogni tipo giorno il WIP assume particolari valori.

Nell'esempio considerato:

— per $\Delta T = 1$	$TG=1$	$WIP = 864$
— per $\Delta T = 2$	$TG=1$	$WIP = 44$
	$TG=2$	$WIP = 432$
— per $\Delta T = 3$	$TG=1$	$WIP = 264$
	$TG=2$	$WIP = 276$
	$TG=3$	$WIP = 288$

$\Delta T = 1$					$\Delta T = 2$					$\Delta T = 3$				
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
0			90	864	0			90	132	0			90	288
1	54	36	90	864	1	54	18	90	114	1	54	12	90	264
2	54	36	90	864	2		18		132	2		12		276
3	.	.	.	.	3	54	18	90	114	3		12		288
4	.	.	.	.	4		18		132	4	54	12	90	264
5	.	.	.	.	5	54	18	90	114	5		12		276
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

(a) = n° progressivo dei giorni; (b) = valore delle materie prime in ingresso; (c) = valore dei costi diretti attribuiti nel giorno (capacità produttiva); (d) = valore dei prodotti finiti in uscita; (e) = valore del WIP.

Tab. 7.2 - Valori del WIP per valori diversi del  $\Delta T$

In formula possiamo scrivere che nel tipo giorno TG il WIP è dato da:

$$WIP_{\text{vero}} = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) - \frac{l}{\Delta T} (\Delta T - TG) \quad [9]$$

Riscriviamo ora la formula di calcolo del WIP vero mensile ricavata al precedente paragrafo 7.2.6 :

$$WIP_{\text{vero}} = \frac{\sum_{j=1}^G WIP_j}{G} \quad [6]$$

Poniamo che  $G$  = numero medio di giorni lavorativi nel mese sia costante per tutti i mesi (cioè  $G$  coincide con il corrispondente valore a consuntivo  $\bar{G}$ ).

Se definiamo:

$$GR = \text{giorni di resto} = G - \Delta T \cdot \text{INT} (G/\Delta T)$$

dove  $\text{INT}$  = operatore che calcola il valore intero per difetto dell'operando si ha che:

- $GR = 0$  per valori di  $G$  multipli di  $\Delta T$  (e  $GR \neq 0$  negli altri casi);
- esistono al massimo tanti valori di  $GR$  quanti il valore di  $\Delta T$ .

$$(0 \leq GR \leq \Delta T - 1)$$

Con riferimento all'esempio precedente in tab. 7.3. e 7.4. sono rappresentati i valori del WIP nei primi mesi dell'anno. Si sono distinti i seguenti casi:

- $\Delta T = 1$	$G = 20$	$GR = 0$
- $\Delta T = 2$	$G = 20$	$GR = 0$
	$G = 21$	$GR = 1$
- $\Delta T = 3$	$G = 21$	$GR = 0$
	$G = 22$	$GR = 1$
	$G = 23$	$GR = 2$

$\Delta T = 1$		$\Delta T = 2$	
$\zeta = 20$	$\zeta R = 0$	$\zeta = 20$	$\zeta R = 1$
giorni	WIP	giorni	WIP
0	864	0	h32
1	864	1	h14
...	...	2	h32
20	864	...	...
		21	h14
		...	h32
		40	h14
			h32

Tab. 7.3 - Valori di WIP nel mese con  $\Delta T = 1$  e  $\Delta T = 2$





Quando  $GR = 0$  il valore del WIP è lo stesso in tutti i mesi.

Se  $GR \neq 0$  è possibile individuare un numero massimo di «tipi mesi», indicati con  $TM$ , pari al valore di  $\Delta T$  ( $1 \leq TM \leq \Delta T$ ; in ogni tipo mese il WIP assume un valore particolare.

Nel nostro esempio:

$$\begin{aligned}
 - \Delta T = 1 \quad G = 20 \quad GR = 0 \quad TM = 1 \quad WIP &= 864 \cdot 20/20 = 864 \\
 - \Delta T = 2 \quad G = 20 \quad GR = 0 \quad TM = 1 \quad WIP &= (414 + 432) \times 10 / 20 = 423 \\
 \quad \quad \quad G = 21 \quad GR = 1 \quad TM = 1 \quad WIP &= [(414 + 432) \times 10 + 414] / 21 = 422.6 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad TM = 2 \quad WIP &= [(414 + 432) \times 10 + 432] / 21 = 423.4 \\
 - \Delta T = 3 \quad G = 21 \quad GR = 0 \quad TM = 1 \quad WIP &= [(264 + 276 + 288) \times 7] / 21 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad &= 5796 / 21 = 276 \\
 \quad \quad \quad G = 22 \quad GR = 1 \quad TM = 1 \quad WIP &= (5796 + 264) / 22 = 275,45 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad TM = 2 \quad WIP &= (579 + 276) / 22 = 276 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad TM = 3 \quad WIP &= (5796 + 288) / 22 = 276,54 \\
 \quad \quad \quad G = 23 \quad GR = 2 \quad TM = 1 \quad WIP &= (5796 + 264 + 276) / 23 = 275,47 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad TM = 2 \quad WIP &= (5796 + 264 + 288) / 23 = 276 \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad TM = 3 \quad WIP &= (5796 + 276 + 288) / 23 = 276,52
 \end{aligned}$$

Generalizzando la formula per il calcolo del WIP vero nel tipo mese, si ha che la [6] può essere così espressa:

$$WIP_{VERO} = \frac{\int_{TM} \left( \frac{G}{\Delta T} \right) \sum_{TG=1}^{\Delta T} WIP_{TG} + \sum_{GR} WIP_{TG}}{G} \quad [10]$$

dove:

- $WIP_{T4}$

è dato da formula [9]

- $\sum_{GR} WIP_{T4}$

è una sommatoria su un numero di giorni pari a GR a partire da un valore di TG dato da  $TG = TM + (TM-1)(GR-1)$

Nel caso risulti  $TG > \Delta T$  deve sottrarsi  $\Delta T$  tante volte finché risulta  $T4 \leq \Delta T$

Nel nostro esempio con  $a = 12$ ,  $m = 54$ ,  $l = 36$ , sia:  $\Delta T = 3$ ,  $G = 23$ ,  $GR = 2$ ,  $TM = 3$ ; si ha:

$$T4 = 3 + (3-1)(2-1) = 5$$

$$T4 = 5 - \Delta T = 2$$

$$WIP_{VERO} = \frac{7 \times (264 + 276 + 288) + (276 + 288)}{23} = 276,52$$

$TM=3$

Tale valore coincide con quello ricavabile da tab. 7.3. (terza colonna, ultima parte).

Una formulazione della [10] che renda più agevoli i calcoli è ottenibile sostituendo la [9] nella stessa [10]:

$$WIP_{VERO} = \frac{1}{G} INT\left(\frac{G}{\Delta T}\right) \left[ \frac{a}{\Delta T} \left(m + \frac{l}{2}\right) \Delta T - \sum_{T4=1}^{\Delta T} \frac{l}{\Delta T} (\Delta T - T4) \right] + \frac{1}{G} \left[ \frac{a}{\Delta T} \left(m + \frac{l}{2}\right) - \sum_{GR} \frac{c}{GR} \frac{c}{\Delta T} (\Delta T - T4) \right]$$

$$= \frac{1}{G} \frac{a}{\Delta T} \left(m + \frac{l}{2}\right) \left[ INT\left(\frac{G}{\Delta T}\right) \Delta T + GR \right] - \frac{1}{G} INT\left(\frac{G}{\Delta T}\right) \sum_{T4=1}^{\Delta T} \frac{l}{\Delta T} (\Delta T - T4) - \frac{1}{G} \sum_{GR} \frac{l}{\Delta T} (\Delta T - T4)$$

Essendo  $G = INT\left(\frac{G}{\Delta T}\right) \Delta T + GR$

$$WIP_{VERO} = \frac{a}{\Delta T} \left(m + \frac{l}{2}\right) - \frac{l}{\Delta T \cdot G} \left[ INT\left(\frac{G}{\Delta T}\right) \sum_{T4=1}^{\Delta T} (\Delta T - T4) + \sum_{GR} (\Delta T - T4) \right] \quad [11]$$

Applicando la [11] al medesimo esempio si ottiene facilmente lo stesso valore ricavato tramite la [10]:

$$WIP_{VERO} = \frac{228 - 12}{23} [7(2+1) + (1)] = 276,52$$

$T_H = 3$

Grazie alla [11] siamo ora in grado di esprimere analiticamente, nell'ipotesi di costanza di tutti i parametri in gioco, il valore del WIP vero nel tipo mese.

Per giungere ad una formulazione analitica dell'errore è necessario esprimere tramite formula il WIP stimato nel tipo mese; è infatti:

$$ERRORE_{T_H} = \frac{|WIP_{STIMATO_{T_H}} - WIP_{VERO_{T_H}}|}{WIP_{STIMATO_{T_H}}} \quad [12]$$

Nelle ipotesi poste di costanza dei parametri in gioco le stime del WIP di ogni metodologia possono esprimersi in funzione di  $q_{T_H}$  = numero di lotti entrati/usciti nel mese:

$$- WIP_{STIMATO_{T_H}} = (H + \frac{L}{2}) \frac{a_i}{a} \quad [1]$$

$$= \left( \frac{m}{a} q_{T_H} + \frac{l}{2\Delta T} \right) a \quad [13]$$

$$- WIP_{STIMATO_{T_H}} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{\mu} (m_i + \frac{l_i}{2}) a_i \quad [2] \text{ e } [3]$$

$$= \frac{a_i}{a} q_{T_H} (m + \frac{l}{2}) \quad [14]$$

$$- WIP_{STIMATO_{T_H}} = WIP_{STIMATO_{T_H-1}} + H + L - \sum_{i=1}^{\mu} (m_i + l_i) \quad [4] \text{ e } [5]$$

$$= WIP_{STIMATO_{T_H-1}} + H q_{T_H} + a \frac{l}{\Delta T} - q_{T_H} (m + l) \quad [15]$$

In tab. 7.5. con riferimento all'esempio considerato sono riportati i valori di  $q_{TH}$ . Analoghe tabelle per altri valori di  $T$  sono facilmente ricavabili. In generale per ogni  $\Delta T$  esistono:

- $GR$  mesi in cui  $q_{TH} = INT(G/\Delta T) + 1$
- $(\Delta T - GR)$  mesi in cui  $q_{TH} = INT(G/\Delta T)$

In ultima analisi nell'ipotesi che tutti i parametri in gioco siano costanti gli errori nel tipo mese sono forniti dalla [12] dove  $WIP_{WERO_{TM}}$  si ottiene dalla [11] e  $WIP_{STIMATO_{TM}}$  da una delle formule [13], [14], [15]; l'errore nel periodo considerato, ad esempio un anno, è quindi calcolabile come media pesata degli errori nei tipi mese.

Ad esempio sia:  $a = 12$ ,  $m = 54$ ,  $l = 36$ ,  $\Delta T = 2$ ,  $G = 21$ ,  $GR = 1$ .

Applicando la [11]:

$$WIP_{VERO_{TH=1}} = 432 - \frac{18}{21} [10(1) + 1] = 422,571$$

$$WIP_{VERO_{TH=2}} = 432 - \frac{18}{21} [10(1) + 0] = 432,428$$

Dalla tab. 5:

$$q_{TH=1} = 11 \quad q_{TH=2} = 10$$

Applicando quindi [13], [14], [15] e [12], e approssimando nel calcolo degli errori i valori dei WIP agli interi più vicini si ha:

— Metodologia [1]:

$$WIP_{STIMATO_{TH=1}} = \left( \frac{54}{21} \cdot 11 + \frac{36}{4} \right) 12 = 447,428$$

$$WIP_{STIMATO_{TH=2}} = \left( \frac{54}{21} \cdot 10 + \frac{36}{4} \right) 12 = 416,571$$

$$ERRORE_{TH=1} = \frac{|447,428 - 422,571|}{447,428} \approx 5,40\%$$

$$ERRORE_{TH=2} = \frac{|416,571 - 423,428|}{416,571} \approx 1,40\%$$

Tipi Mese	$\Delta T$	1			2			3		
1	5	20	20	21	21	22	23			
	QR	0	0	1	0	1	2			
2		20	10	11	7	8	8			
			10	10	7	7	8			
3					7	7	7			

Tab.7.5. Numero di lotti entrati/usciti nel tipo mese (qtm)

L'errore medio nei 12 mesi è pari quindi a circa 3,40%.

— Metodologia [2] e [3]:

$$\text{WIP STIMATO}_{TM=1} = \frac{12}{21} \cdot 11 \left( 54 + \frac{36}{2} \right) = 452,571$$

$$\text{WIP STIMATO}_{TM=2} = \frac{12}{21} \cdot 10 \left( 54 + \frac{36}{2} \right) = 411,428$$

$$\text{ERRORE}_{TM=1} = \frac{|452,571 - 422,571|}{452,571} \approx 6,62\%$$

$$\text{ERRORE}_{TM=2} = \frac{|411,428 - 423,428|}{423,428} \approx 2,82\%$$

L'errore medio nei 12 mesi è pari quindi a circa 4,77%.

— Metodologia [4] e [5]:

$$\text{WIP STIMATO}_{TM=1} = 432 + 54 \cdot 11 + 21 \cdot \frac{36}{2} - 11(54 + 36) = 414$$

$$\text{WIP STIMATO}_{TM=2} = 414 + 54 \cdot 10 + 21 \cdot \frac{36}{2} - 10(54 + 36) = 432$$

$$\text{ERRORE}_{TM=1} = \frac{|414 - 422,571|}{415} \approx 2,17\%$$

$$\text{ERRORE}_{TM=2} = \frac{|432 - 423,428|}{432} \approx 2,08\%$$

L'errore medio nei 12 mesi è pari quindi a circa 2,13%.

In situazioni caratterizzate da flussi di ingresso con  $T$  intero costante  $> 1$  i risultati denunciano quindi la presenza di errori anche in condizioni di costanza di tutti i parametri in gioco. Tali errori sono stati definiti «sistematici». I valori dell'esempio sopra riportato sono stati otte-

nuti anche mediante simulazione al calcolatore.

Senza passare attraverso [11], [12], [13], [14] e [15] il calcolo degli errori sistematici è senza dubbio più rapido nell'ipotesi che G sia multiplo di  $\Delta T$ . Il WIP assume in tutti i mesi il medesimo valore ( $GR = 0$ ,  $TM = cost = 1$ ); la [11] diventa:

$$WIP_{VERO} = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) - \frac{l}{\Delta T G} \left[ \frac{G}{\Delta T} \sum_{T_G=1}^{\Delta T} (\Delta T - T_G) \right]$$

Osservando che la sommatoria entro parentesi è una serie numerica convergente del tipo:

$$\sum_{x=1}^m (m-x) = \frac{(m-1)m}{2}$$

Si ha:

$$WIP_{VERO} = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) - (\Delta T - 1) \frac{l}{2\Delta T} \quad [16]$$

La formula [16] quindi fornisce il valore del WIP realmente assunto in tutti i mesi nel caso che  $G =$  numero di giorni nel mese sia costante per tutti i mesi e multiplo di  $\Delta T$ , con  $\Delta T$  intero  $> 1$  e nell'ipotesi che tutti i lotti siano caratterizzati da grandezze pari a quelle medie di sistema produttivo.

Applicando la [16] nell'esempio della tab. 7.2. e 7.3. si ottiene:

- $\Delta T = 1$	$G = 20$	$GR = 0$	WIP	$864 - 0 = 864$
- $\Delta T = 2$	$G = 20$	$GR = 0$	WIP	$432 - 9 = 423$
- $\Delta T = 3$	$G = 21$	$GR = 0$	WIP	$288 - 12 = 276$

I valori del WIP coincidono con quelli calcolati dai dati della tabella 7.2. e 7.3.

Essendo inoltre  $q_{TM} = G/\Delta T \cdot cost$  le stime di tutte le metodologie proposte coincidono; infatti sostituendo in [13], [14] e [15] si ottiene rispettivamente:

- METODO [1] :

$$WIP_{STIMATO} = \left( \frac{m}{G} \frac{G}{\Delta T} + \frac{l}{2\Delta T} \right) a = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right)$$

- METODO [2] e [3]:

$$\text{WIP STIMATO} = \frac{a}{c} \frac{q}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right)$$

- METODO [4] e [5]:

$$\begin{aligned} \text{WIP STIMATO} &= \text{WIP STIMATO}_{\text{mese precedente}} + m \frac{q}{\Delta T} + \frac{ql}{\Delta T} - \frac{q}{\Delta T} (m+l) \\ &= \text{WIP STIMATO}_{\text{mese precedente}} \\ &= \text{WIP INIZIALE} = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) \end{aligned}$$

Sostituendo le relazioni appena trovate e la [16] nella [12] si ottiene rispettivamente:

$$\text{ERRORE SISTEMATICO} = \frac{(\Delta T - 1)}{a} \frac{l}{2m+l} \quad [17]$$

La [17] consente quindi di calcolare l'errore sistematico di tutte le formule di stima nelle seguenti ipotesi:

— tutti i parametri di lotto sono costanti e uguali a quelli medi di sistema;



- $\Delta T$  assume valori interi costanti  $> 1$ ;
- $G$  = numero di giorni lavorativi nel mese = cost è un multiplo di  $\Delta T$ .

Ad esempio con  $a = 12$ ,  $m = 54$ ,  $l = 36$  e  $G$  multiplo di  $\Delta T$  si ha

$\Delta T$	ERRORE SISTEMATICO	$\Delta T$	ERRORE SISTEMATICO
1	0	4	6,24%
2	2,08%	5	8,33%
3	4,16%	6	10,41%

In caso di continuità del flusso entrante/uscente ( $\Delta T = 1$ ) la [17] calcola un errore sistematico nullo com'era lecito attendersi.

#### Errori sistematici dovuti a flussi in ingresso con $\Delta T$ costante minore di uno.

È possibile dimostrare l'esistenza di errori sistematici anche nel caso di costanza di tutti i parametri in gioco con  $\Delta T = \text{cost} < 1$ . Anche questa volta il motivo dell'errore è dovuto alla discontinuità che si viene a creare nel flusso entrante/uscente.

Poniamo ad esempio  $\Delta T = \text{cost.} = 0,75$ ; se il primo lotto entra il primo giorno otteniamo che i lotti successivi entrano nei giorni:

N. progressivo di lotto	1	2	3	4	5	6
Data di entrata	1	1,75	2,5	3,25	4	4,75

Assumendo come giorno di ingresso di un lotto l'intero che approssima per difetto la sua data di entrata, otteniamo che il numero di lotti che entrano nel sistema nei diversi giorni è:

Giorni progressivi	1	2	3	4	5	6	7	8	9
N. lotti entrati	2 1 1			2 1 1			2 1 1		
	sequenza								

Si nota come sia possibile individuare una sequenza (S) costituita dal numero di lotti che entrano ogni giorno nel sistema produttivo.

Tale sequenza, che si sviluppa in un numero di giorni s, si ripete successivamente nel tempo. Indichiamo con  $\eta_j$  il numero di lotti entrati nel giorno j-esimo; nel nostro esempio si ha:

$$s = 3 \quad S : \eta_1 = 2, \eta_2 = 1, \eta_3 = 1$$

In tabella 7.6. sono riportati i valori  $\eta_j$  delle sequenze che si ottengono per alcuni valori di  $\Delta T$  cost.  $< 1$ ; tabelle analoghe per altri valori di T sono facilmente ricavabili.

Nell'ipotesi che tutti i lotti siano caratterizzati da valori medi di sistema, il calcolo del WIP per  $\Delta T$  cost.  $< 1$  nei primi s giorni del mese è realizzabile secondo lo schema di tabella 7.7.

Se ipotizziamo per semplicità che G = numero di giorni lavorativi nel mese sia multiplo di s, possiamo calcolare il WIP vero medio mensile come media di WIP giornalieri negli s giorni (vedi tab.7.7):

$$\begin{aligned} \text{WIP VERO} &= \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s \text{WIP}_j \\ &= \frac{1}{s} \left[ \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) \cdot s + \frac{l}{\Delta T} \sum_{j=1}^s (j-1) \sum_{k=1}^j \sum_{j=1}^k \eta_j \right] \end{aligned}$$

Osservando che  $\sum_{j=1}^s j$  è una serie convergente del tipo:

$\Delta T$	GIORNI										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,1	10										
0,15	7	7	6								
0,20	5										
0,25	4										
0,30	4	3	3								
0,35	3	3	3	3	3	3	2				
0,40	3	2									
0,45	3	2	2	2	3	2	2	2	2		
0,50	2										
0,55	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1
0,60	2	2	1								
0,70	2	1	2	1	2	1	1				
0,75	2	1	1								
0,80	2	1	1	1							

Tab. 7.6.- Numero di lotti ( $n$ ) entranti ogni giorno con  $\Delta T = \text{cost} < 1$  (sequenze di ingressi)

GIORNI	(a)	(b)	(c)	(a)+(b)-(c)	WIP
0					$(m + e/2) a / \Delta T$
1	$\eta_1 m$	$e / \Delta T$	$\eta_1 (m + e)$	$e / \Delta T - \eta_1 e$	$(m + e/2) a / \Delta T + e / \Delta T - \eta_1 e$
2	$\eta_2 m$	$e / \Delta T$	$\eta_2 (m + e)$	$e / \Delta T - \eta_2 e$	$(m + e/2) a / \Delta T + 2e / \Delta T - e(\eta_1 + \eta_2)$
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
J	$\eta_J m$	$e / \Delta T$	$\eta_J (m + e)$	$e / \Delta T - \eta_J e$	$(m + e/2) a / \Delta T + J e / \Delta T - e \sum_{j=1}^J \eta_j$

Tab. 7.7 - Calcolo del WIP nei primi "J" giorni del mese.  
(a): valore delle materie prime in ingresso; (b): valore dei costi diretti attribuiti nel giorno (capacità produttive); (c): valore dei prodotti finiti in uscita.

$$\sum_{x=1}^m x = \frac{m(m+1)}{2}, \quad \text{si ottiene:}$$

$$\text{WIP VERO} = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) + \frac{l}{\Delta T} \left( \frac{s+1}{2} \right) - \frac{l}{s} \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^k \eta_j \quad [18]$$

Tramite la [18] è quindi possibile ottenere il valore del WIP VERO utilizzando per  $\eta_j$  i valori di tab. 6 o analoghe.

