5

ALBERTO DE TONI

METODOLOGIE DI STIMA DEL WORK IN PROCESS IN SISTEMI PRODUTTIVI JOB-SHOP

Estratto da:
WORKSHOP SULL'INNOVAZIONE INDUSTRIALE

Atti del Convegno
di Bressanone, 26-27 settembre 1985

PADOVA
CEDAM - CASA EDITRICE DOTT. ANTONIO MILANI
1986

METODOLOGIE DI STIMA DEL WORK IN PROCESS IN SISTEMI PRODUTTIVI JOB-SHOP

Alberto De Toni

SOMMARIO: 1. Premessa. — 2. Introduzione. — 3. Le grandezze in gioco. — 4. Il metodo basato sui valori mensili globali di ingresso. — 5. I metodi basati sui valori di singoli lotti in uscita. — 6. Il metodo «misto». — 7. L'inventario mensile quale «metodo» di stima. — 8. Il modello di job-shop. — 9. I quesiti posti. — 10. Il modello di simulazione. — 11. I risultati qualitativi della simulazione. — 12. Le possibili ulteriori linee di ricerca.

1. Premessa.

Nel presente lavoro vengono proposte alcune metodologie per la stima del work in process in sistemi produttivi del tipo job-shop. Il confronto tra le diverse metodologie presentate viene effettuato mediante un modello di simulazione di un processo produttivo job-shop appositamente realizzato. Sono presentati, a livello qualitativo, i risultati della simulazione e le possibili ulteriori linee di ricerca.

2. Introduzione.

Il problema che è stato affrontato è quello della misura del work in process (WIP) in sistemi produttivi con funzioni differenti operanti disgiuntamente, detti anche job-shops. Nelle aziende caratterizzate da tali processi produttivi l'importanza di disporre di strumenti per la stima del 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 ([4]);

— 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.

Misure sufficientemente attendibili sono inoltre tanto più importanti quando in azienda si devono decidere notevoli investimenti in

sistemi automatizzati quali i Flexible Manufacturing Systems (FMS).

I sistemi flessibili di produzione rappresentano, dal punto di vista dell'automazione, la naturale evoluzione dei processi produttivi per cellule (cell production). Ma per le elevate prestazioni ottenibili sia in termini di produttività che di flessibilità, di fatto «gli FMS possono essere visti anche come lo sviluppo naturale dei sistemi transfer, quando si desideri aumentare il loro grado di flessibilità, o dei tradizionali job-shops, nel momento che si voglia aumentare il loro grado di automazione ([1])».

Quindi anche le aziende con sistemi produttivi del tipo job-shop, qualora vogliano perseguire la strada dell'automazione, si trovano ad affrontare problemi di valutazione di convenienza di investimenti in sistemi flessibili di produzione. I vantaggi derivanti dall'introduzione di FMS nelle industrie manifatturiere sono ampiamente descritti in letteratura. Ad esempio ([7]):

— risposta veloce alle mutate richieste di mercato;
— minori lead-times;
— minor spazio richiesto;
— minori costi per i materiali in corso di lavorazione;
— minori costi di trasporto;
— migliore qualità dei prodotti;
— maggiore saturazione degli impianti;
— controllo in tempo reale dei componenti;
— migliori controlli di produzione;
— riduzione dei costi di lavoro diretto e indiretto;
— possibilità di operare su più turni;
— possibilità di integrazione con sistemi CAD/CAM.

Ciò che rimane problematico e che costituisce oggetto di studio è la quantificazione di tali vantaggi. Ad esempio in un recente studio delle Boston Consulting Group sull'industria europea di macchine utensili ([2]) si valuta che l'introduzione di sistemi flessibili di produzione possa ridurre di oltre il 50% i costi del valore aggiunto di produzione (vedi fig. 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 manufatturieri convenzionali e di circa il 20% negli FMS. La riduzione in termini assoluti dei costi dovuti al materiale in corso di lavorazione è pertanto di circa 2/3.