Ad esempio sia:  $a = 24$ ,  $m = 54$ ,  $l = 36$ ,  $T = 0,75$ .

Da Tab. 6 otteniamo:

per cui:

	$\eta_j$	$\sum_{j=1}^k \eta_j$
1	2	2
2	1	3
3	1	4

$$\frac{4}{3} = \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^k \eta_j$$

$$\text{WIP VERO} = 2304 + 96 - \frac{36}{3} \cdot 9 = 2292$$

Se adesso andiamo a considerare le stime di ogni metodologia proposta otteniamo che nelle ipotesi poste di  $G$  multiplo di  $s$  ( $G = \emptyset s$ ) tutte le stime coincidono. Infatti osservando che è:

$$\Delta T = s / \sum_{j=1}^s \eta_j$$

Si ottiene:

— Metodo [1]

$$\begin{aligned} \text{WIP STIMATO} &= \left( m + \frac{l}{2} \right) \frac{a}{G} = \left( m \cdot \frac{s}{s} \sum_{j=1}^s \eta_j + \frac{G l}{2 \Delta T} \right) a / G \\ &= \left( \frac{m}{s} \sum_{j=1}^s \eta_j + \frac{l}{2 \Delta T} \right) a \\ &= \left( m + \frac{l}{2} \right) \frac{l}{\Delta T} \end{aligned}$$

— Metodo [2] e [3]

$$\begin{aligned} \text{WIP STIMATO} &= \sum_{i=1}^u \left(m_i + \frac{l_i}{2}\right) \frac{a_i}{q} = \left(m + \frac{l}{2}\right) \frac{a}{q} \cdot \sum_{j=1}^s \eta_j \\ &= \left(m + \frac{l}{2}\right) \frac{a}{\Delta T} \end{aligned}$$

— Metodo [4] e [5]

$$\begin{aligned} \text{WIP STIMATO}_{\text{mese}} &= \text{WIP STIMATO}_{\text{mese-1}} + M + L - \sum_{i=1}^u (m+l) \\ &= \text{WIP STIMATO}_{\text{mese-1}} + M + q \frac{l}{\Delta T} - \sum_{i=1}^u (m+l) \\ &= \text{WIP STIMATO}_{\text{mese-1}} + m \sum_{j=1}^s \eta_j + l \sum_{j=1}^s \eta_j - (m+l) \sum_{j=1}^s \eta_j \\ &= \text{WIP STIMATO}_{\text{mese-1}} = \frac{a}{\Delta T} \left(m + \frac{l}{2}\right) \end{aligned}$$

Sostituendo le relazioni appena trovate e la [18] in

$$\text{ERRORE} = \frac{|\text{WIP STIMATO} - \text{WIP VERO}|}{\text{WIP STIMATO}}$$

si ha:

$$\text{ERRORE SISTEMATICO} = \frac{\left| \frac{l}{\Delta T} \frac{s+1}{2} - \frac{l}{s} \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^k \eta_j \right|}{\frac{a}{\Delta T} \left(m + \frac{l}{2}\right)} \quad [13]$$

L'errore calcolato dalla formula [19] è stato definito sistematico perché risulta non nullo anche nell'ipotesi di costanza di tutti i parametri in gioco. La [19] consente quindi l'individuazione dell'errore sistematico nelle seguenti ipotesi:

### Considerazioni conclusive sugli errori sistematici.

Nei due paragrafi precedenti abbiamo dimostrato come le formule di stima del WIP comportino un errore anche quando non esista alcuna variabilità nel sistema (assoluta costanza dei parametri in gioco). La causa di tali errori è stata individuata nella discontinuità del flusso entrante/uscente.

In alcuni casi particolari siamo riusciti ad esprimere tramite formule il valore di tali errori.

Nei sistemi con  $\Delta T$  intero costante  $> 1$  il calcolo dell'errore è fornito dall'applicazione delle formule [11], [12] ed una tra [13], [14] e [15] a seconda delle metodologie utilizzate. Nel caso di  $G$  multiplo di  $\Delta T$  l'errore per tutte le metodologie di stima è dato dalla [17]. Nei sistemi con  $0 < T = \text{cost.} < 1$  e  $G$  multiplo di  $s$  l'errore per tutte le metodologie è calcolabile tramite la [19].

In tutti i casi le formule utilizzate forniscono errori nulli quando viene meno la discontinuità del flusso entrante/uscente (ad es.  $\Delta T = 1; 0,5; 0,25; \text{ecc.}$ ).

Tutti i valori degli errori ottenuti tramite formule sono stati ricavati anche mediante simulazione al calcolatore a conferma della validità delle relazioni individuate.

### 7.4. Il modello di simulazione WIPS (Work In Process Simulator).

Per rispondere a tutti i quesiti posti al precedente paragrafo 7.3.2. ed effettuare il confronto tra i diversi metodi di stima del work in process, è stato sviluppato, presso l'Istituto di Organizzazione Aziendale della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova, un modello di simulazione di tipo stocastico ad eventi discreti di un sistema produttivo.

Il modello è completamente parametrico e funziona in modalità sia batch che on-line. È stato codificato in VAX-BASIC<sup>8</sup> secondo i canoni della programmazione strutturata<sup>9, 10</sup>, ed implementato presso il VAX-750 del Polo Meccanico della Facoltà di Ingegneria di Padova. Consta di circa 2000 statements comprese le scritture di commento.

I tempi di esecuzione sono funzione del numero di lotti in gioco e dell'arco di tempo che si vuole simulare: ad esempio per alcune decine di lotti presenti mediamente nel sistema produttivo ed un arco di tempo pa-

<sup>8</sup> J. GUAY: *Programming in WAX-BASIC*, Addison Wesley, 1985.

<sup>9</sup> IBM Programmazione Strutturata, SR-13-1030, SR-13-1031.

<sup>10</sup> A. LUERMANN, *La programmazione strutturata in Basic*, Data Manager, n. 39/40, Nov./Dic. 1984.

- tutti i parametri di lotto sono costanti e uguali a quelli medi di sistema;
- $\Delta T$  assume valori costanti  $< 1$ ;
- $G$  = numero di giorni lavorativi nel mese = cost. è un multiplo di  $s$ .

I valori  $\eta$  presenti nella [19] sono ricavabili da tab. 7.6. o analoghe.  
Nell'esempio precedente:  $a = 24$ ,  $m = 54$ ,  $l = 36$ ,  $\Delta T = 0,75$

si era ottenuto mediante tab. 6

$$s = 3, \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^k \eta_j = 9$$

Applicando la [19] si ottiene il valore dell'errore sistematico:

$$\text{ERRORE SISTEMATICO} = \frac{|96 - 108|}{2304} = 0,52\%$$

Nel caso la sequenza di ingresso sia caratterizzata da  $s = 1$  l'errore sistematico risulta nullo.

In tale circostanza infatti non esiste alcuna discontinuità nel flusso entrante/uscente poiché ogni giorno entra nel sistema un numero costante di lotti.

Ad esempio:  $a = 24$ ,  $m = 54$ ,  $l = 36$ ,  $\Delta T = 0,5$

$$\text{Da Tab. 6: } s=1 \quad \sum \sum \eta_j = 2$$

$$\text{ERR. SIST.} = \frac{|72 - 72|}{3456} = 0$$

In formula se  $s = 1$  otteniamo appunto che la [19] si annulla:

$$\sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^k \eta_j = \sum_{j=1}^s \eta_j = \frac{s}{\Delta T} = \frac{1}{\Delta T}$$

SOSTITUENDO IN [19]

$$\text{ERRORE SISTEMATICO} = \frac{\left| \frac{l}{\Delta T} - \frac{l}{\Delta T} \right|}{\frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right)} = 0$$



ri ad un anno il tempo di simulazione è di pochi minuti. Al crescere del numero degli anni il tempo di esecuzione sale proporzionalmente, mentre al crescere del numero di lotti presenti il tempo di esecuzione aumenta più che proporzionalmente.

#### **7.4.1. La struttura generale del modello.**

Il modello simula per un periodo da definirsi (un anno o più) con scansione giornaliera il funzionamento di un sistema produttivo: ogni giorno un certo numero di lotti entra nel sistema, alcuni lotti tra quelli presenti vengono lavorati, altri ancora sono in attesa di lavorazione ed infine altri che hanno completato il proprio ciclo produttivo escono dal sistema.

Il flow-chart generale del modello è rappresentato in fig. 7.6. La struttura consiste in una sequenza di moduli alcuni dei quali sono eseguiti in loop. La logica in base a cui opera l'intero modello è quella riportata ai paragrafi precedenti.

Di seguito andremo sinteticamente a descrivere le modalità di calcolo adottate in ogni singolo modulo.

#### **7.4.2. Modulo A – Definizione dei valori dei parametri.**

Questo modulo richiede la definizione, sia in modalità batch che online, di tutti i parametri necessari per la simulazione.

Essi sono nell'ordine:

- numero di anni su cui effettuare la simulazione [anni];
- $a$  = attraverso medio del sistema produttivo [giorni];
- $l$  = valore medio dei costi diretti imputabili ai lotti [lire/lotto];
- $X$  = numero medio di operazioni per lotto e per giorno [operazioni/lotto giorno];
- $\Delta T_{MAX}, \Delta T_{MIN}$  = valore massimo e minimo dell'intervallo di tempo intercorrente tra l'ingresso di un lotto ed il precedente [giorni];
- valore del passo da utilizzare per individuare i valori discreti nel range  $\Delta T_{MAX} - \Delta T_{MIN}$  assunti dalla variabile indipendente di lotto  $\Delta T$ , [giorni];
- $G_{MAX}, G_{MIN}$  = valori massimo e minimo del numero di giorni nei mesi [giorni/mese].

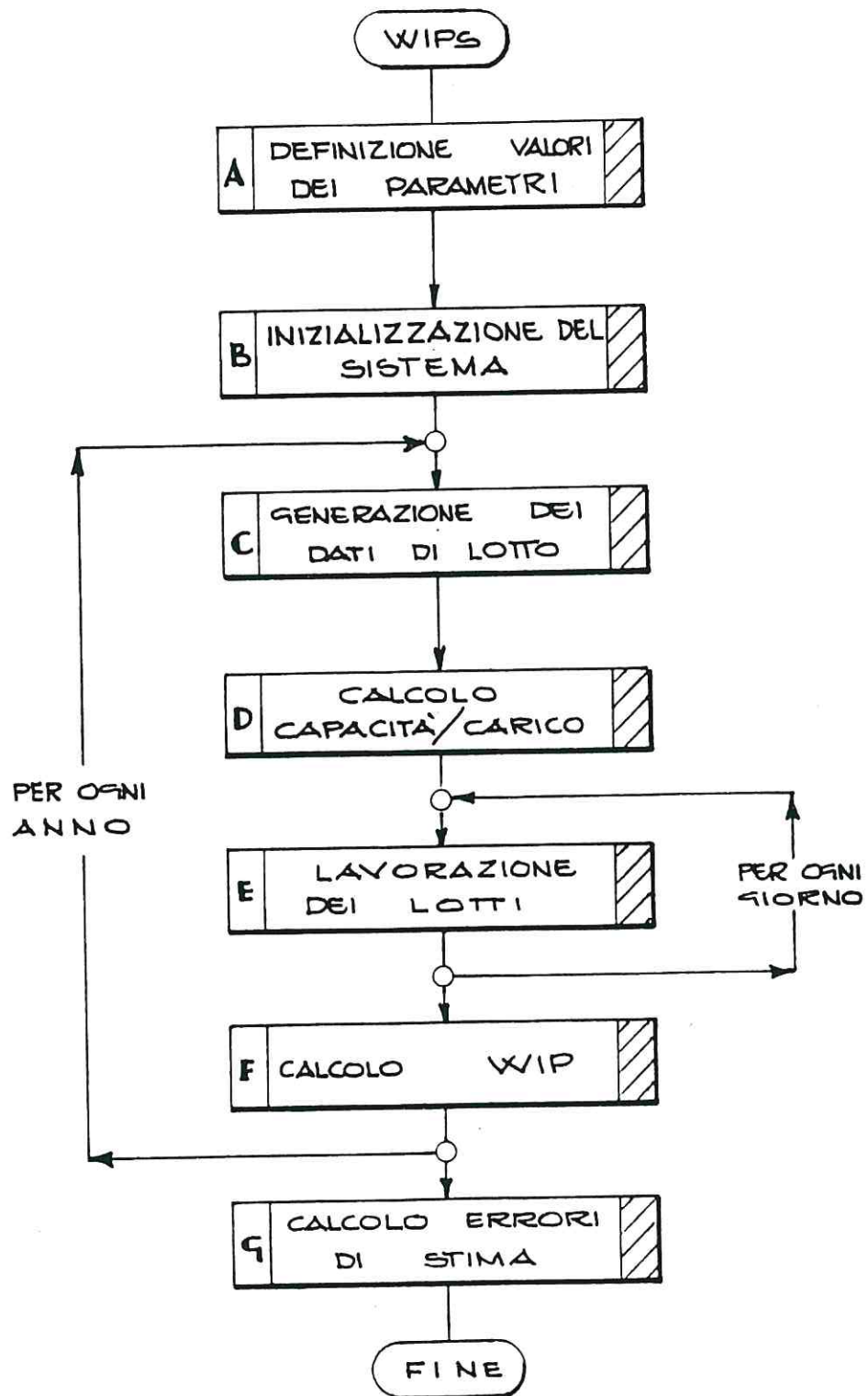


Fig.7.6. Struttura generale del modello WIPs (WORK IN PROCESS SIMULATOR).

Essendo a questo punto calcolati dal sistema:

$m = a \times$  = numero medio di operazioni per lotto [operazioni/lotto];

$\lambda = b/a \times$  = valore medio dei costi diretti imputabile all'operazione [lire/operazione];

è necessario definire ancora:

$m_{MAX}, m_{MIN}$  = Valori standard massimo e minimo del numero di operazioni per lotto [operazioni/lotto];

$M_{MAX}, M_{MIN}$  = valori standard massimo e minimo delle materie prime per lotto [lire/lotto];

$\lambda_{MAX}, \lambda_{MIN}$  = valori standard massimo e minimo dei costi di operazione [lire/operazione];

$\alpha_{MAX} = \frac{1}{2 \alpha_{MAX}}$  = valori massimi e minimi del coefficiente di scostamento standard-consuntivo dell'attraversamento;

$\alpha_{MIN} = \frac{1}{2 \alpha_{MIN}}$

$\beta_{MAX}, \beta_{MIN}$  = valori massimi e minimi del coefficiente di scostamento standard-consuntivo dei costi di materie prime;

$\gamma_{MAX}, \gamma_{MIN}$  = valori massimi e minimi del coefficiente di scostamento standard-consuntivo dei costi di operazione;

$D_m, D_m, D_\lambda$  = valori dei coefficienti di scostamento standard stimato-standard effettivo di n, m e (coefficienti di deriva).

All'inizio deve essere anche specificato se è richiesto il bilanciamento capacità/carico. Su tale punto ritorneremo nella descrizione del modulo D.

#### 7.4.3. Modulo B – Inizializzazione del sistema.

Il programma una volta definiti i parametri di cui al paragrafo precedente calcola i valori medi di sistema e li pone uguali ai valori di inizio simulazione. I valori medi dipendono dalle funzioni di probabilità delle variabili causali discrete che nel nostro caso sono:

$\Delta T_i, c_{mese}, m_i, M_i, \lambda_i, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i$

con  $i =$  indice di lotto.

Poiché a tutte le variabili casuali, nei loro intervalli di definizione, viene attribuita una distribuzione uniforme discreta, i valori medi possono essere calcolati come media aritmetica degli estremi dell'intervallo di definizione.

Il programma calcola pertanto:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{max} + \Delta T_{min}}{2}$$

$$G = \frac{G_{max} + G_{min}}{2}$$

$$m = \frac{m_{max} + m_{min}}{2}$$

numero lotti presenti inizialmente =  $a/\Delta T$

$$XIP\ INIZIALE = (m + l/2) \omega/\Delta T$$

e pone per tutti i lotti di inizio simulazione:

$$m_i = n = a \times \quad a_i = \bar{a}_i = m/x$$

$$m_i = \bar{m}_i = m$$

$$l_i = \bar{l}_i = l$$

$$TGE_i = \begin{cases} \text{giorno di entrata del lotto } i\text{-esimo} \\ \text{costante} = 1 - \Delta T \end{cases}$$

$$TGU_i = \begin{cases} \text{giorno di uscita del lotto } i\text{-esimo} \\ 1 + (i-1)\Delta T \end{cases}$$

con le ultime due assunzioni si realizza:

- un TGE = cost.  $< 1$  in modo che in nessuna giornata si registri l'ingresso di lotti che si suppongono appunto già presenti a inizio simulazione;
- un TGU che assume valori unitari per il primo lotto e valori via via incrementati con passo  $\Delta T$  per gli altri.

Inoltre indicando con

$TLR_i =$  lavoro residuo ancora da assorbire da parte del lotto  $i$ -esimo

si suppone che una metà dei lotti presenti all'inizio sia completamente lavorata e un'altra metà ancora da lavorare; cioè si è posto:

$$TLR_i = 0 \quad \text{con } 1 \leq i \leq \omega/2\Delta T$$

$$TLR_i = \bar{l}_i \quad \text{con } 1 + \omega/2\Delta T \leq i \leq \omega/\Delta T$$

Come già detto si è ipotizzata per tutte le variabili casuali una distribuzione uniforme discreta. Tale vincolo può comunque essere facilmente rimosso nel caso altre siano le curve che rappresentano più realisticamente la situazione aziendale (ad esempio distribuzione binomiale, di Poisson, ecc.<sup>14</sup>).

#### 7.4.4. Modulo C – Generazione dei dati di lotto.

Questo modulo genera tutta una serie di dati relativi ai lotti e calcola a partire da questi altri valori necessari per la simulazione. In fig. 7.7. è rappresentato il flow-chart generale del modulo.

La generazione dei valori delle variabili casuali avviene nel seguente modo:

- viene attribuito, per ogni variabile casuale, il passo che intercorre tra un possibile valore ed un altro nell'intervallo di definizione; si è assunto:

passo di	$G_{\text{mese}} = 1$	passo di	$\lambda = 1$
" "	$\Delta T_i = \text{parametrico}$	" "	$d_i = \frac{1}{2i} = 0,1$
" "	$n_i = 1$	" "	$\beta_i = 0,1$
" "	$m_i = 5$	" "	$\gamma = 0,05$

- si calcola il numero di valori che la variabile può assumere nell'intervallo di definizione (estremi inclusi):

$$N^{\circ} \text{VALORI} = \frac{\text{VALORE MAX} - \text{VALORE MIN} + 1}{\text{PASSO}}$$

- tramite una routine che gestisce la distribuzione casuale uniforme, si associa ad ogni mese un valore di  $\bar{G}$ , e ai sette parametri indipendenti di ogni lotto ( $\Delta T_i, m_i, n_i, \lambda_i, d_i, \beta_i, \gamma_i$ )

valori tra quelli possibili delle corrispondenti variabili casuali.

A questo punto vengono calcolati:

<sup>14</sup> B. MARTINOLI, *op. cit.*, pag. 71-77.

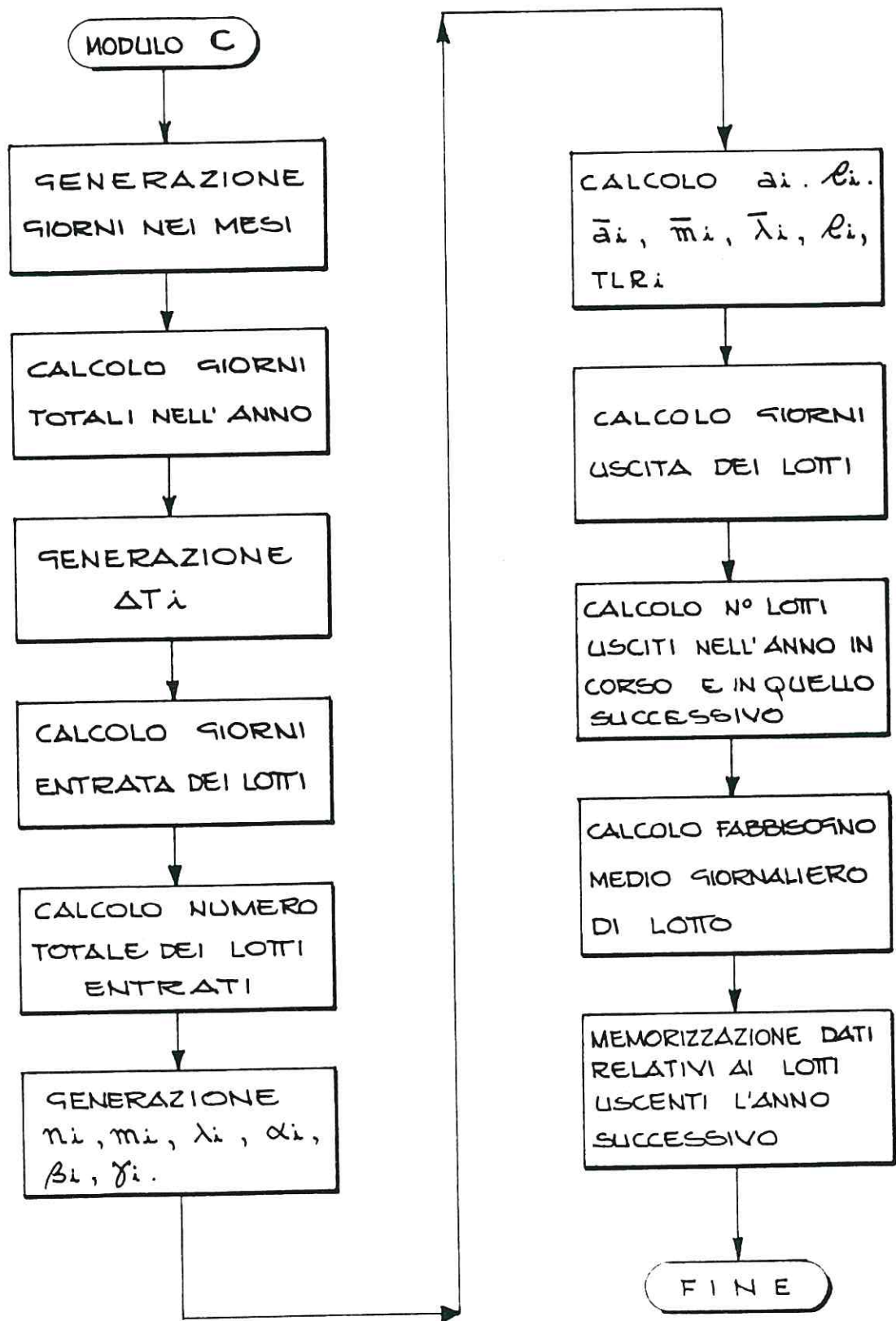


Fig.7.7. Flow chart del modulo C : generazione dei dati di lotto.

— GGT = n. totale di giorni nell'anno =  $\sum_{k=1}^{12} \bar{a}_k$

— TGE<sub>i</sub> = giorno di entrata del lotto i-esimo

$$TGE_i = TGE_{i-1} + \Delta T_i$$

con  $\Delta T_i = \Delta T_e$  utilizzando una procedura di calcolo che approssima all'intero per difetto il giorno di entrata;

NLTOT = n. Totale dei lotti emessi nell'anno, cioè i lotti per cui  $\bar{TGE}_i \leq GGT$ ;

$$a_i = m_i / x \quad l_i = m_i \lambda_i \quad \bar{a}_i = \lambda_i (m_i D_m) / x$$

$$\bar{m}_i = \beta (m_i D_m) \quad \bar{\lambda}_i = \gamma_i (\lambda_i D_k) \quad \bar{l}_i = m_i \bar{\lambda}_i$$

TLR<sub>i</sub> = lavoro residuo ancora da assorbire da parte del lotto i-esimo =  $\bar{l}$

TGU<sub>i</sub> = giorno di uscita del lotto i-esimo

$$TGU_i = TGE_i + \bar{a}_i$$

NLTOTU = n. Totale dei lotti usciti nell'anno, cioè i lotti per cui  $\bar{TGU}_i \leq GGT$

NR LOTTI<sub>anno</sub> = n. di lotti entrati nell'anno in corso e usciti l'anno successivo, definiti anche come lotti di "resto"

$$= NR LOTTI_{anno-1} + NLTOT - NLTOTU$$

TLAG<sub>i</sub> =  $\bar{l}_i / \bar{a}_i$  = bisogno medio giornaliero dovuto al lotto i-esimo

Vengono quindi salvati su apposite tabelle ausiliarie i valori di tutti i lotti uscenti nell'anno successivo e che verranno utilizzati appunto nei calcoli relativi all'anno di simulazione seguente a quello in corso.

#### 7.4.5. Modulo D – Calcolo capacità/carico.

Il modulo D provvede a:

- dimensionare la capacità produttiva del sistema in funzione dei dati medi definiti inizialmente;
- calcolare i dati di fabbisogni e disponibilità nell'anno in corso;
- realizzare, se richiesto, un bilanciamento capacità/carico agendo sulla capacità.

Il bilanciamento capacità/carico è stato utilizzato per verificare se una eventuale previsione dei fabbisogni nei mesi ed una conseguente allocazione di ore straordinarie o di cassa integrazione guadagni, comporti una variazione nelle stime del materiale in corso di lavorazione.

Il flow-chart del modulo è rappresentato in figura 8.

Il programma nell'ordine calcola:

stima del fabbisogno del giorno  $j$  sui lotti presenti nel giorno  $j$

$$T_{TOT} LAG_j = \sum_{\substack{\text{sui lotti presenti} \\ \text{nel giorno } j}} T LAG_i$$

fabbisogno annuo dovuto ai lotti entrati l'anno precedente e uscenti nell'anno in corso

$$FAB_1 = \sum_{\substack{\text{sui lotti entrati} \\ \text{l'anno precedente}}} T L R_i$$

fabbisogno annuo dovuto ai lotti entrati e usciti nell'anno in corso

$$FAB_2 = \sum_{\substack{\text{sui lotti entrati e} \\ \text{usciti nell'anno in corso}}} \bar{l}_i$$

stima del fabbisogno annuo dovuto a lotti entrati nell'anno in corso e usciti nell'anno successivo

$$FAB_3 = \sum \bar{l}_{i/2}$$

sui lotti che  
uscirono l'anno successivo



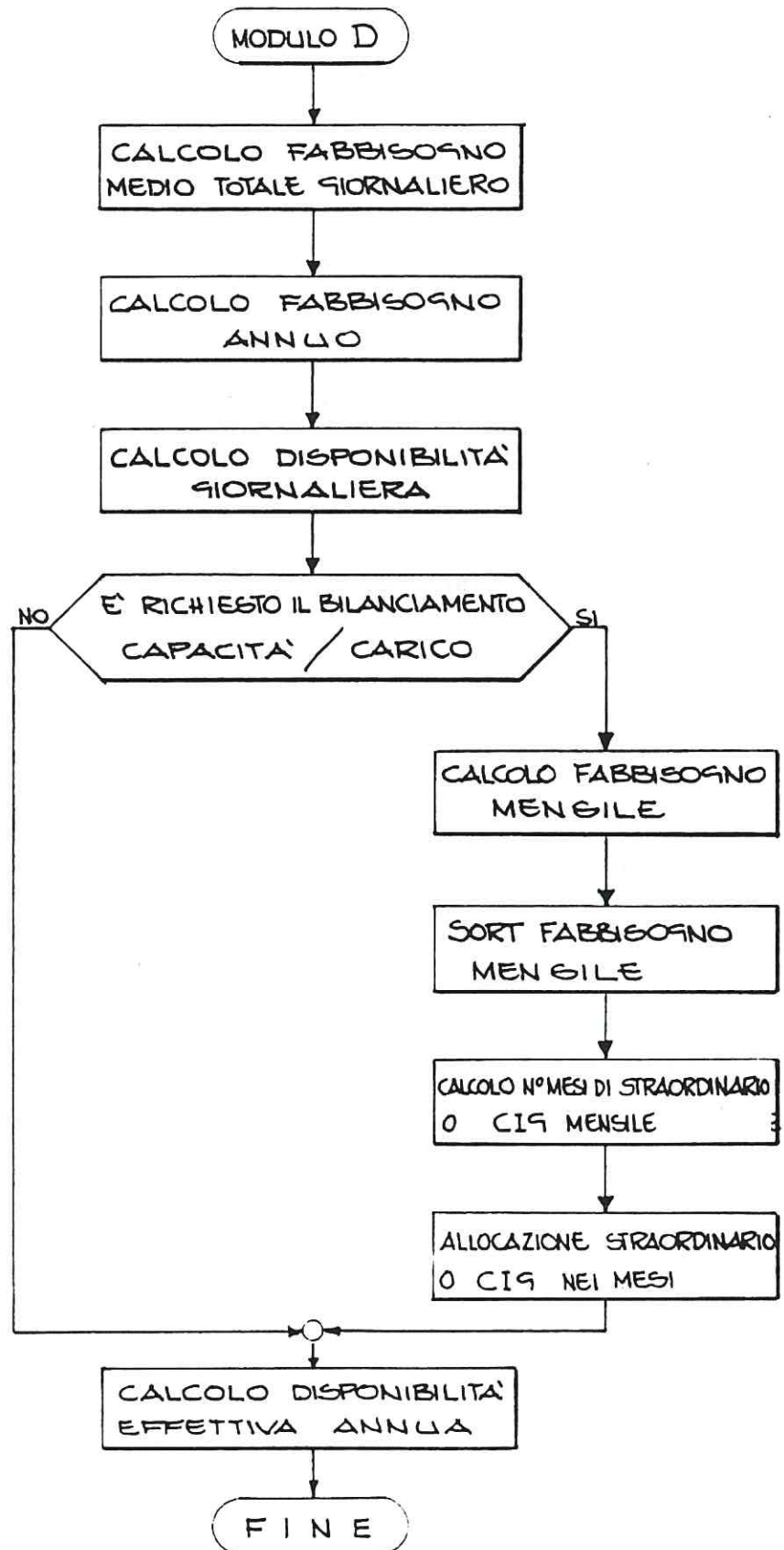


Fig.7.8. Flow-chart del modulo D : calcolo capacita'/carico

$FAB = FAB1 + FAB2 + FAB3 =$  stima del fabbisogno nell'anno in corso

$lav = 1/\Delta T =$  disponibilità giornaliera

Qualora sia richiesto il bilanciamento capacità/carico viene eseguita una procedura che alloca nei mesi ore di straordinario o di bassa integrazione guadagni e che opera con le seguenti modalità:

— si calcola il fabbisogno mensile stimato per ogni mese:

$$TFAB_{MK} = \sum_{\substack{\text{sui giorni} \\ \text{del mese } k}} TTOTLAG_j$$

- si ordinano i mesi secondo il fabbisogno;
- si calcola la disponibilità annua iniziale:  $DISP = (lav) (GGT)$  e la si confronta con la stima del fabbisogno annuo;
- qualora disponibilità annua e fabbisogno annuo differiscano di più del 5% rispetto alla disponibilità annua iniziale, si determina il numero di mesi (fino ad un massimo di 12), in cui è necessario operare una modifica della disponibilità giornaliera (aumento o diminuzione da un minimo del 10% fino ad un massimo del 20% rispetto al valore iniziale);
- si modifica la capacità produttiva di un numero di mesi pari a quello calcolato; i mesi su cui si opera la modifica sono quelli a maggior o minor fabbisogno a seconda che sia necessario realizzare un aumento o una diminuzione della disponibilità giornaliera.

Infine sia che venga richiesto o meno il bilanciamento capacità/carico viene determinata la disponibilità effettiva annua.

#### 7.4.6. Modulo E – Lavorazione dei lotti.

Come rappresentato nel flow-chart di fig. 7.9., questo modulo simula la lavorazione dei lotti nel giorno  $j$ -esimo secondo le sottostanti regole operative:

- un lotto  $i$ -esimo presente nel generico giorno  $j$  viene lavorato per intero qualora risponda alle seguenti caratteristiche:
  - non ha ancora completato il suo ciclo produttivo (ossia  $TLR_i > 0$ );
  - la sua data prevista di uscita coincide con quella del giorno successivo (ossia  $TGU_i - j = 1$ ).

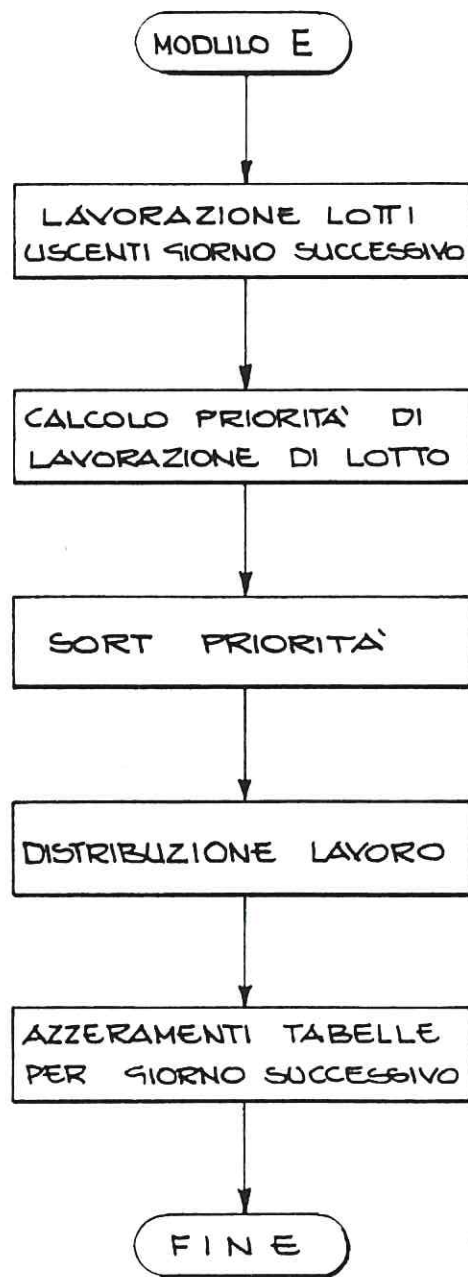


Fig.7.9 -Flow-chart del modulo E : lavorazione dei lotti

Nel caso la disponibilità giornaliera non sia sufficiente viene svolto del lavoro straordinario giornaliero che viene contabilizzato in  $TSTR_j$  = lavoro straordinario svolto nel giorno j.

Tale regola vuole simulare il fatto che, pur di rispettare la data prevista di consegna, un lotto subisce più operazioni in sequenza e assorbe quote di capacità produttiva anche straordinaria.

- per tutti i rimanenti lotti presenti viene calcolato un parametro che misura la priorità con cui il lotto deve essere lavorato:

$$\text{PARAMETRO PRIORITÀ}_i = \frac{\text{GIORNO PREVISTO DI USCITA} - \text{GIORNO } j}{\text{LAVORO RESIDUO ANCORA DA SVOLGERE}_i}$$

tanto più il parametro è piccolo e tanto più urgente è la lavorazione di quel lotto;

- si ordinano i lotti dai più urgenti ai meno urgenti;
- vengono lavorati i lotti più urgenti, ciascuno per un numero di ore pari alla propria durata media consuntiva di operazione ( $\bar{\lambda}_i$ ), fino ad esaurimento della disponibilità giornaliera; il lavoro residuo di ogni lotto lavorato viene ovviamente diminuito di  $\bar{\lambda}_i$
- se per un qualsiasi motivo la disponibilità giornaliera non può essere utilizzata per lavorare i lotti (nessun lotto presente, oppure tutti i lotti presenti nel giorno j sono completati), viene contabilizzata una attesa lavoro:  $TAL_j$  = attesa lavoro nel giorno j.

La necessità di determinare l'attesa lavoro è dovuta al fatto che i costi corrispondenti sostenuti non possono essere considerati come work in process, dal momento che il valore del materiale in corso di lavorazione non aumenta se non tramite lavorazione.

- il lavoro totale effettivamente svolto nel giorno j viene dunque registrato in  $\bar{lav}_j$

Tutte le tabelle ausiliarie utilizzate negli algoritmi di distribuzione del lavoro nel giorno in corso vengono quindi azzerate per l'esecuzione dei medesimi algoritmi nel giorno successivo.

#### 7.4.7. Modulo F – Calcolo del WIP

Il calcolo del work in process effettivo e dei valori stimati avviene secondo il flow-chart di fig. 7.10.

Le operazioni che vengono eseguite sono le seguenti:

— Vengono calcolati:

totale lavoro straordinario giornaliero nell'anno

$$\text{TOT STR} = \sum_{\substack{\text{sui giorni} \\ \text{dell'anno}}} \text{TSTR}_j$$

totale attesa lavoro giornaliero nell'anno

$$\text{TOTAL} = \sum_{\substack{\text{sui giorni} \\ \text{dell'anno}}} \text{TAL}_j$$

— si determina il valore del WIP vero nell'ultimo giorno dell'anno mediante i lotti di resto dell'anno in corso, ossia mediante i lotti che sono presenti nell'ultimo giorno dell'anno e che escono l'anno successivo; il WIP viene calcolato come sommatoria del valore delle materie prime e del lavoro effettivamente eseguito sui lotti di resto:

$$\text{WIP}_{\text{fine anno}} = \sum_{\substack{\text{sui lotti} \\ \text{di resto} \\ \text{anno in corso}}} (\bar{m}_i + \bar{l}_i - \text{TLR}_i)$$

Sempre mediante i lotti di resto si calcola il lavoro totale eseguito nell'anno:

$$\text{LAV TOT} = \text{FAB}_1 + \text{FAB}_2 + \sum_{\substack{\text{sui lotti} \\ \text{di resto anno} \\ \text{in corso}}} (\bar{l}_i - \text{TLR}_i)$$

— si calcolano i costi mensili ed annuali diretti e quelli dovuti a materie prime in ingresso:

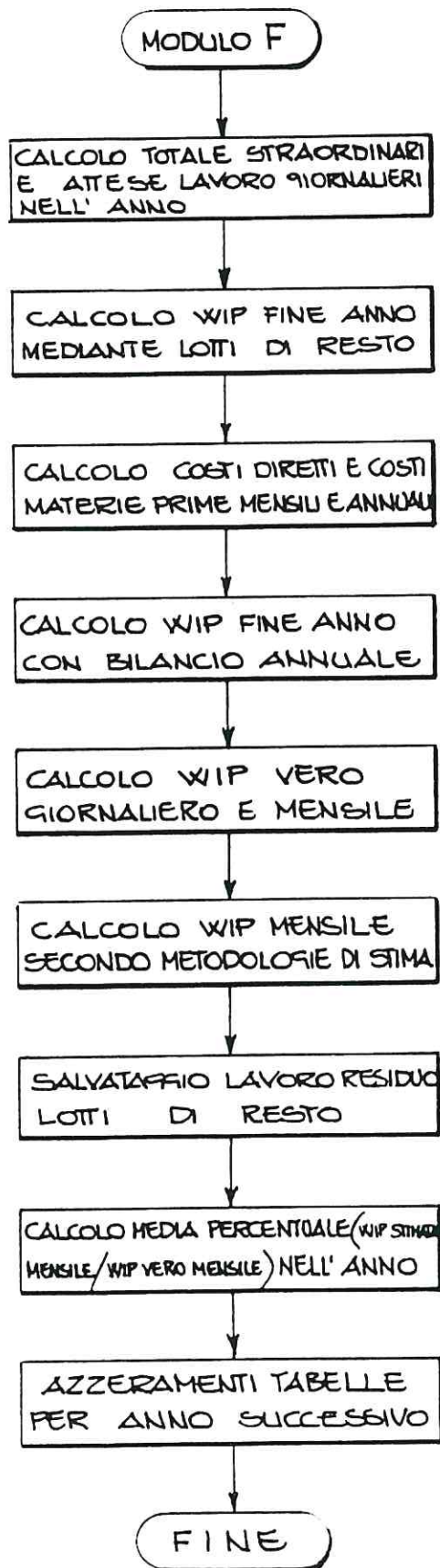


Fig.7.10. Flow-chart del modulo F: calcolo del WIP

$$L_k = \sum_{\text{sui giorni del mese}} \bar{LAW}_j$$

= costi diretti sostenuti nel mese K

$$M_k = \sum_{\text{sui lotti entrati nel mese}} \bar{m}_i$$

= costi delle materie prime dei lotti entrati nel mese K

$$\text{TOT } L = \sum_{\text{sui mesi dell'anno}} L_k =$$

costi diretti sostenuti nell'anno (deve coincidere con LAVTOT)

$$\text{TOT } M = \sum_{\text{MESI DELL'ANNO}} M_k =$$

costi delle materie prime dei lotti entrati dell'anno

- si esegue un bilancio di costi nell'anno per ottenere un valore di WIP a fine anno che deve coincidere con quello calcolato precedentemente:

$$\text{WIP}_{\text{fine anno}} = \text{WIP}_{\text{fine anno precedente}} - \sum_{\text{sui lotti di resto anno precedente}} \bar{m}_i + \sum_{\text{sui lotti di resto anno in corso}} \bar{m}_i - \text{FAB1} - \text{FAB2} + \text{TOT } L$$

- si determina il valore del WIP vero giornaliero e del WIP vero mensile secondo le formule del precedente paragrafo 7.2.6. Il WIP vero dell'ultimo giorno dell'anno ottenuto per questa via deve coincidere anch'esso con i due valori del WIP di fine anno sopra calcolati;
- si individuano i valori delle stime del WIP mensile fornite dalle cinque metodologie di stima mediante le formule [1], [2], [3], [4] e [5] riportate tab. 7.1.  
È opportuno specificare che, negli anni successivi al primo, come valore del WIP di inizio anno della formula [4] si utilizza quello vero. Si ipotizza in questo modo che venga svolto un inventario ad ogni fine anno.
- vengono salvati su apposite tabelle i valori del lavoro ancora da svolgere per i lotti uscenti l'anno successivo;
- viene calcolata la media nell'anno del rapporto

$$\frac{\text{WIP MENSILE STIMATO}}{\text{WIP MENSILE VERO}}$$

- per tutte e cinque le metodologie di stima;
- si azzerano tutte le tabelle da usarsi nell'anno successivo.

#### 7.4.8. Modulo G – Calcolo degli errori di stima.

Nell'ultimo modulo il cui flow-chart è riportato in fig. 7.11. vengono determinati:

- le medie e le medie mobili degli ultimi tre mesi delle stime mensili di ogni metodologia e del WIP vero mensile nel periodo di simulazione definito; in ogni mese K la media mensile è stata così calcolata:

$$WIP \text{ MOBILE}_K = \left( WIP_{K-2} + WIP_{K-1} + WIP_K \right) / 3$$

- gli errori e gli errori mobili di ogni metodologia secondo la formula [7] del precedente paragrafo 7.2.7.