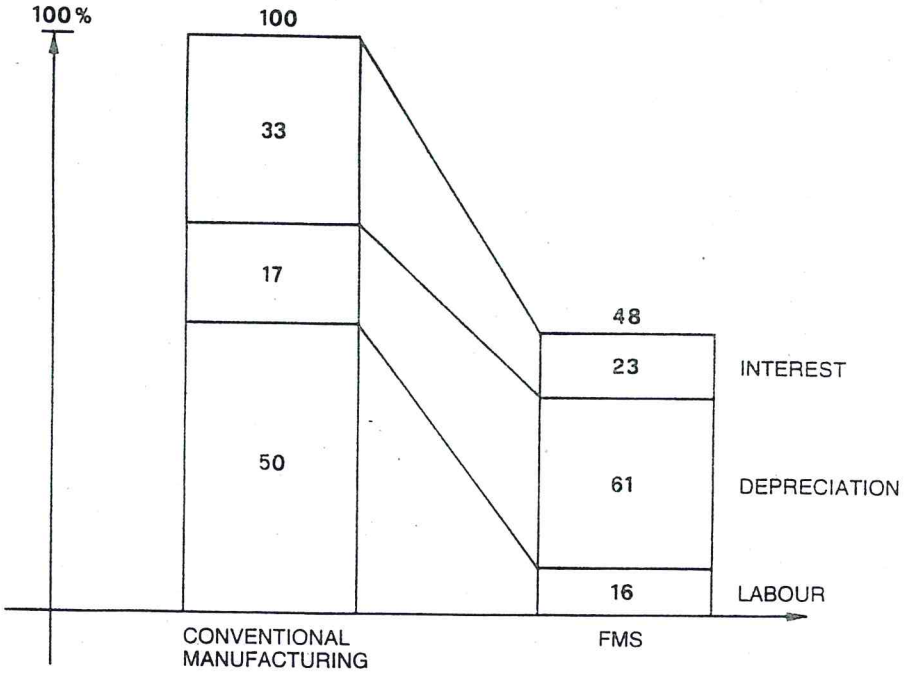

FIG. 1. *Composizione dei costi del valore aggiunto di produzione. Fonte: Boston Consulting Group* (2)

Risulta quindi evidente l'importanza di stimare con sufficiente approssimazione il WIP nel proprio sistema produttivo per poter giungere a valutazioni quantitative sui ritorni degli investimenti in FMS.

Nell'affrontare il problema gli obiettivi che ci siamo posti sono stati i seguenti:

— individuare tra i metodi possibili quelli che stimano il WIP in maniera migliore;
— verificare l'esistenza di particolari «condizioni» che rendono le stime più o meno approssimate.

Una risposta completa ed esauriente a tali quesiti non è stata ancora data; allo stato attuale della ricerca è comunque già possibile fornire dei risultati qualitativi ed esprimere tutta una serie di considerazioni inerenti a molti aspetti del problema.

3. Le grandezze in gioco.

Consideriamo un sistema produttivo job-shop; le grandezze in

gioco importanti ai nostri fini sono le seguenti:

- a = tempo di attraversamento medio standard del sistema [giorni];
- a_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];
- l_i = valore standard dei costi diretti (manodopera, ecc.) imputabili a quel lotto [lire/lotto];
- $\bar{a}_i$ = tempo di attraversamento effettivo del lotto i-esimo [giorni];
- $\bar{m}_i$ = valore effettivo del materiale del lotto i-esimo (materia prima grezza) [lire/lotto];
- $\bar{l}_i$ = 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 del 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 (che nel seguito saranno chiamati «costi diretti»).

4. 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];
- $M = M_e$ = 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 dal sistema produttivo nel mese [lire/mese];
- L = costi diretti totali effettivamente sostenuti nel mese [lire/mese];

$\overline{lav_j}$ = *costi diretti effettivamente sostenuti nel giorno* j-esimo del mese [lire/giorno];

Il simbolo «*lav*» sta per lavoro; si assume infatti che tutti i costi diretti siano inglobati nel costo del lavoro (manodopera).

Possiamo allora scrivere, per il mese che stiamo considerando:

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

$$L = \sum_{j=1}^{\overline{G}} \overline{lav_j} \qquad F_u = M_u + \sum_{i=1}^{U} \overline{l}_i$$

$$Fe = M = M_e$$

Introducendo queste due approssimazioni:

$$M = M_e = M_u \qquad L = \sum_{j=1}^{\overline{G}} \overline{lav_j} = \sum_{i=1}^{U} \overline{l}_i$$

possiamo scrivere:

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

Ipotizzando infine (terza approssimazione) una linearità nel tempo della crescita del valore del materiale in corso di lavorazione (vedi fig. 2), la stima del WIP nel mese che si sta considerando è:

$$\text{WIP} = \frac{F_e + F_u}{2} \frac{a}{\overline{G}} = \left(M \cdot \frac{L}{2}\right) \frac{a}{\overline{G}} \text{ [lire]} \qquad \text{[F1]}$$