Il calcolo delle medie mobili e degli errori mobili è stato effettuato per verificare di quanto migliorino le stime quando, mediando negli ultimi tre mesi, si diminuisce l'ampiezza delle oscillazioni delle grandezze in gioco rispetto al valore medio.

#### 7.5. Piano delle prove e risultati.

Per rispondere a tutti i quesiti posti è stata effettuata una analisi di sensitività relativa a tutte le variabili in gioco. Essendo il modello di tipo stocastico, per ogni valore della variabile di decisione si possono avere più valori casuali della variabile di prestazione; nel nostro caso per ogni intervallo di variabilità della variabile analizzata corrisponde una successione di realizzazioni della variabile casuale errore (variabile di prestazione), caratterizzata da una sua media ed una sua varianza <sup>12</sup>.

A partire da un job-shop caratterizzato dai seguenti valori medi:

$$\Delta T = 1, a = 24, l = 36, m = 54, n = 6, \lambda = 6, \times = 0,25.$$

Si è eseguito una serie di prove per un numero complessivo di 77 (cfr. Tab. 1,2,3,4 di Appendice)

Le prove sono finalizzate all'analisi di ciascuna variabile avente un peso nel fenomeno.

<sup>12</sup> Cfr. B. MARTINOLI, 1982, *op. int.*



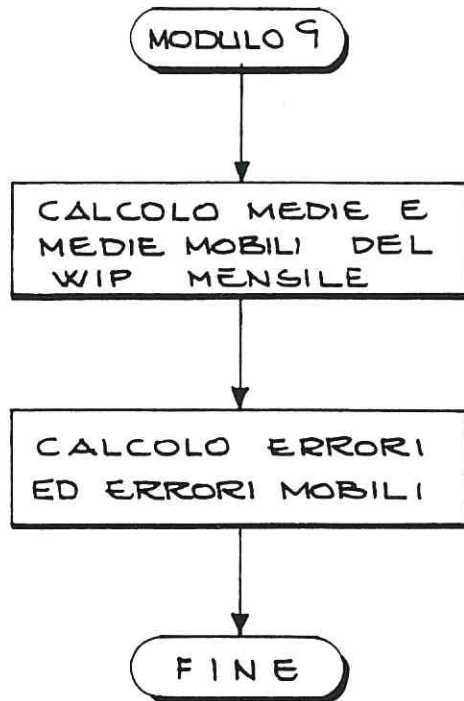


Fig. 7.11. Flow-chart del modulo 9: calcolo degli errori di stima

I tabulati di Appendice dal n. 1 al n. 4 mostrano rispettivamente:

- le modalità di inserimento dei parametri nel modello;
- il riscontro dei dati inseriti e i risultati ottenuti dalla simulazione;
- alcuni dati di controllo della avvenuta simulazione;
- i risultati finali.

Nei tabulati di Appendice dal n. 5 al n. 11 sono riportati tutti i dati delle prove i cui valori dei parametri sono riportati nelle Tab. 1,2,3,4 di Appendice.

Tali dati sono stati rappresentati nelle fig. 12-25 di Appendice relativamente ad ogni variabile analizzata.

Senza entrare nella descrizione di dettaglio, per la quale rimandiamo all'analisi dei contenuti dell'Appendice, e riferendoci alla formula [1] possiamo qualitativamente dire che all'aumentare del range di variabilità della variabile considerata da valori nulli fino ad un intervallo massimo di estremi calcolati in percentuale rispetto al valor medio come sotto indicato, gli errori aumentano da valori nulli fino a valori di un ordine di grandezza pari a quello riportato.

Variabile	Estremi del range massimo	Errori di [F1] nel range massimo
$\Delta T_i$	$\pm 100\%$	10%
$n_i$	$\pm 80\%$	10-15%
$m_i$	$\pm 90\%$	5%
$\lambda_i$	$\pm 90\%$	5%
$\delta_i = 1/\alpha_i$	$\pm 50\%$	10-12%
$\beta_i$	$\pm 50\%$	2-3%
$\gamma_i$	$\pm 25\%$	3-4%

I componenti delle altre formule a livello di trend sono i medesimi, con la differenza che [2] ed [3] danno in generale risultati peggiori di alcuni punti percentuali rispetto ad [1], e viceversa [4] ed [5].

Per quanto riguarda l'influenza sugli errori di stima delle errate valutazioni in sede di determinazione degli standard, qualificati dai coefficienti di «deriva»  $Dn$ ,  $Dm$ ,  $D\lambda$ , va premesso che per definizione:

- [3], [4] e [5] sono insensibili a derive negli standard di attraversamento, ossia a  $Dn$ ;
- [1] e [5] sono insensibili a derive negli standard di costo delle materie prime e del lavoro, cioè a  $Dm$  e  $D\lambda$ .

Valori di  $Dn$  crescenti dal valore unitario fino ad un 30% in più comportano per [1] ed [2] errori crescenti da valori nulli fino a valori intorno al 30%. Lo stesso dicasi in generale per [2], [3] ed [4] quando a variare sono  $Dm$  e  $D\lambda$ .

Quello che ci preme far notare è che ogni parametro influenza con peso anche notevolmente diverso l'errore di stima.

Prove eseguite ipotizzando che tutte le variabili variano contemporaneamente intorno al proprio valor medio, in un intervallo di ampiezza medio tra quello nullo e quello massimo, con  $Dn$ ,  $Dm$  e  $D\lambda$  unitari, ha mostrato come le stime migliori siano date nell'ordine da [5], [4], [1], [3] ed [2], con valori degli errori che vanno da circa 5-10% a circa 25-30%

Questi valori cambiano anche di molto quando si modificano i valori medi del sistema produttivo.

L'analisi di sensitività svolta al riguardo ha mostrato che a parità di tutte le altre condizioni.

- al crescere di  $\Delta T$  l'errore cresce;
- al crescere di  $a$ , ossia di  $n = a \times$ , l'errore cala;
- al crescere di  $m$  l'errore cala;
- al crescere di  $l$ , ossia di  $\lambda = l/n$ , l'errore cresce;
- al crescere di  $x$  l'errore cala.

Anche in questo caso l'entità della variazione dell'errore è molto diversa da variabile a variabile.

La ragione dei comportamenti dovuti ad  $m$  e  $l$  può essere qualitativamente spiegata osservando la fig. 7.5. che è simile dal punto di vista grafico alla fig. 7.3. L'area sottesa dal trapezio è ancora una volta il valore del WIP medio dato da:

$$\text{WIP} = \frac{a}{\Delta T} \left( m + \frac{l}{2} \right) \quad \frac{a}{\Delta T} = \text{n. di lotti mediamente presenti nel sistema produttivo}$$

Se ci è concessa l'approssimazione:

$$\begin{aligned} \text{ERRORE} &= \frac{\text{WIP STIMATO} - \text{WIP VERO}}{\text{WIP STIMATO}} = \\ &= \frac{\text{AREA TRAPEZIO} - \text{AREA RETTANGOLO}}{\text{AREA TRAPEZIO}} = \\ &= \frac{\text{AREA TRIANGOLO}}{\text{AREA TRAPEZIO}} = \frac{l}{2m+l} \end{aligned}$$

notiamo appunto come una tale formulazione dell'errore spiega i comportamenti dovuti a variazioni di  $m$  ed  $l$ .

*L'errore risulta però indipendente dal valore di  $a/\Delta T$ .* I trends derivanti dalle variazioni di questi due parametri sono però comprensibili se si osserva come  $a/\Delta T$  non sia altro che il numero di lotti mediamente presenti nel sistema produttivo: un alto numero di lotti in gioco ha un fatto volano di compensazione di tutte le variazioni.

La precedente formula dell'errore sistematico d'altronde

$$ES. = \frac{\Delta T - 1}{a} \frac{l}{2m+1}$$

*sta anch'essa a confermare i trends trovati.*

Un modo per motivare l'effetto dovuto alla variabile  $X$  può essere quello rappresentato in fig 7.12. Nelle stime delle formule [1], [2] ed [3] si suppone una linearità nella crescita del valore del WIP. In altri termini si assume:

$$\lambda_{i, \text{STIMA}} = l_i / a_i, \text{ mentre è } \lambda_{i, \text{STANDARD}} = l_i / n_i = l_i / a_i \bar{X}$$

*Osservando le due ultime relazioni si nota come nella stima si è assunto  $X = 1$ .* È pertanto lecito attendersi che tanto più la  $X$  nelle configurazioni reali tenda ad 1 e tanto più gli errori di stima tendano a calare.

## 7.6. Analogia formale tra job-shops e FMS.

Con riferimento specifico al caso della Rossi Motoriduttori descritto nei paragrafi 6.4. e 6.5., verrà qui presentata l'analogia formale individuata tra job-shops e FMS.

Tale analogia matematica consente l'applicazione del medesimo simulatore WIPS, sviluppato per i job-shops, anche agli FMS, richiedendone solo alcune modifiche marginali relative al modulo E (lavorazione dei lotti).

Alla data attuale le modifiche non sono ancora state apportate.

Lo sviluppo di uno specifico modulo E consentirà il confronto delle metodologie di stima anche nel caso degli FMS.

In tale sede ci limiteremo a formalizzare l'analogia modellistica individuata. Tale analogia è rappresentata schematicamente in tab. 7.8.

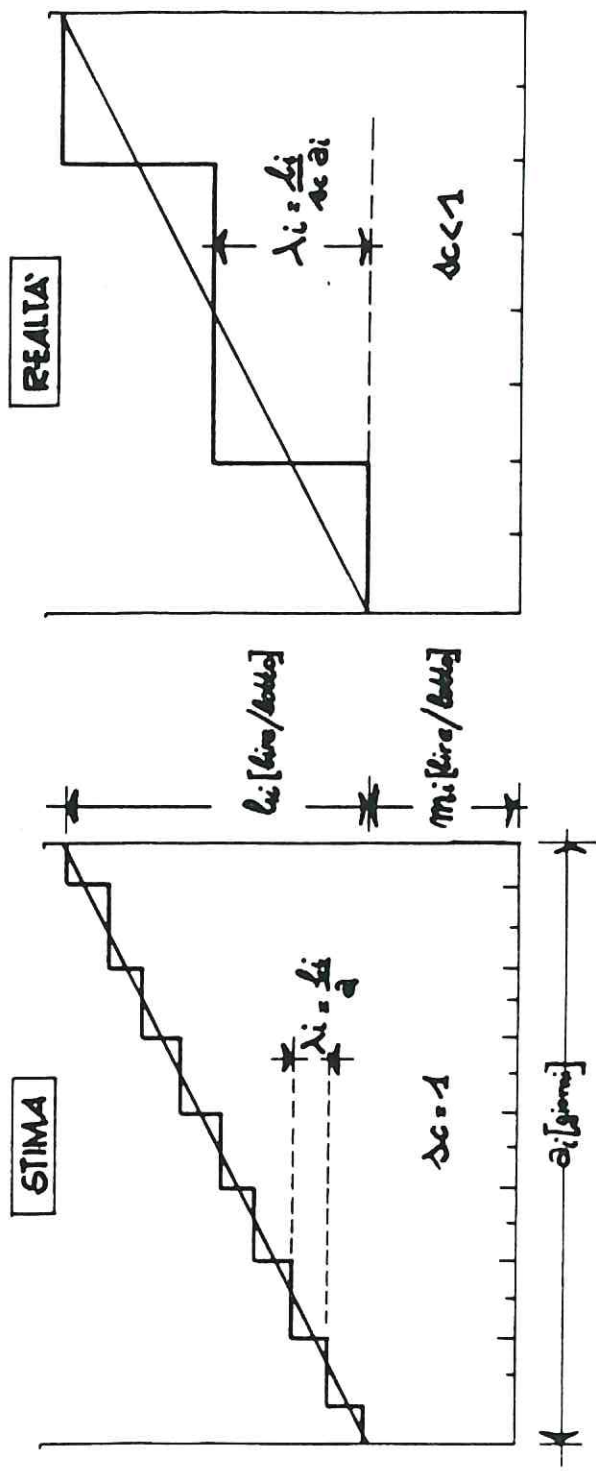


Fig. 7.12- Confronto tra  $\lambda_i$  STIMA e  $\lambda_i$  STANDARD.

	TEMPO CICLO DEL PEZZO $0.63$ [ore]	JOB-SHOP	FMS senza riduzione dei lotti	FMS con riduzione dei lotti (k=9)	FMS con pezzi singoli (k=9·11)
	Numero di pezzi del lotto [pezzi / lotto]	99	99	99/9	9/9·11
	$n$ [operaz. / lotto]	99	99	99/9	9/9·11
	$\lambda$ [ore / operaz.]	7	1	1	1
	$X$ $\left[ \frac{\text{operaz.}}{\text{lotto giorno}} \right]$   $\left[ \frac{FS}{\text{lotto giorno}} \right]$	0.25	7	7	7
	$m$ [line / lotto]	54	54	54/9	54/9·11
	$\Delta T$ [giorno / lotto]	1	1	1/9	1/9·11
	$\ell = m \lambda$ [ore / lotto]	63	63	63/9	63/9·11 = 0.63
	$a = \frac{\ell}{X}$ [giorni]   $a = \frac{\ell}{FS}$ [giorni]	28	9	1	1/11
	CP: $\frac{\ell}{\Delta T}$ [ore / giorno]	63	63	63	63
	LOTTI PRESENTI = $\frac{\alpha}{\Delta T}$ [lotti]	28 lotti Grandi	9 lotti Grandi	9 lotti Piccoli	9 Pezzi
	WIP = $\alpha \left[ \frac{1}{\Delta T} (m + \frac{\ell}{X}) \right]$	$= \frac{m}{X}$ [ ] $= 28$ [ ]	$= \frac{\ell}{FS}$ [ ] $= 9$ [ ]	$= \frac{\ell}{k \cdot FS}$ [ ] $= 1$ [ ]	$= \frac{\ell}{k \cdot FS}$ [ ] $= 1/11$ [ ]
VARIABILI INDIPENDENTI					
VARIABILI DIPENDENTI					

Tab. 7.8 - Analogia formale tra JOB-SHOPS e FMS

La simbologia è analoga a quanto presentato nei paragrafi precedenti (vedi fig. 7.12\*).

In tab. 7.8 è stato introdotto rispetto alle simbologie del Capitolo 7 il Fattore di Scheduling (FS) che abbiamo descritto nel paragrafo 6.4.

Esiste una perfetta corrispondenza tra:

$X$  = numero medio di operazioni che vengono eseguite ogni giorno su un lotto nel job-shop;

$FS$  = numero medio di ore di capacità produttiva che vengono assegnate ad ogni lotto di produzione dei particolari lavorati contemporaneamente nell'FMS.

Tale corrispondenza permette una analoga modellizzazione dei job-shops e degli FMS, cioè di due sistemi produttivi caratterizzati da modalità di funzionamento profondamente diverse.

Questi due parametri, come riportato in tab. 7.8., determinano il tempo di attraversamento del sistema produttivo.

Nel caso di job-shop l'attraversamento è determinato dal numero di operazioni previste, cioè dal numero di passaggi da centro a centro. Il lead time è quindi un lead time 'fisso', cioè che non dipende dall'entità del lotto. Questo ovviamente è vero solo in prima approssimazione.

Il lead-time in un job-shop è dato dalla somma dei tempi di attrezzaggio, lavorazione, movimentazione e coda di attesa.

La dimensione del lotto determina il valore dei tempi di lavorazione che devono pertanto ritenersi tempi variabili. Gli altri tempi invece, sono mediamente costanti perché dipendono dalle caratteristiche generali del job-shop, e devono pertanto ritenersi fissi.

In ultima analisi l'ipotesi secondo cui in un job-shop il lead time può ritenersi fisso costituisce una approssimazione che non induce ad errori grossolani.

Nel caso dell'FMS invece il tempo di attraversamento di un lotto è variabile ed è determinato dal numero di lotti dei diversi particolari che, al fine di ottimizzare la saturazione dell'impianto, devono essere contemporaneamente presenti nel sistema.

Il valore medio del WIP, come riportato in tab. 7.8, è direttamente proporzionale ai tempi di attraversamento.

È pertanto possibile a questo punto individuare le variabili che consentono la riduzione del WIP passando da job-shop a FMS:

- una prima riduzione è legata alla diversa 'natura' dei sistemi: il job-shop ha lead times fissi e l'FMS ha lead times variabili. L'effetto di tale riduzione è stato rappresentato in tab. 7.8.: si passa da un fattore 28 per il job-shop ad un fattore 9 per l'FMS (in condizioni produttive del tutto analoghe);
- una seconda riduzione si può ottenere riducendo la dimensione del

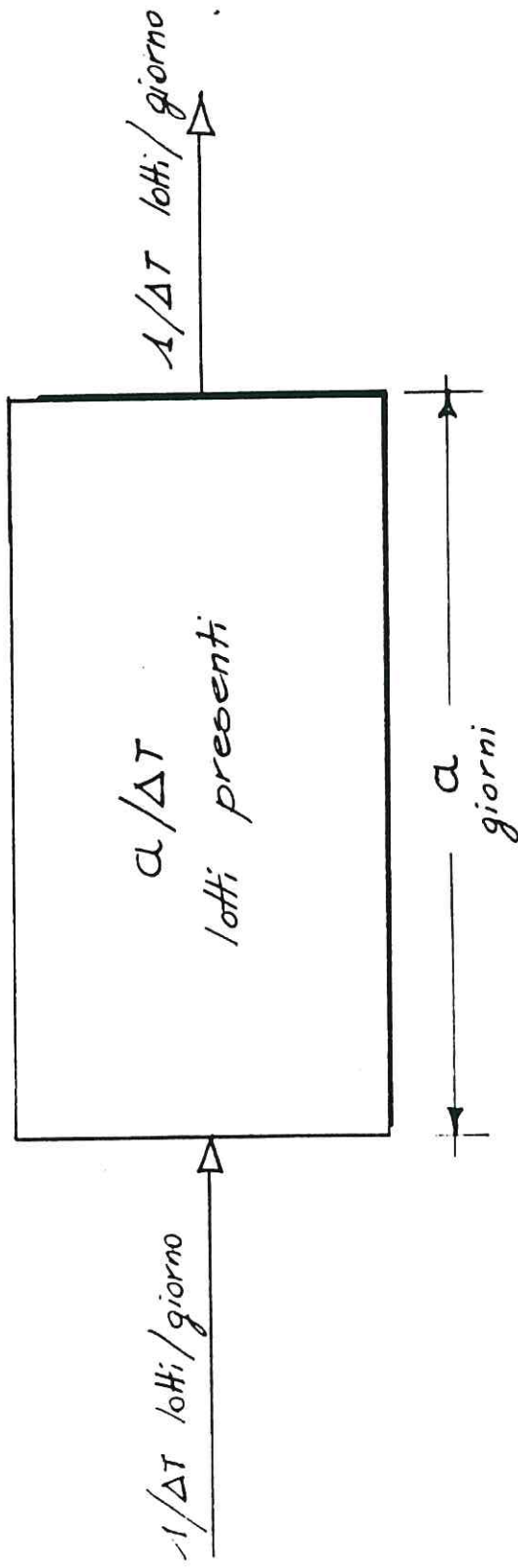


Fig. 7.12\* - Parametri importanti ai fini della analogia Job-shops e FMS



lotto di un fattore K. In tab. 7.8. con  $K = 9$  si passa da un fattore 28 per il job-shop a un fattore 1 per l'FMS;

- una terza riduzione si può ottenere eliminando il concetto di lotto e lavorando con pezzi singoli. In tab. 7.8. con  $K = 99$  si passa da un fattore 28 per il job-shop a un fattore 1/11 per l'FMS.

In formula possiamo scrivere:

$$\frac{WIP_{JOB-SHOP}}{WIP_{FMS}} = \frac{Q_{JOB-SHOP}}{Q_{FMS}} = \frac{m/x}{l/FS} \quad [A]$$

Introducendo il fattore K di riduzione del lotto si ha:

$$l_{FMS} = \frac{l_{JOB-SHOP}}{K}$$

Sostituendo  $l_{FMS}$  nella formula [A], dove l ha il medesimo valore sia nel job-shop che nell'FMS perché non è stata ancora introdotta la riduzione del lotto, si ha:

$$\frac{WIP_{JOB-SHOP}}{WIP_{FMS}} = \frac{Q_{JOB-SHOP}}{Q_{FMS}} = \left( \frac{m}{x \cdot l_{JOB-SHOP}} \right) (K \cdot FS) \quad [B]$$

La prima parentesi di formula [B] contiene dati caratteristici del job-shop di partenza.

La seconda parentesi di formula [B] contiene le variabili che consentono la riduzione del WIP:

- il fattore di Scheduling (FS) che 'interpreta' la diversa 'natura' dell'FMS rispetto allo job-shop, caratterizzato invece dal numero di operazioni per lotto e per giorno (X);
- il fattore di riduzione del lotto K; la riduzione del lotto è possibile grazie ai bassi o nulli costi set-up dell'FMS.

La formalizzazione della [B] consente di evidenziare che la riduzione massima del WIP si ottiene con valori di FS e K massimi.

La riduzione dell'entità dei lotti, cioè il massimo valore di K, è funzione, non tanto delle capacità tecnologiche dell'FMS, quanto piuttosto delle esigenze dei reparti di monte e di valle. Tale problematica è stata evidenziata nel caso della Rossi Motoriduttori nel paragrafo 6.4.

In linea teorica il valore massimo di K è pari alla numerosità dei lotti.

Per quanto riguarda il Fattore di Scheduling (FS) il suo valore è, come abbiamo spiegato nel paragrafo 6.4. relativo alla Rossi Motoriduttori, determinato dalla disponibilità di attrezzature, cioè in ultima analisi determinato dagli investimenti nelle stesse attrezzature.

Nel caso della Rossi Motoriduttori i cui dati sono riportati in fig. 7.13., un aumento del fattore di Scheduling fino al suo valore massimo, che corrisponde per definizione al valore della capacità produttiva dell'FMS, consentirebbe di passare, a parità di dimensione dei lotti, alla situazione rappresentata in fig. 7.14. Tale situazione è caratterizzata da tempi di attraversamento pari ad un giorno e da un WIP pari all'entità di un lot-

$$\begin{aligned}
 n &= 1 \text{ [operazione]} \\
 \lambda &= 63 \text{ [ore/operazione]} \\
 F_S &= 7 \text{ [ore / lotto giorno]} \\
 m &= 54 \text{ [lire / lotto]} \\
 \Delta T &= 1 \text{ [giorno / lotto]}
 \end{aligned}
 \quad \Downarrow \quad
 \begin{aligned}
 l &= n\lambda = 63 \text{ [ore / lotto]} \\
 a &= \frac{l}{F_S} = 9 \text{ [giorni]} \\
 CP &= \frac{l}{\Delta T} = 63 \text{ [ore / giorno]} \\
 \text{LOTTE PRESENTI} &= \frac{a}{\Delta T} = 9 \text{ [lotti]}
 \end{aligned}$$

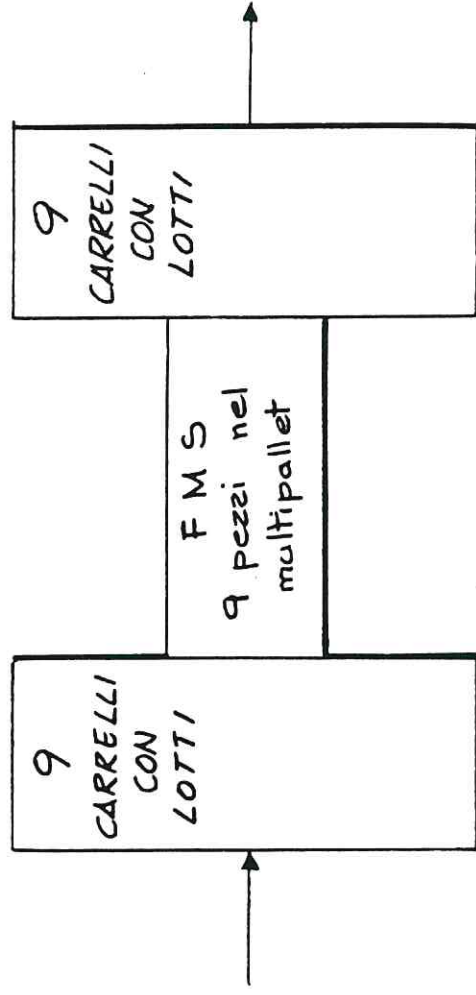


Fig. 7.13 - Esempio relativo al caso Rossei Motoriduttori

$$n = \text{idem} = 1$$

$$\lambda = \text{idem} = 63$$

$$F_s = 63$$

$$m = \text{idem} = 54$$

$$\Delta T = \text{idem} = 1$$



$$l = n \lambda = \text{idem} = 63$$

$$a = \frac{l}{F_s} = 1$$

$$CP = \frac{l}{\Delta T} = \text{idem} = 63$$

$$\text{Lotti PRESENTI} = \frac{a}{\Delta T} = 1$$

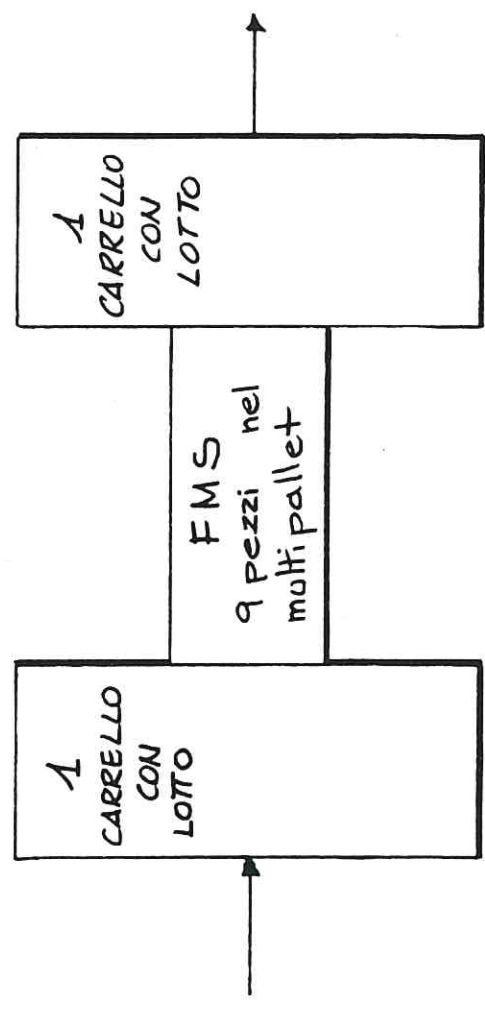


Fig. 7.14 - Esempio relativo al caso Rossi Motoriduttori con aumento massimo del Fattore di Scheduling ( $F_s$ )

to suddiviso tra i carrelli in entrata e in uscita dal sistema e il **multi lotto**.

Abbiamo detto che il valore di FS dipende dall'investimento in attrezzature ed utensili in generale.

In fig. 7.15. è riportata la relazione esistente tra la variabile FS e gli investimenti in attrezzature ed utensili.

Conferendo all'FMS la flessibilità massima, si ottiene che il Fattore di Scheduling (FS) può essere uguale al limite alla capacità produttiva del sistema, cioè assumere il suo valore massimo.

Volendo attribuire alla variabile FS un valore minimo, potrebbe essere significativo porre FS pari al valore tale che, a parità di condizioni operative rispetto allo job-shop (entità dei lotti), si ottenga il medesimo lead-time.

Si ha.

$$a_{\text{JOB SHOP}} = a_{\text{FMS}} \frac{m}{x} = \frac{l/k}{FS_{\text{MIN}}} \quad FS_{\text{MIN}} = \frac{l}{k} \frac{x}{m}$$

Avendo ipotizzato  $K = 1$ , cioè nessuna riduzione dei lotti, si ha:

$$FS_{\text{MIN}} = l \frac{x}{m}$$

A parità di dimensione dei lotti del job-shop, un investimento in attrezzature ed utensili minore di quello che attribuisce alla variabile FS il valore minimo sopra indicato, comporta addirittura tempi di attraversamento maggiori dell'FMS rispetto al job-shop.

Nel caso della Rossi Motoriduttori, ipotizzando un reparto job-shop che svolga le funzioni equivalenti all'FMS con  $X = 0,25$  e  $n = 7$ , si ha:

$$FS_{\text{MIN}} = 63 \cdot \frac{0,25}{7} = 2,25 \text{ ore/giorno lotto}$$

In conclusione l'analogia individuata tra job-shops e FMS consente di valutare la riduzione del WIP quando si passa da job-shops a FMS. Tale riduzione è formalizzata dalla formula [B].

La formula [B] consente inoltre di valutare la relazione degli effetti del conferimento di un livello di flessibilità all'FMS (formalizzata nel fattore di Scheduling legato agli investimenti) alla riduzione del WIP.

La medesima formula [B] consente infine di legare le minori dimensioni del lotto (formalizzata in un fattore K) alla riduzione del WIP.

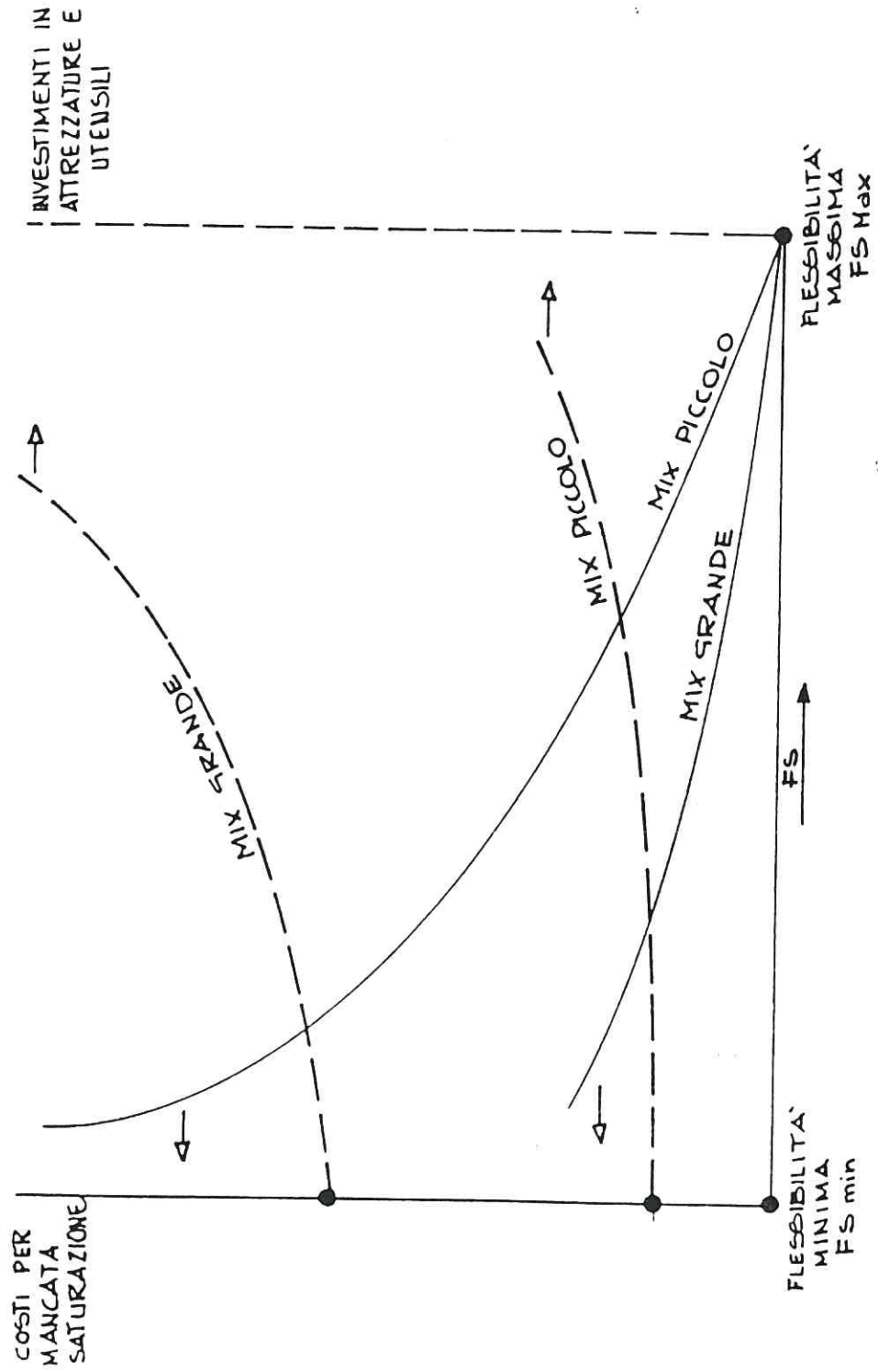


Fig. 7.15 - Relazione tra Fattore di Scheduling FS ed investimenti in attrezzature ed utensili -



APPENDICE DEL  
CAPITOLO 7

N° PROVA	$\alpha$	$l$	$x$	$\Delta t_s/\Delta t_e$	$\tau_b/\tau_i$	$m_s/m_e$	$m_s/m_e$	$\lambda_s/\lambda_i$	$S_s/S_i$	$\beta_s/\beta_i$	$\delta_s/\delta_i$	$D_n$	$D_m$	$D_A$
1	24	36	0.25	1/1	21/21	6/6	54/54	6/6	1/1	1/1	1/1	1	1	1
2	12	"	"	2/2	20/20	3/3	"	12/12	"	"	"	"	"	"
3	"	"	"	"	21/21	"	"	"	"	"	"	"	"	"
4	24	"	"	0.75/0.75	"	6/6	"	6/6	"	"	"	"	"	"
46	"	"	"	2/0	22/20	9/3	84/24	9/3	1.3/0.7	1.3/0.7	1.15/0.85	"	"	"
55	"	"	"	"	"	"	30/10	"	"	"	"	"	"	"
56	"	"	"	"	"	"	50/30	"	"	"	"	"	"	"
57	"	"	"	"	"	"	84/24	"	"	"	"	"	"	"
58	"	"	"	"	"	"	121/41	"	"	"	"	"	"	"
59	"	"	"	"	"	"	242/82	"	"	"	"	"	"	"

Tab. A - Piano delle prove (1)



N° PROVA	$\alpha$	$\ell$	$\chi$	$\Delta T_2 / \Delta T_1$	$\tau_2 / \tau_1$	$n_2 / n_1$	$m_2 / m_1$	$\lambda_2 / \lambda_1$	$\delta_2 / \delta_1$	$\beta_2 / \beta_1$	$\gamma_2 / \gamma_1$	$D_m$	$D_n$	$D_l$
67	18	36	0.3	1/1	21/21	9/3	54/54	6/6	1/1	1/1	1/1	1	1	1
68	24	"	0.25	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
69	36	"	0.16	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
70	24	12	0.25	0.125/0.125	"	6/6	"	3/1	"	"	"	"	"	"
71	"	24	"	0.25/0.25	"	"	"	6/2	"	"	"	"	"	"
72	"	48	"	0.5/0.5	"	"	"	12/4	"	"	"	"	"	"
73	"	96	"	1/1	"	"	"	24/8	"	"	"	"	"	"
74														
75														
76														
77														

Tab. 2 - Piano delle prove (2)



N° PROVA	VALORE DEL PARAMETRO	ESTREMI VARIAZIONE DEL PARAMETRO		ESTREMI VARIAZIONE DEL PARAMETRO		
		$D_n$	$\Delta T$	$\Delta \tau_s / \Delta T$	$\lambda$	$\lambda_s / \lambda$
38	1,1	1	2/0	12	2	5/1
39	1,2	0,5	1/0	36	6	9/3
40	1,3	0,25	9,5/0	48	8	12/4
		0,125	9,25/0	96	16	24/8

N° PROVA	VALORE DEL PARAMETRO	ESTREMI VARIAZIONE DEL PARAMETRO		ESTREMI VARIAZIONE DEL PARAMETRO		
		$D_m$	$\lambda_s / \lambda$	$\tau_s / \tau$	$\lambda$	$\tau_s / \tau$
41	1,1	12	12/12	5/1	9/9	6/2
42	1,2	16	19/9	6/2	6/6	9/3
43	1,3	24	6/6	9/3	4/4	13/5
		36	4/4	13/5		

N° PROVA	VALORE DEL PARAMETRO	ESTREMI VARIAZIONE DEL PARAMETRO		ESTREMI VARIAZIONE DEL PARAMETRO		
		$D_\lambda$	$\Delta T$	$\Delta \tau_s / \Delta T$	$\lambda$	$\lambda_s / \lambda$
44	1,1	12	1	2/0	2	5/1
45	1,15	16	0,5	1/0	6	9/3

Tab. 4 - Piano delle prove (4)

TABULATO N.1 - SUCCESSIONE DATI DA DEFINIRE

```

*****
***** MOSA IN PROCESS SIMULATOR (MIPS) *****
*****
***** FACOLTA' DI INGEGNERIA *****
***** UNIVERSITA' DI PADOVA *****
***** CENTRO DI CALCOLO DEL POLO MECCANICO *****
***** ISTITUTO DI ORGANIZZAZIONE AZIENDALE *****
***** PADOVA 1984 *****
*****

```

INSERISCI I PARAMETRI RICHIESTI

```

VUOI IL B/D/C /S/N/D? N
N. ANNI DI SIMULAZIONE? 1
ATTRAVERSAMENTO MEDIO? 24
LAVORO MEDIO? 36
% MEDIA PERCENTO? .25
VALORE SUPERIORE DEL DELTA? 2
VALORE INFERIORE DEL DELTA? 0
PASSO DEL DELTA? .1
VAL.SUP.N.GIORNI DEI MESI? 22
VAL.INF.N.GIORNI DEI MESI? 20
N. OPERAZ. MEDIO = 4
LAVORO/OPERAZ. MEDIO= 6
VALORE SUPERIORE NUMERO OPERAZIONI (9/3 )? 9
VALORE INFERIORE NUMERO OPERAZIONI (9/3 )? 3
VALORE SUPERIORE MATERIALI (69 /39 )? 84
VALORE INFERIORE MATERIALI (69 /39 )? 54
VALORE SUPERIORE LAVORO/OPERAZ. (9/3 )? 9
VALORE INFERIORE LAVORO/OPERAZ. (9/3 )? 3
VALORE SUPERIORE COEFFICIENTE ATTRAVERSAMENTO (1.3/.7)? 1.3
VALORE INFERIORE COEFFICIENTE ATTRAVERSAMENTO (1.3/.7)? .7
VALORE SUPERIORE COEFFICIENTE MATERIALI (1.3/.7)? 1.3
VALORE INFERIORE COEFFICIENTE MATERIALI (1.3/.7)? .7
VALORE SUPERIORE COEFFICIENTE LAVORO/OPERAZ. (1.15/.85)? 1.15
VALORE INFERIORE COEFFICIENTE LAVORO/OPERAZ. (1.15/.85)? .85
VALORE COEFFICIENTE STIMA NUM. OPERAZ. ? :
VALORE COEFFICIENTE STIMA MATERIALI ? :
VALORE COEFFICIENTE STIMA LAVORO/OPERAZ. ? :

```

TABULATO N.2 - FILE : WIPSI.NP.INP

N. ANNI DI SIMULAZIONE		1		
ATTRAVERSAMENTI MEDIC		24		
LAVORO MEDIC	36			
PERCENTO	25			
VAL.SUPER.DELTA		2		
VAL.INFER.DELTA		0		
FAZIO DEL DELTA		.1		
VAL.SUPER.GIORNI		22		
VAL.INFER.GIORNI		20		
VAL.SUPER.NUM.OPERAZ.		9		
VAL.INFER.NUM.OPERAZ.		3		
VAL.SUPER.MATERIALI		94		
VAL.INFER.MATERIALI		54		
VAL.SUPER.LAVORO/OPERAZ.		9		
VAL.INFER.LAVORO/OPERAZ.		3		
VAL.SUPER.COEFF.ATTRAVERS.		1.3		
VAL.INFER.COEFF.ATTRAVERS.		.7		
VAL.SUPER.COEFF.MATERIALI		1.3		
VAL.INFER.COEFF.MATERIALI		.7		
VAL.SUPER.COEFF.LAVORO/OPERAZ.			1.15	
VAL.INFER.COEFF.LAVORO/OPERAZ.			.85	
VAL.COEFF.STIMA ATT.		1		
VAL.COEFF.STIMA MAT.		1		
VAL.COEFF.STIMA LAV./OPERAZ.			1	
E I C N				
MEDIE MIP	2162.92	2076.17	2127.56	2557.33
2338.68	2453.08			
MED.MOB.MIP	2154.38	2062.96	2101.5	2449.72
2339.54	2393.13			
ERRORI	16.9177	20.0044	17.5771	8.95449
6.81274	0			
ERR.MOB.	12.0706	17.9177	15.5812	6.77952
6.49058	0			

TABULATO N. 3 - FILE: WIPSAGG.AGG

ANNO N.	1			
N.GIORNI TOTALI NELL'ANNO	254			
N. LOTTI ENTRATI ANNO PREC. E USCENTI ANNO IN CORSO				24
N. LOTTI ENTRATI NELL'ANNO	260			
N.LOTTI ENTRATI ANNO IN CORSO USCENTI ANNO SUCC.				28
FABBISOGNO LOTTI DI RESTO ANNO PREC.	432			
FABBISOGNO LOTTI ENTRATI USCITI ANNO IN CORSO				7942
FABBISOGNO PREVISTO LOTTI DI RESTO ANNO IN CORSO				580
FABBISOGNO ANNUO PREVISTO	8954			
DISPONIBILITA' EFFETTIVA ANNUA		9144		
TOTALE STRAORDINARIO	0			
TOTALE ATTESA LAVORO	0			
DIFFERENZA TOTALE STRAOR. E ATTESA LAV.	0			
TOTALE MATERIALI L.R. ANNO IN CORSO		2012		
TOTALE LAVORO CONSUNTIVO L.R. ANNO IN CORSO				1160
TOTALE LAVORO RESIDUO L.R. ANNO IN CORSO	390			
WIP FINE ANNO CON BILANCIO L.R. ANNO IN CORSO				2782
TOTALE LAVORO DISTRIBUITO CON BIL. L.R. A.I.C.				9144
TOTALE MATERIALE ENTRATO	18375			
TOTALE LAVORO DISTRIBUITO	9144			
WIP FINE ANNO CON BILANCIO ANNUALE			2782	
DIFF. TRA LAVORO DISTR. E DISP.EFF.			0	
WIP INIZIALE	2088			
WIP FINALE	2782			
WIP MED.PERC.	.891253	.851522	.872053	1.04012
.976024				

TABULATO N.4 - FILE: WIPSRIS.RIS

ERRORI	16.9177	20.0046	17.8771	8.95449
6.81777	0			
ERR.MOB.	12.0706	17.9177	15.5812	6.77952
6.49058	0			

		metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
prova n.	variabile oggetto di studio	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
1	tutto costante	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00
2	discon- tinuita'	2.08 2.08	2.08 2.08	2.08 2.08	2.08 2.08	2.08 2.08
3	del flusso	3.40 2.21	4.77 2.25	4.77 2.25	2.13 0.74	2.13 0.74
4		0.52 0.52	0.52 0.52	0.52 0.52	0.52 0.52	0.52 0.52



		metodologie di stima				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
prove n.	variabile oggetto di studio	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
5		5.85	6.52	6.52	1.87	1.87
		5.17	5.75	5.75	0.97	0.97
6	range deltat	7.65	7.68	7.68	4.18	4.18
		5.70	6.06	6.06	1.89	1.89
7	+	8.61	11.66	11.66	4.58	4.58
		7.68	8.44	8.44	2.10	2.10
8		11.32	12.56	12.56	6.50	6.50
		7.87	9.44	9.44	3.22	3.22
9		4.01	8.02	8.02	4.79	4.79
		2.36	4.15	4.15	3.51	3.51
10		4.72	11.39	11.39	7.14	7.14
		2.80	5.03	5.03	3.14	3.14
11	range n. operaz. +	7.88	15.19	15.19	7.58	7.58
		5.77	6.58	6.58	3.94	3.94
12		14.10	18.84	18.84	8.57	8.57
		13.00	12.17	12.17	4.31	4.31
13		16.15	27.11	27.11	8.76	8.76
		15.00	15.91	15.91	4.61	4.61
14		1.53	1.47	1.47	1.18	1.18
		0.53	0.54	0.54	0.47	0.47
15	range materiali	3.06	2.94	2.94	2.25	2.25
		0.98	1.04	1.04	0.88	0.88
16	+	3.56	4.08	4.08	3.13	3.13
		1.25	1.57	1.57	1.30	1.30
17		4.98	5.02	5.02	3.98	3.98
		1.32	1.49	1.49	1.51	1.51
18		5.54	6.07	6.07	4.54	4.54
		1.71	1.96	1.96	1.95	1.95

prova n.	variabile oggetto di studio	metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
		errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
19		1.95	2.02	2.02	0.45	0.45
		1.86	1.91	1.91	0.25	0.25
20	range lav./operaz.	2.43	2.60	2.60	0.74	0.74
		2.30	2.33	2.33	0.38	0.38
21	+	3.34	3.91	3.91	1.04	1.04
		2.88	3.17	3.17	0.62	0.62
22		4.97	5.58	5.58	1.31	1.31
		4.45	4.70	4.70	0.70	0.70
23		6.67	7.68	7.68	2.14	2.14
		6.19	6.54	6.54	1.13	1.13

## TABULATO N.7

## RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

prova n.	variabile oggetto di studio	metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
		errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
24		2.50 2.01	7.08 2.66	6.50 1.88	4.65 2.02	4.65 2.02
25	range coefficiente	3.86 2.97	8.88 3.90	8.41 2.88	5.98 3.14	5.98 3.14
26	attraversam. +	5.66 4.65	12.04 5.73	10.50 3.70	6.78 3.83	6.78 3.83
27		9.34 8.52	14.89 9.39	12.54 4.20	6.69 3.28	6.69 3.28
28		14.67 14.39	19.70 14.83	14.10 5.02	6.56 3.24	6.56 3.24
29		0.99 0.29	0.77 0.46	0.77 0.46	1.39 1.27	0.80 0.28
30	range coefficiente	1.61 0.60	1.58 1.10	1.58 1.10	3.75 3.50	1.29 0.55
31	materiali +	2.22 0.77	2.17 1.61	2.17 1.61	4.48 4.25	1.80 0.76
32		3.09 0.92	2.65 1.86	2.65 1.86	5.05 4.59	2.54 0.95
33		3.39 1.25	3.26 2.19	3.26 2.19	7.05 6.41	2.65 1.10
34		3.18 3.03	3.18 3.03	3.18 3.03	3.18 3.03	0.39 0.38
35	range coefficiente	3.92 3.54	3.92 3.54	3.92 3.54	3.92 3.54	0.52 0.39
36	fav. cooperaz.	4.24 4.17	4.24 4.17	4.24 4.17	4.24 4.17	0.58 1.32
37		4.81 4.45	4.81 4.45	4.81 4.45	4.81 4.45	0.62 0.39

prova n.	variabile oggetto di studio	metodologie di stima				
		[1] errori err.mob.	[2] errori err.mob.	[3] errori err.mob.	[4] errori err.mob.	[5] errori err.mob.
38		8.33 8.33	8.33 8.33	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00
39	deriva attraversam.	20.83 20.83	20.83 20.83	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00
40	+	29.17 29.17	29.17 29.17	0.00 0.00	0.00 0.00	0.00 0.00
41		0.00 0.00	6.94 6.94	6.94 6.94	25.42 25.42	0.00 0.00
42	deriva materiali	0.00 0.00	15.28 15.28	15.28 15.28	39.70 39.70	0.00 0.00
43	+	0.00 0.00	22.22 22.22	22.22 22.22	46.70 46.70	0.00 0.00
44	deriva lavoro	0.00 0.00	4.17 4.17	4.17 4.17	29.82 29.82	0.00 0.00
45	+	0.00 0.00	8.33 8.33	8.33 8.33	43.55 43.55	0.00 0.00
46	tutte le variabili escluse le derivate	14.45 11.94	20.94 13.04	19.08 11.03	11.65 6.84	10.55 5.28

prova n.	variabile oggetto di studio	metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
		errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
47		13.07 11.99	13.83 12.08	13.83 12.08	7.00 3.10	7.00 3.10
48	deltat medio	8.56 6.57	12.97 7.93	12.97 7.93	5.18 1.91	5.18 1.91
49	-	7.06 4.35	7.06 4.83	7.06 4.83	4.60 1.89	4.60 1.89
50		4.17 2.97	5.41 3.42	5.41 3.42	3.53 1.61	3.53 1.61
51		10.21 7.96	13.50 9.10	13.50 9.10	14.41 7.60	14.41 7.60
52	attravers. medio	7.67 6.96	13.01 8.21	13.01 8.21	12.34 6.79	12.34 6.79
53	+	6.97 4.72	11.36 5.22	11.36 5.22	6.21 2.81	6.21 2.81
54		5.04 2.90	10.00 5.42	10.00 5.42	3.94 2.20	3.94 2.20
55		16.30 13.48	26.19 17.15	25.72 17.76	18.78 7.82	18.54 6.88
56		14.56 10.44	22.89 14.01	22.71 14.49	11.04 6.30	10.76 4.93
57	materiale medio +	14.45 11.94	20.94 13.04	19.38 11.03	11.65 6.84	10.55 5.28
58		11.42 7.79	17.92 9.49	15.46 8.78	11.66 6.52	10.04 4.89
59		11.09 7.98	14.33 8.23	14.78 8.73	11.14 6.97	9.68 4.97

prova n.	variabile oggetto di studio	metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
		errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
60		1.79	1.94	1.94	0.59	0.59
		1.52	1.64	1.64	0.34	0.34
61		4.65	4.90	4.90	1.18	1.18
		4.36	4.52	4.52	0.49	0.49
62	lavoro medio +	5.86	6.72	6.72	1.75	1.75
		4.90	5.48	5.48	0.78	0.78
63		6.04	6.54	6.54	2.31	2.31
		5.43	5.66	5.66	1.39	1.39
64		16.24	21.75	21.75	8.45	8.45
		15.34	16.61	16.61	3.98	3.98
65	x media +	13.89	16.73	16.73	7.82	7.82
		12.97	11.32	11.32	3.56	3.56
66		12.02	15.68	15.68	6.02	6.02
		10.97	10.77	10.77	3.06	3.06

## metodologie di stima

prova n.	variabile oggetto di studio	metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
		errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
67	attraversa. medio +	11.39	16.48	16.48	9.60	9.60
		10.13	10.05	10.05	4.95	4.95
68	x media +	7.01	13.84	13.84	7.11	7.11
		4.92	6.61	6.61	2.86	2.86
69		6.73	13.23	13.23	5.85	5.85
		4.31	6.60	6.60	2.60	2.60
70	lavoro medio +	4.27	4.29	4.29	0.26	0.26
		4.23	4.25	4.25	0.17	0.17
71		6.59	6.74	6.74	0.49	0.49
		6.40	6.50	6.50	0.31	0.31
72	deltat medio +	9.40	9.55	9.55	1.23	1.23
		9.09	9.21	9.21	0.69	0.69
73		19.88	20.14	20.14	2.29	2.29
		19.65	19.82	19.82	1.25	1.25

TABULATO N° 11

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

		metodologie di stima				
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
prova n.	variabile oggetto di studio	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.	errori err.mob.
74	job-shop (deltat=1)	14.42 10.44	21.91 13.02	20.89 10.68	11.40 6.98	9.98 4.59
75	fms (deltat=0.25)	12.78 11.58	14.98 12.96	11.33 8.79	21.41 19.65	13.00 7.96
76	job-shop (deltat=0.025)	9.51 8.36	10.22 9.11	6.98 5.73	4.04 3.06	2.86 1.89
77	fms (deltat=0.00625)	6.05 5.74	7.47 7.17	2.78 2.41	18.55 16.58	3.15 1.75



fig. 12-errori all'aumentare del range di deltat

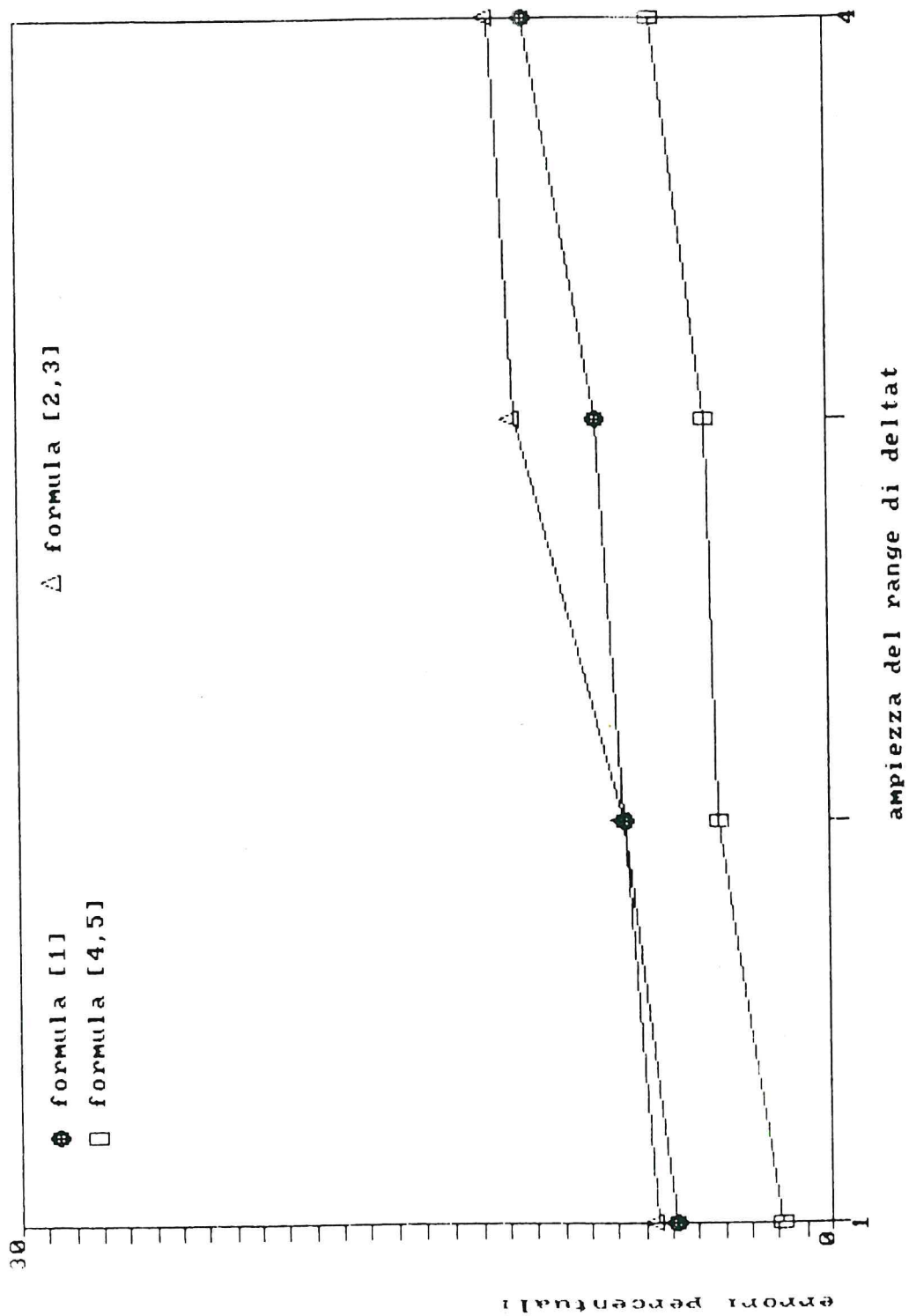


fig.13-errori all'aumentare del range del n.oper.

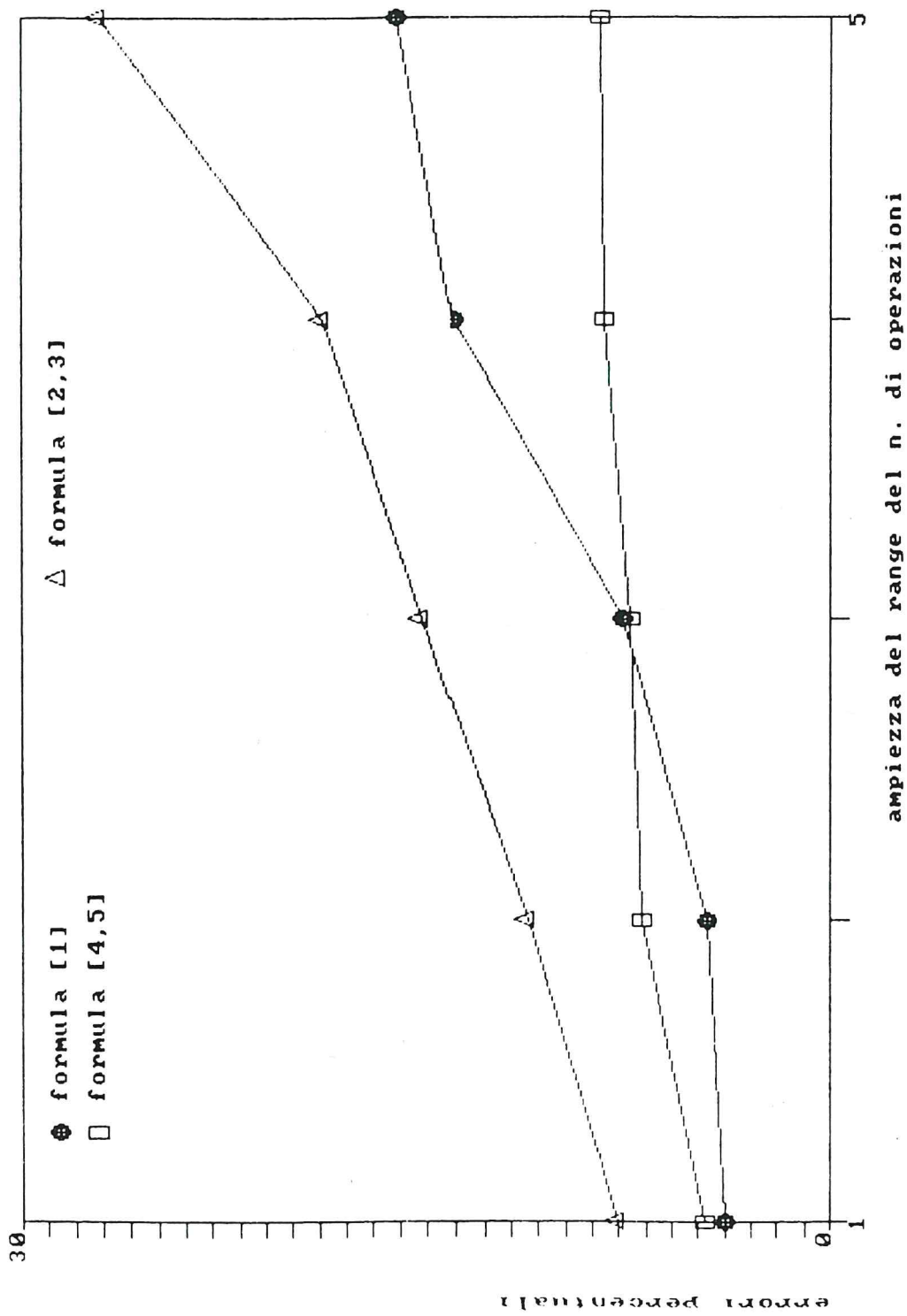


fig. 14-errori all'aumentare del range del mater.

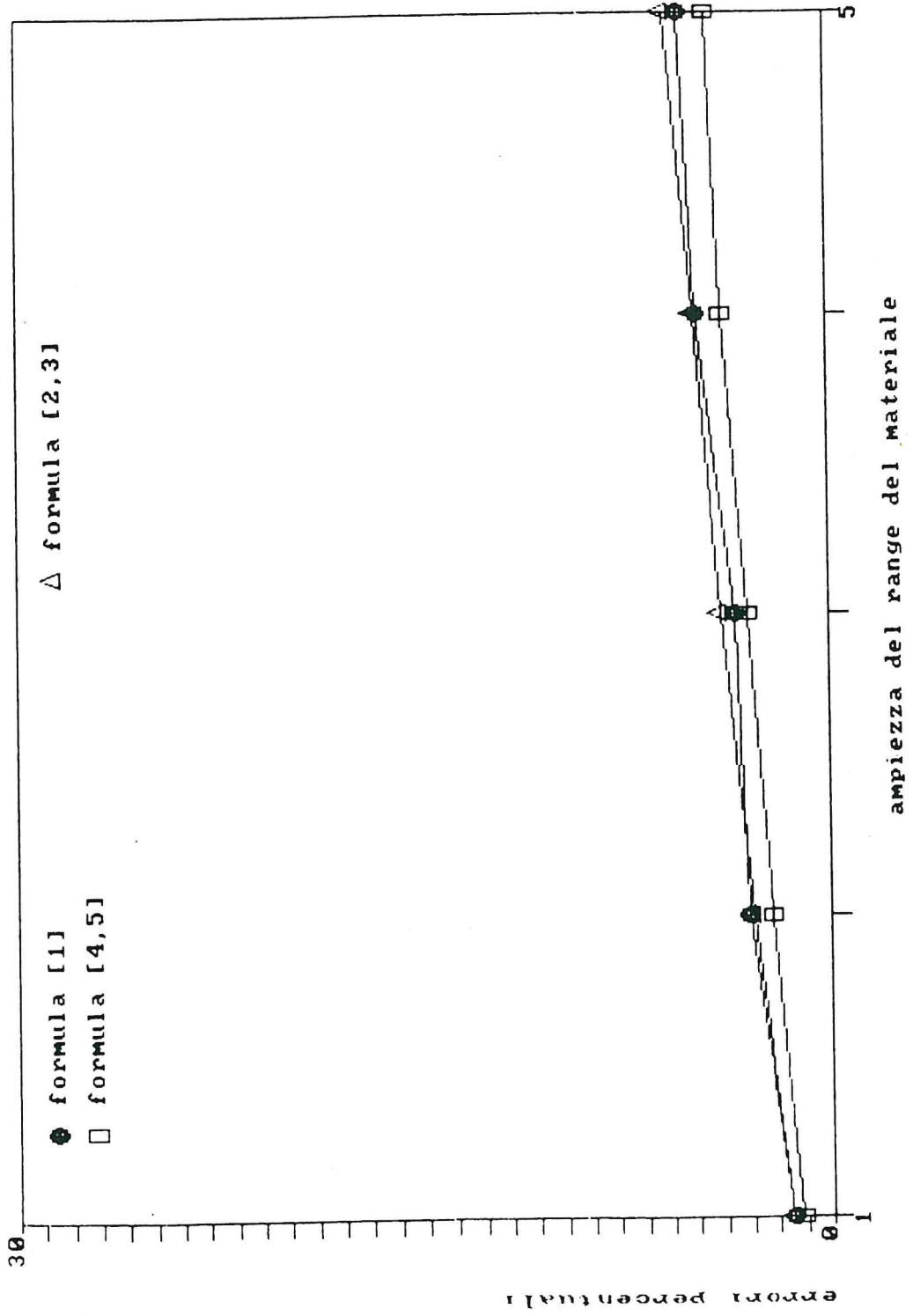


fig.15-errori all'aumentare del range del lavoro

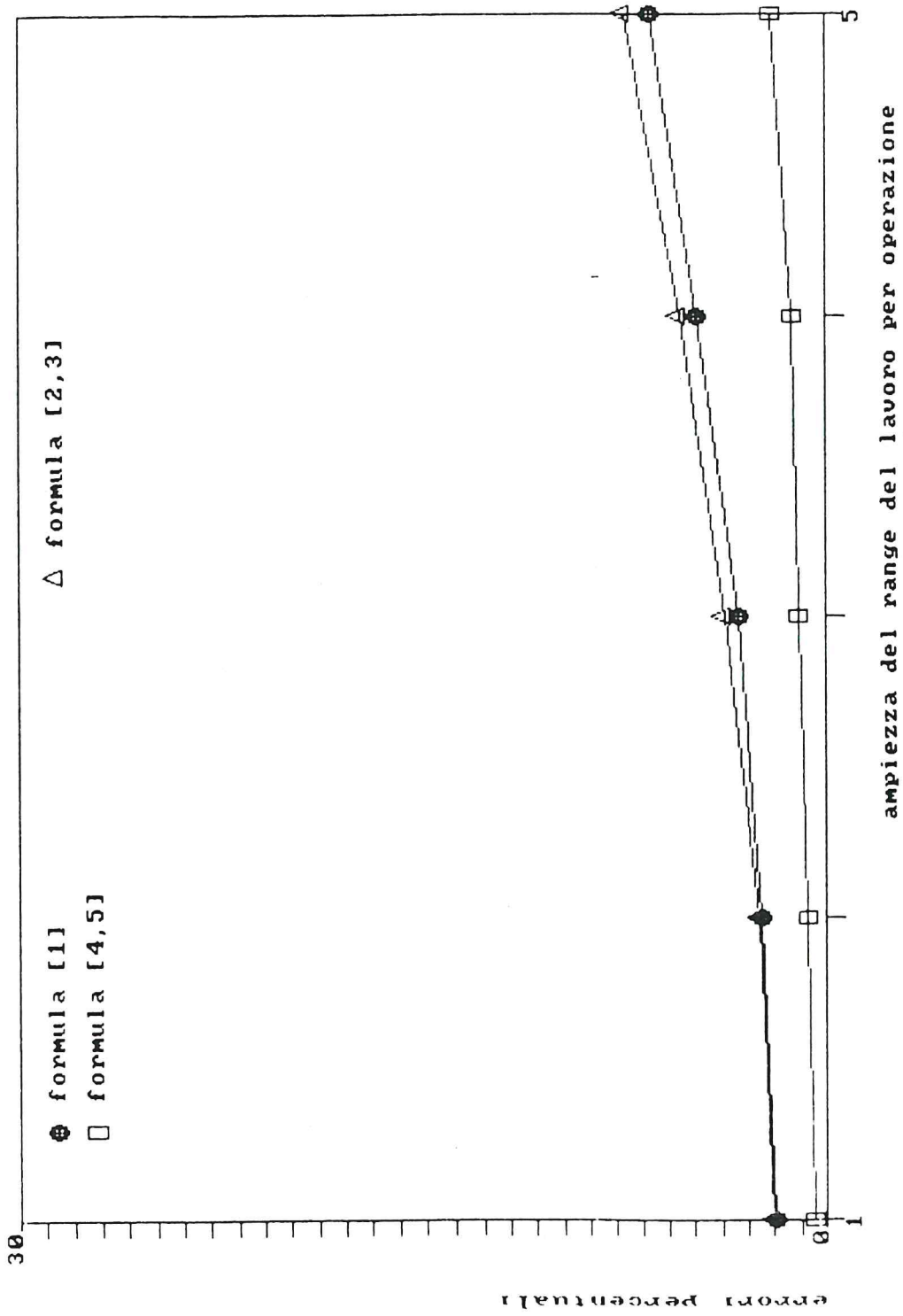


fig.16-errori all'aumentare del range coeff.attr.

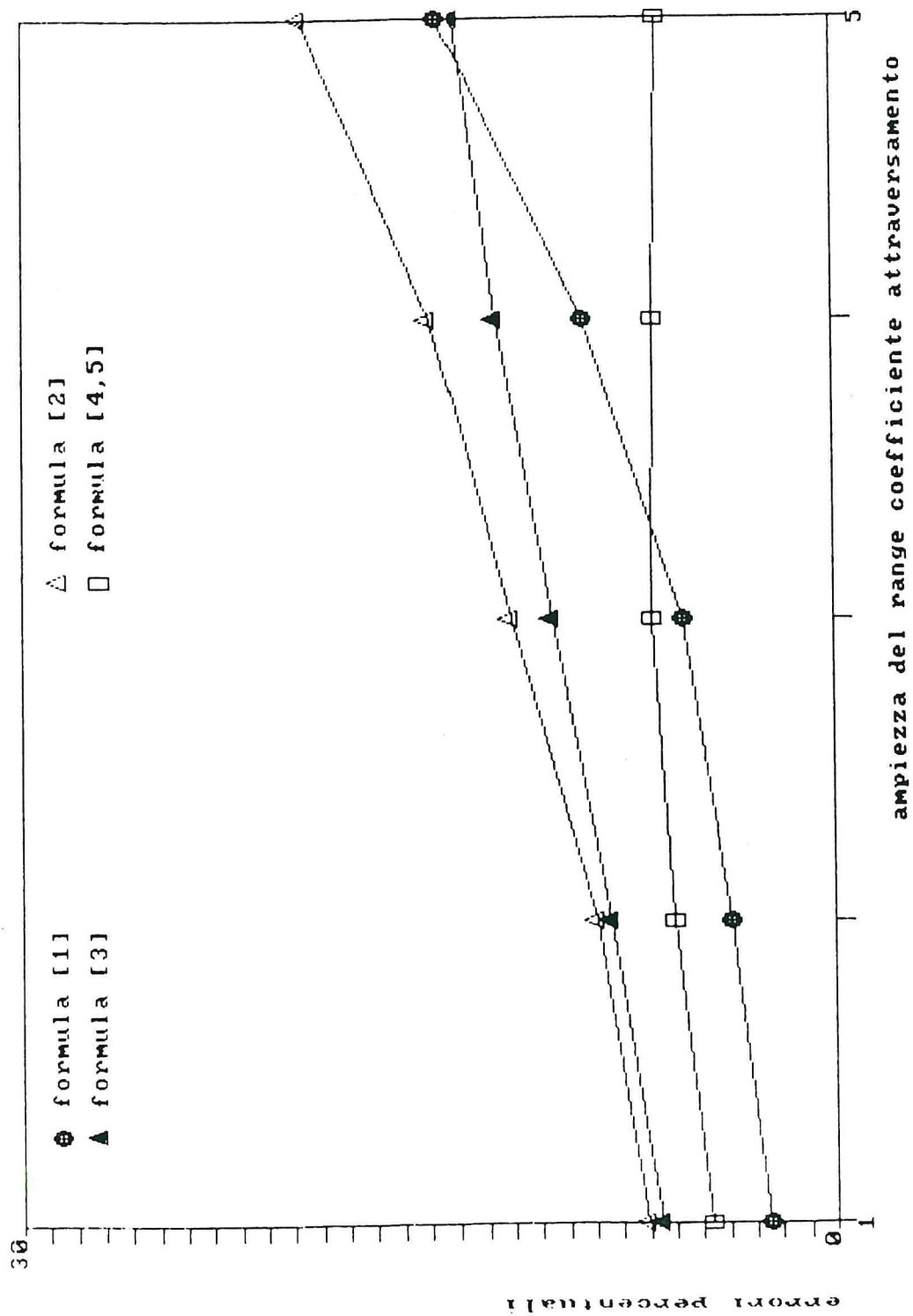


fig. 17-errori all'aumentare del range coeff. mater.

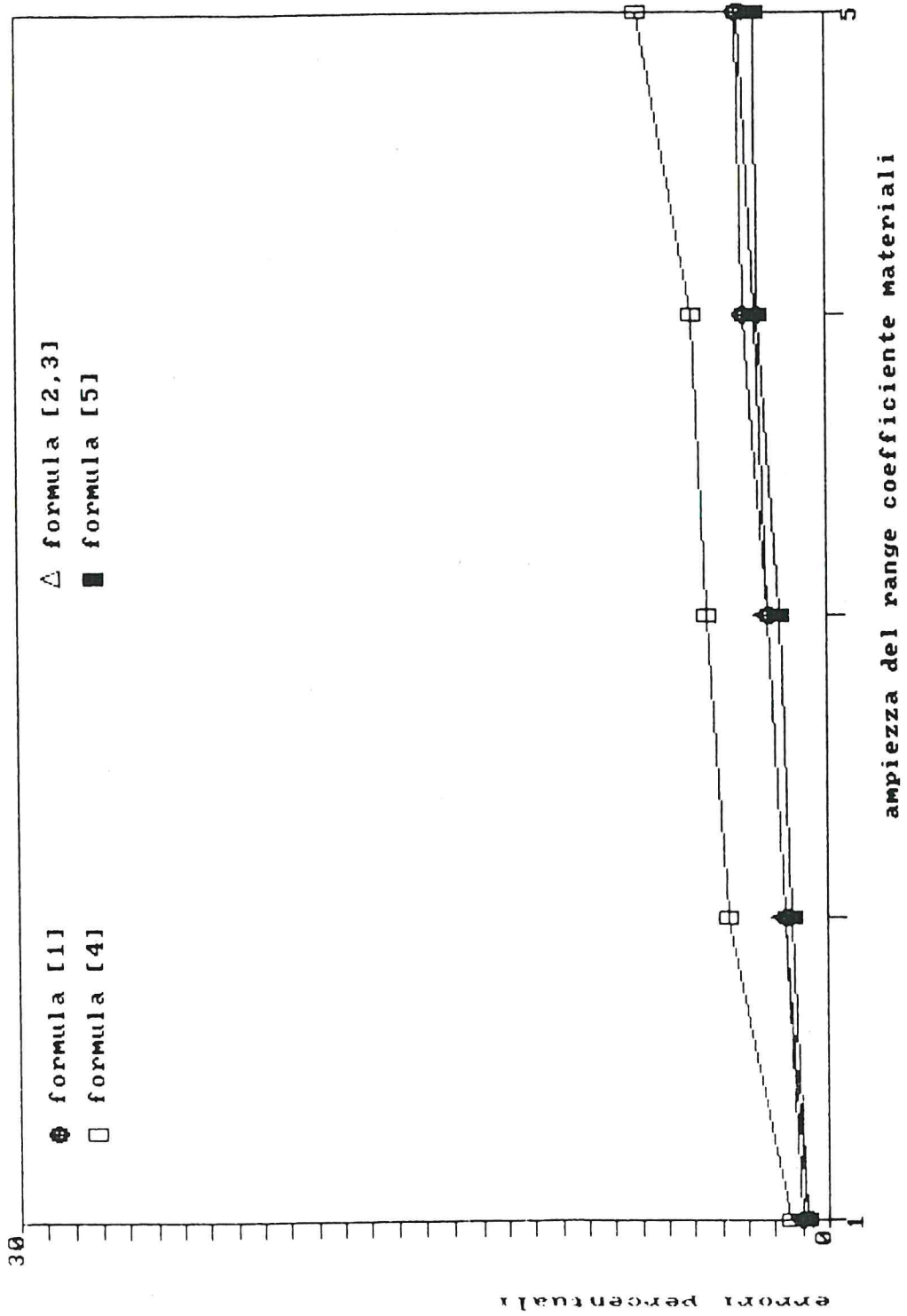
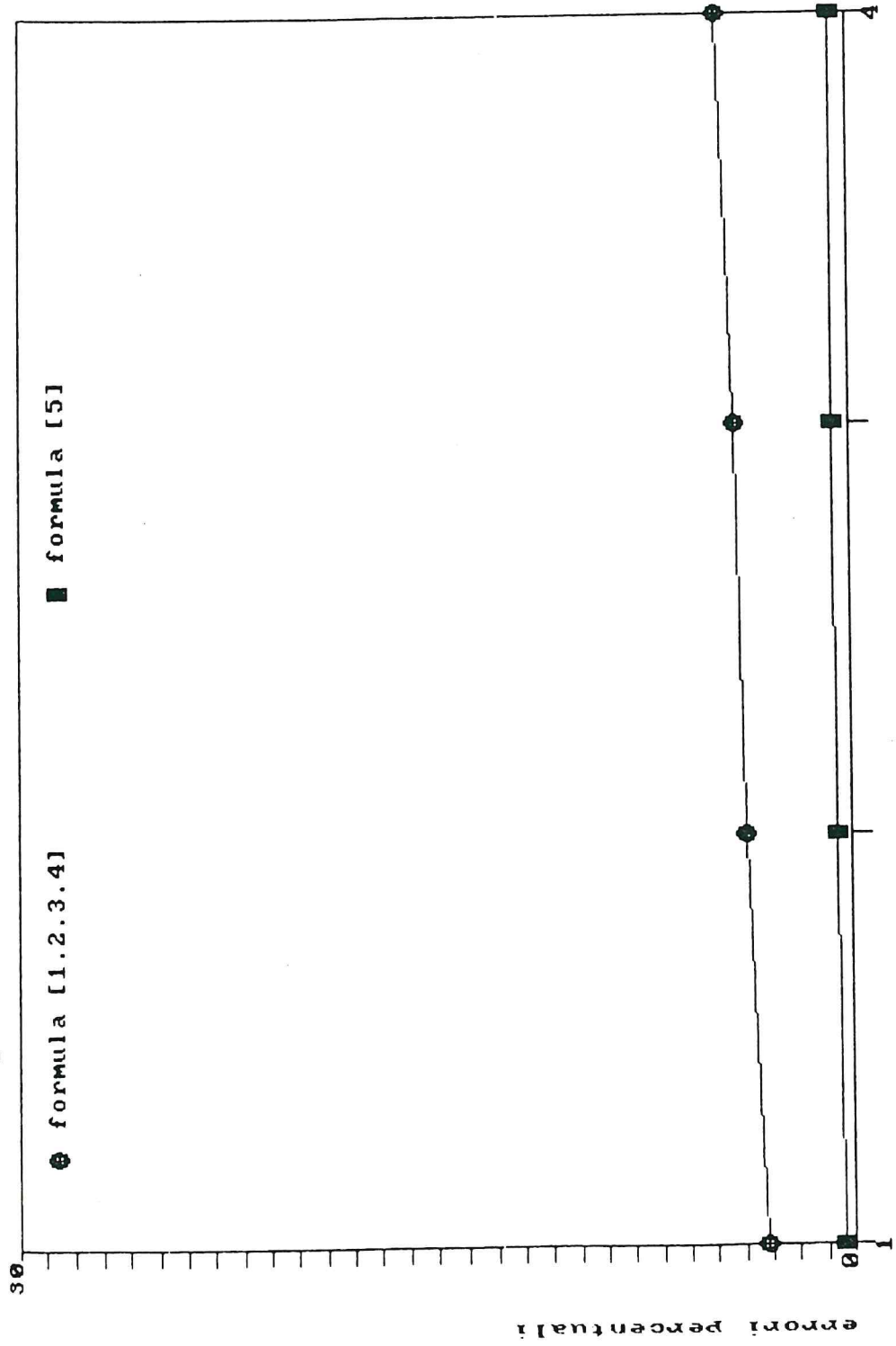


fig.18-errori all'aumentare del range coeff.lavor.



ampiezza del range coefficiente lavoro per operaz.

fig. 19-errori all'aumentare del deltat medio

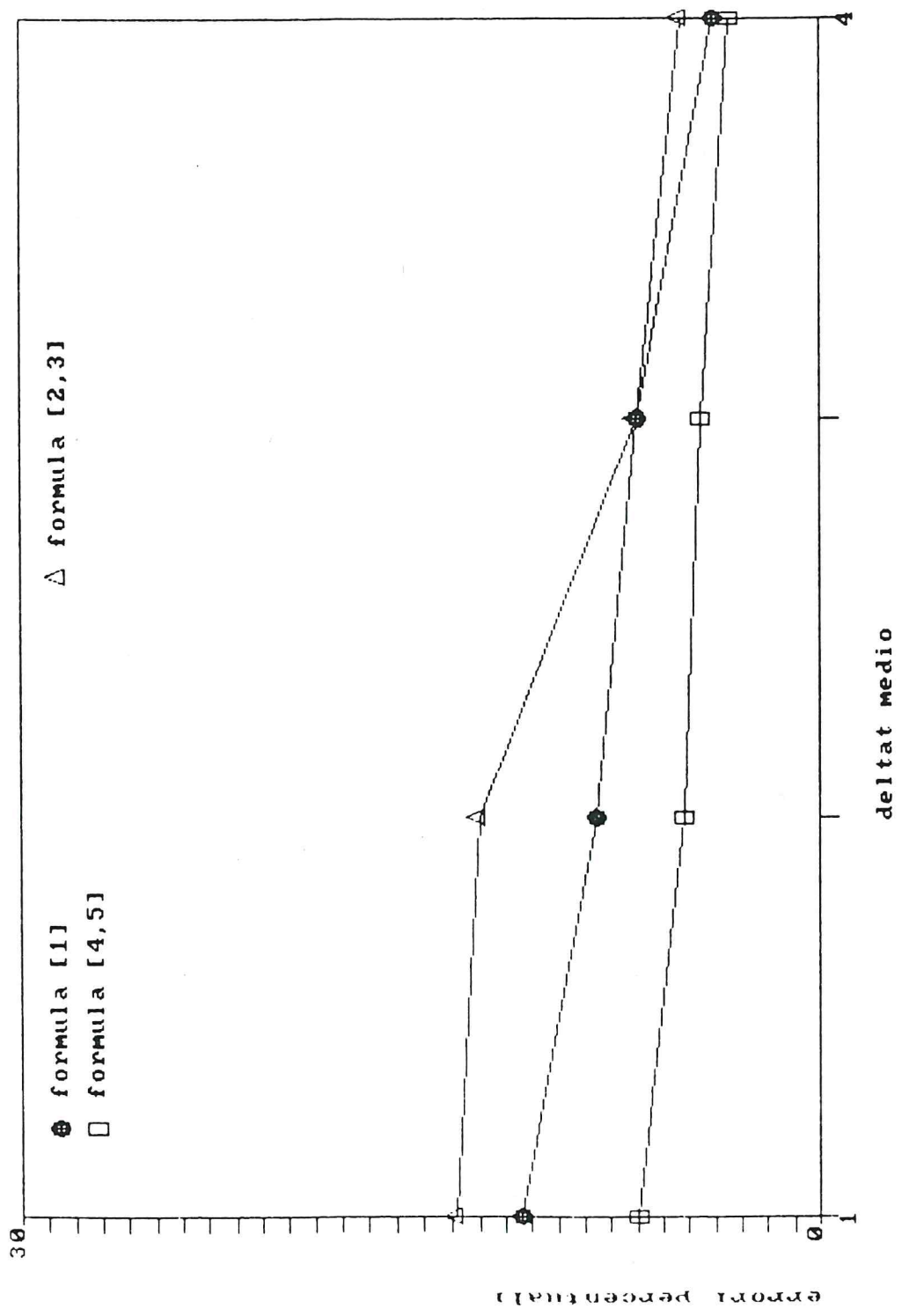




fig. 20-errori all'aumentare dell'attravers. medio

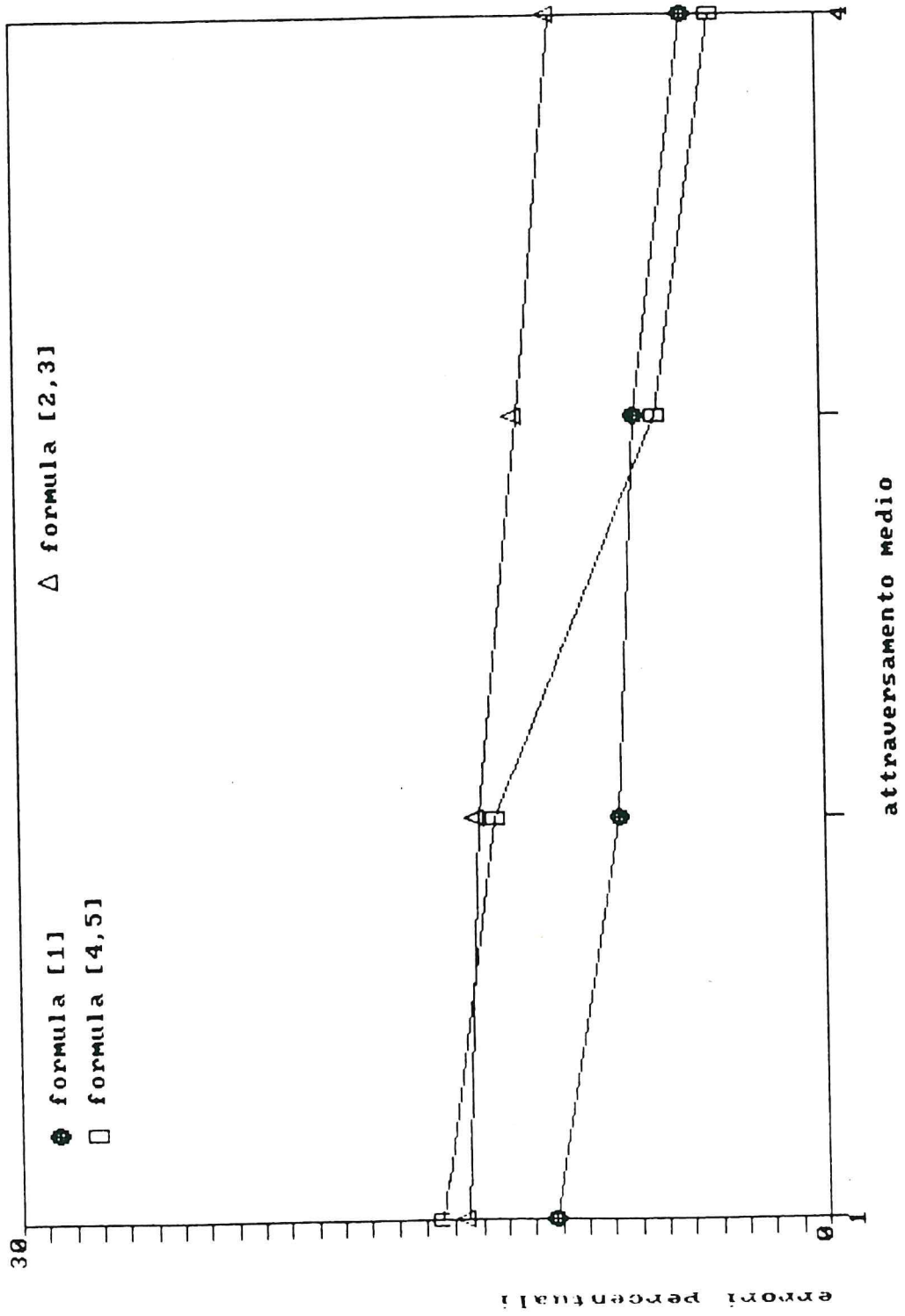
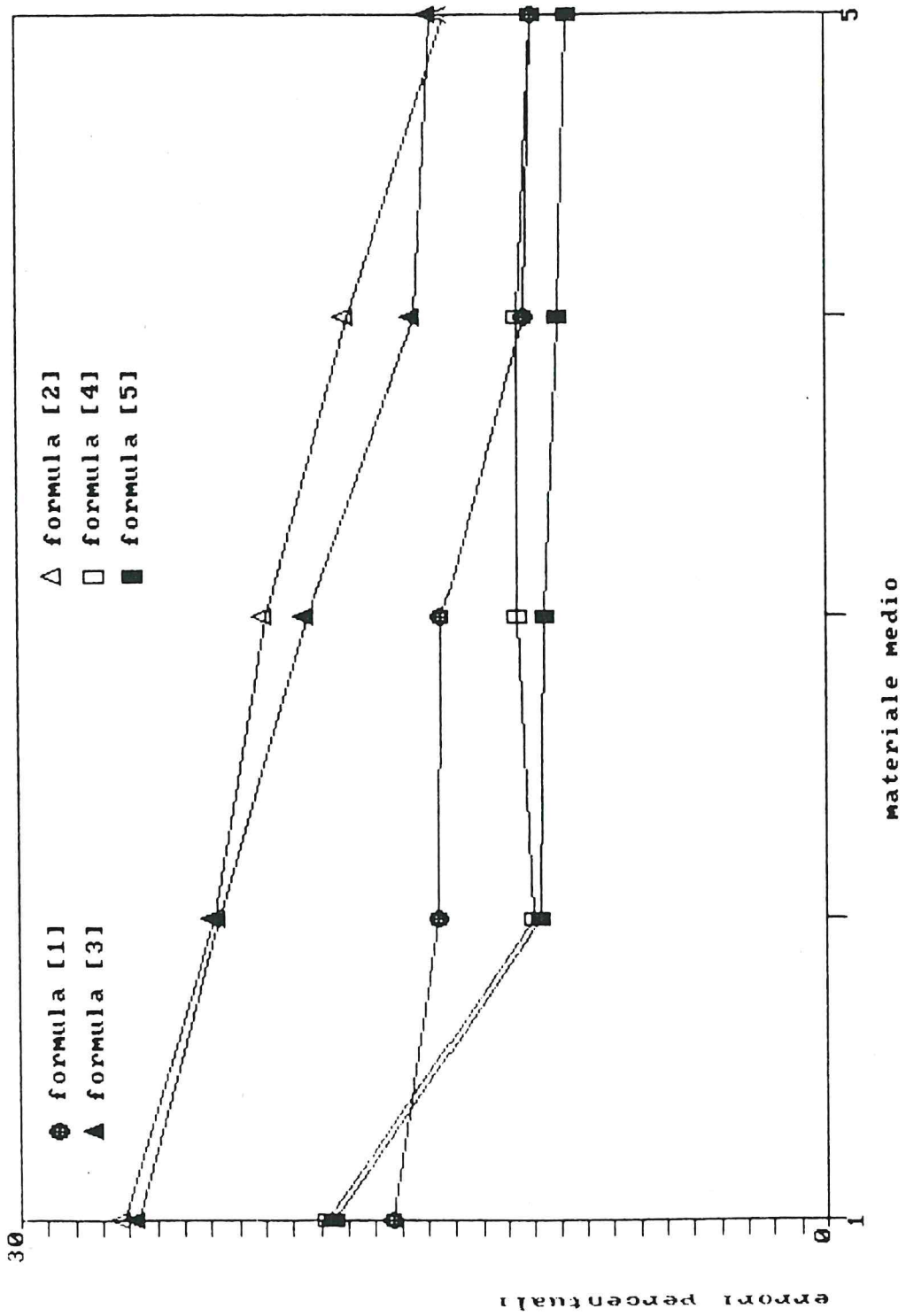


fig.21-errori all'aumentare del materiale medio



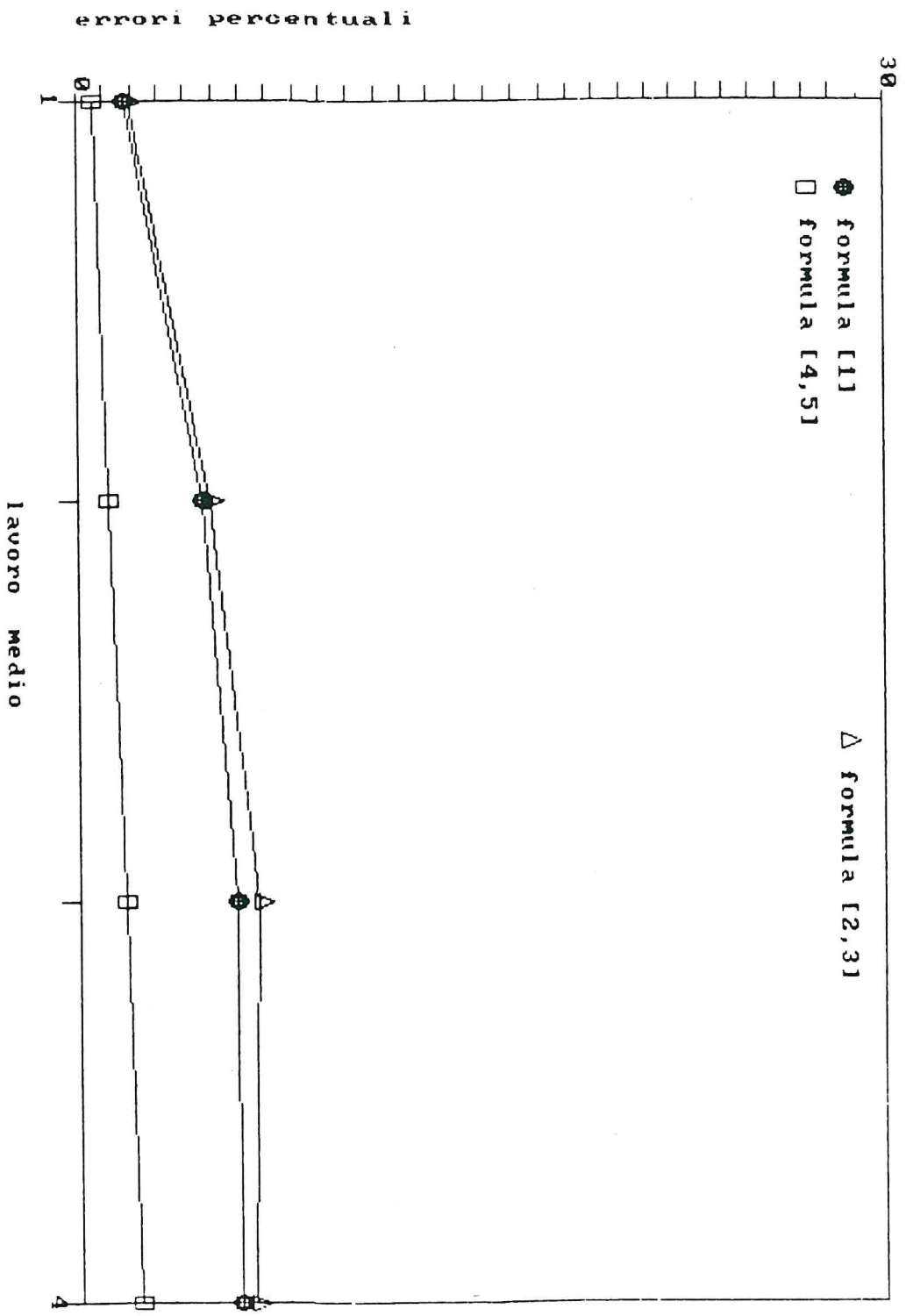


fig.22-errori all'aumentare del lavoro medio

fig.23-errori all' aumentare della x

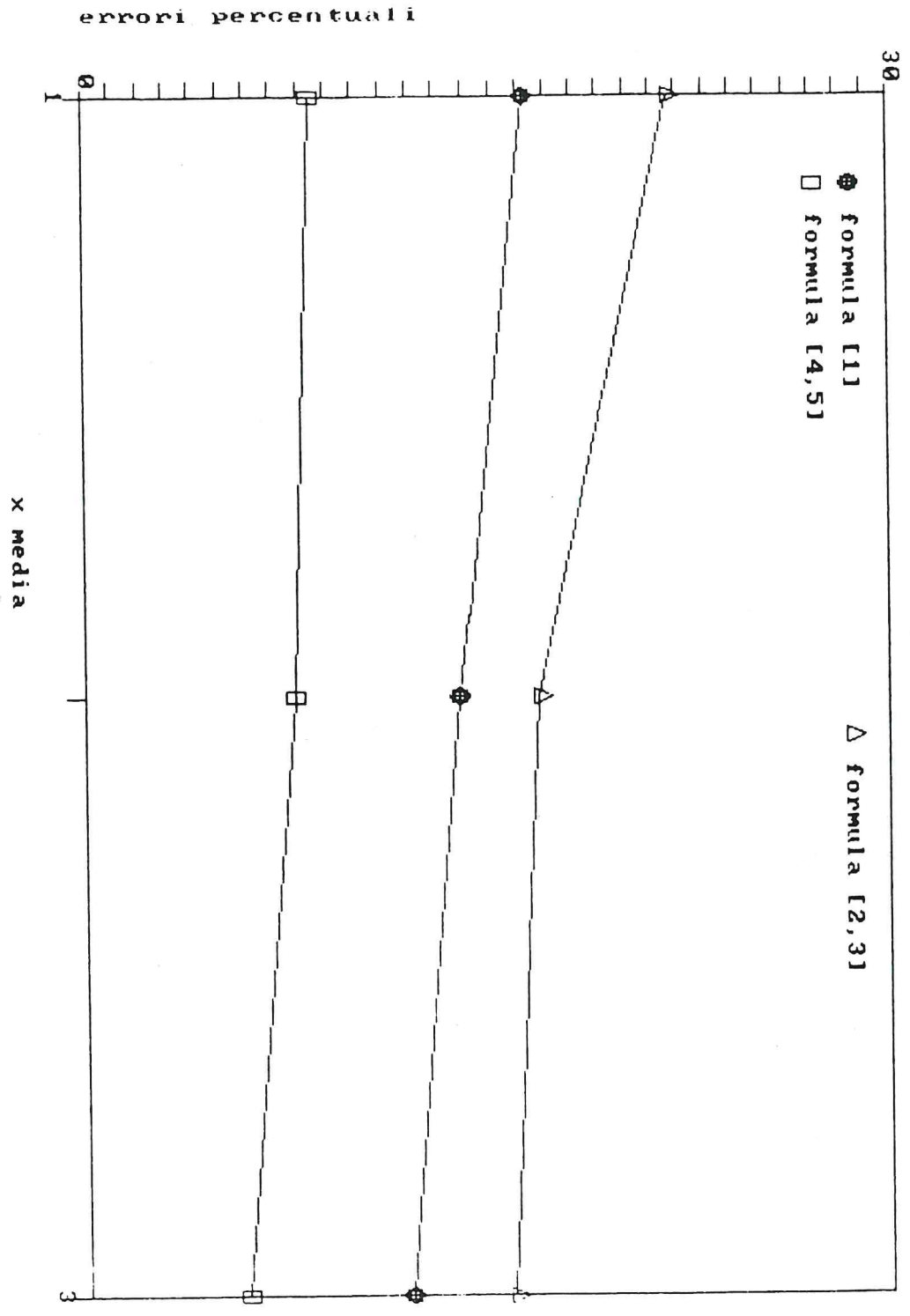
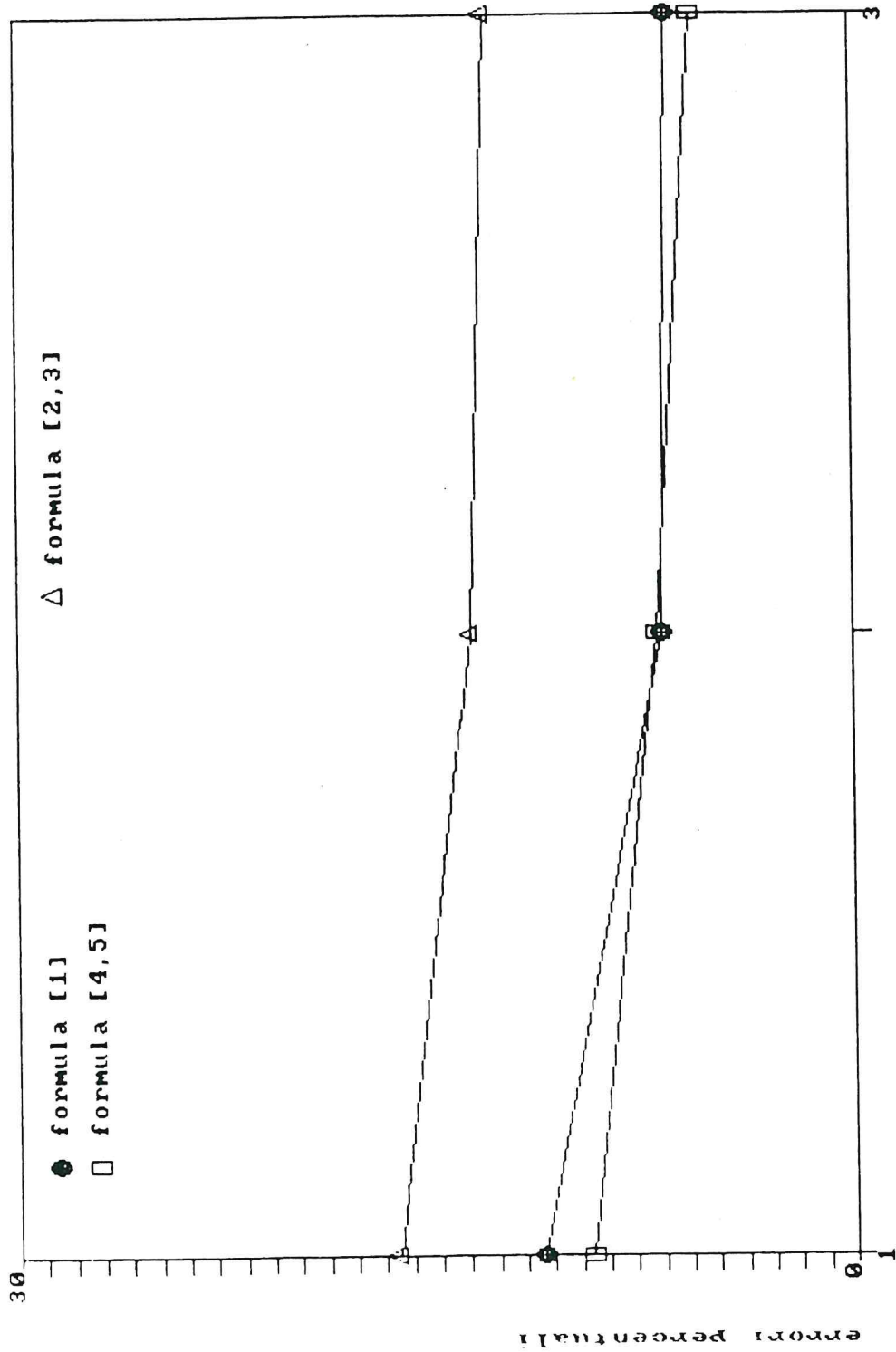
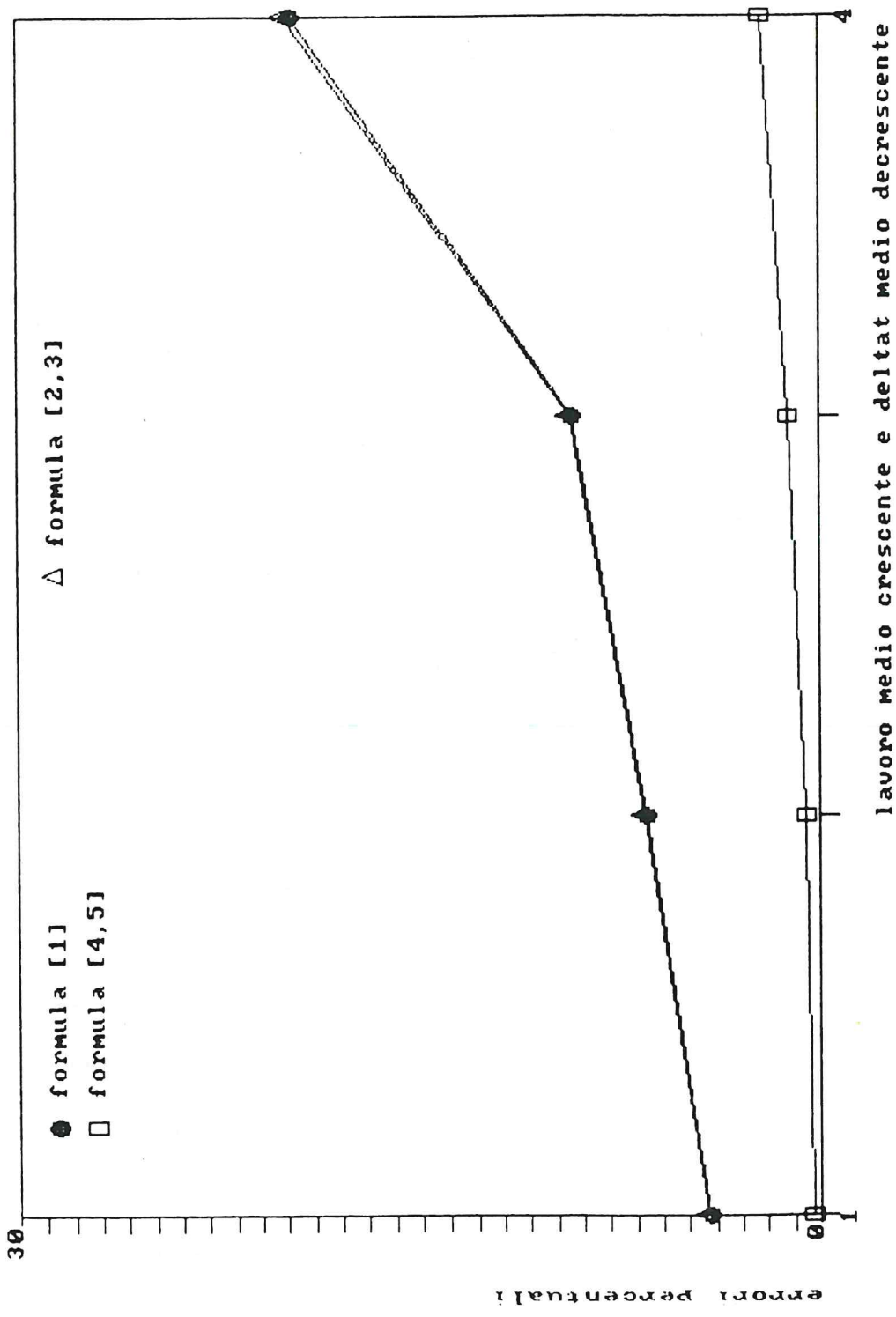


fig.24-errori con attr. crescente e x decrescente



attraversamento medio crescente e x media decresc.

fig.25-errori con lav. crescente e deltat decresc.



## BIBLIOGRAFIA CITATA

### CAPITOLO 1

- F. DA VILLA, *Dispense del corso di Programmazione e Controllo della Produzione*, Istituto di Organizzazione Aziendale, Padova, 1985.
- A. BRANDOLESE, M. GARETTI, *Processi produttivi - Criteri tecnici di scelta e progettazione*, CLUP, 1981.
- F. NOTARIANNI, *Sistemi informativi per la logistica, Sistemi e automazione*, n. 234, 1983.
- H. GRUNWALD, P. VAN DER LINDEN, *On a choice of a production control system*, pubblicazione interna Philips 1978.
- A. BRANDOLESE, G. BRUGGER, M. GARETTI, M. MISUL, *Analisi dei sistemi di produzione manifatturiera*, Finanza, Marketing e Produzione, n. 1, 1985.
- J.L. BURBIDGE, *The introduction of the Group Technology*, William Heine-  
mann Ltd, 1985.
- J.R. KING, N. NAKORCHAI, *Machine - Component Group Formation in Group  
Technology. Review and Extensions*, Int. J. of Production Research, n. 2, 1982.
- M.P. GROOVER, *Automation Production Systems and CAM*, Prentice - Hall,  
1980.
- M. GARETTI, *Introduzione al CAM*, Pixel n. 4, 1981.
- M. GARETTI, *Tecnologie sempre più automatizzate per l'industria meccanica*,  
Rivista di Meccanica, n. 828, 1985.
- M. VETTORI, A. CAMERA, *Sistemi flessibili di produzione*, Monografie Tecni-  
che RTM, n. 49, 1978.

### CAPITOLO 2

- M.P. GROOVER, 1980, *op. cit.*, vedi bibliografia del Capitolo 1.
- F. TESTI, *I sistemi DNC*, Rivista di Meccanica, n. 853, 1986.
- M.P. GROOVER, E.W. ZIMMERS, 1984, *op. cit.*, vedi bibliografia del Capitolo 1.
- CIBORRA, COLOMBO, PELLEGRINI, VARVELLO, *Le trasformazioni occupazionali in-  
dotte dall'evoluzione tecnologica*, Allegato III, Il settore delle macchine utensili,  
Fast, 1980.
- J.J. SOLBERG, *Analytical Performance Evaluation for the Design Flexible Ma-  
nufacturing Systems*, Proc. 17th IEEE, Conference on Decision & Control, 1979.
- J.J. SOLBERG, *Optimal Design of and Control of Computerized Manufacturing  
Systems*, Proc. 17th IEEE, Conference on Decision & Control, 1979.
- A.M. GAIBISSO, F.G. LEONE, S. ROLFO, I. TRENTIN, *Sistemi flessibili di lavorazio-  
ne: una analisi internazionale*, Bollettino Ceris, n. 17, 1985.
- J. BROWN, et al. *Classification of flexible manufacturing systems*, The FMS  
Magazine, April 1984.
- E. KOENIGSBERG, J. MAMER, *The analysis of production systems*, Int. J. of Pro-  
duction Research, n. 1, 1982.