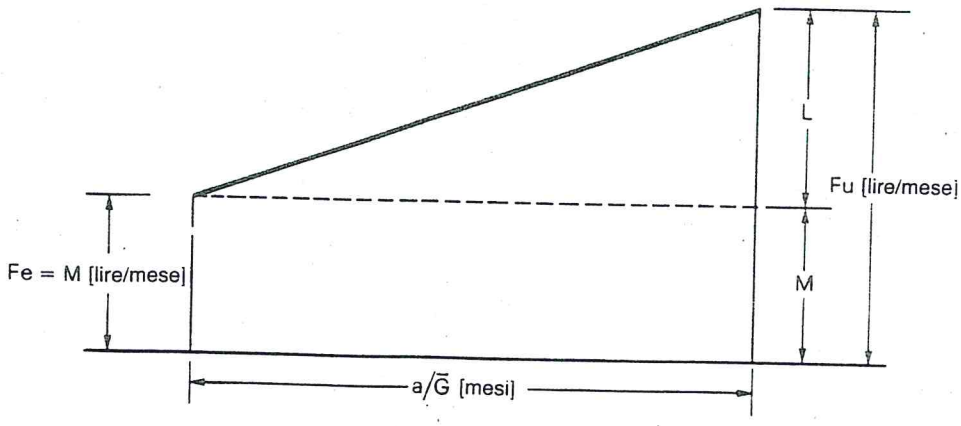

FIG. 2. *Rappresentazione grafica del WIP*

La formula [F1] esprime una stima del WIP, e non il WIP effettivo, perché si basa su tre approssimazioni. L'area sottesa dal trapezio di fig. 2 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 [F1] consente una rapida stima del valore assunto dal WIP come valore medio mensile.

5. I METODI BASATI SUI VALORI DI SINGOLI LOTTI IN 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:

$$\mathrm{WIP}_i = \left(m_i + \frac{l_i}{2}\right) \cdot \frac{a_i}{\overline{G}}$$

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

$$\mathrm{WIP} = \sum_{i=1}^{U} \left(m_i + \frac{l_i}{2}\right) \cdot \frac{a_i}{\overline{G}} \qquad [F2]$$

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

$$\text{WIP} = \sum_{i=1}^{U} \left(m_i + \frac{l_i}{2} \right) \cdot \frac{\bar{a}_i}{\bar{G}} \qquad \text{[F3]}$$

Questi primi tre metodi visti, sinteticamente richiamabili con le formule [F1], [F2] e [F3], sono concettualmente 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 $\bar{a}_i$

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

$$\text{WIP}_{\text{mese}} = \text{WIP}_{\text{mese}-1} + M + L - \sum_{i=1}^{U} \left(m_i + l_i \right) \qquad \text{[F4]}$$

Il metodo quindi 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.

7. 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 formula il WIP a fine mese è dato da:

$$\mathrm{WIP}_{\mathrm{mese}} = \mathrm{WIP}_{\mathrm{mese}-1} + M + L - \sum_{i=1}^{U} \left(\bar{m}_i + \bar{l}_i\right) \qquad [F5]$$

È possibile sin d'ora notare come la formula [F5] si differenzi dalla [F4] solo perché utilizza i valori consuntivi di lotto $\bar{m}_i$ e $\bar{l}_i$, anziché i corrispondenti valori standard m_i e l_i.

8. Il modello di job-shop.

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 standard del sistema [giorni];

m = valore medio standard del materiale dei lotti [lire/lotto];

l = valore medio standard dei costi diretti (manodopera, ecc.) imputabili ai lotti [lire/lotto];

ΔT = intervallo medio di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo di un lotto ed il precedente [giorni/lotto];

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

$\lambda = \frac{l}{n}$ = valore medio standard dei costi diretti (manodopera, ecc.) imputabile ad ogni operazione di un lotto [lire/operazione];

$x = \frac{n}{a}$ = numero medio di operazioni eseguite su un lotto in un giorno [operazioni/lotto giorno].

I valori dei sette parametri sopra definiti non sono tra loro indipendenti essendo gli ultimi due calcolati in funzione di altri precedenti. In generale possiamo dire che a livello aggregato un job-shop può essere descritto in funzione di cinque parametri tra loro indipendenti.

Per quanto riguarda il parametro ΔT, va detto che il suo reciproco $1/\Delta T$ 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]. Il parametro indicato col simbolo x è denominato in gergo «numero di operazioni per lotto e per giorno»; specifici approfondimenti sull'argomento si trovano in (3) e (4). Brevemente possiamo dire che la x è caratteristica di ciascun sistema produttivo. Nei casi realmente osservati tale parametro assume valori che oscillano tra 0,2 e 0,4 (3).

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 $x = 0{,}25$ (cioè ogni lotto subisce una operazione mediamente ogni 4 giorni):

se $n_i = 2$ $a_i = 2/0{,}25 = 8$;
se $n_i = 6$ $a_i = 6/0{,}25 = 24$;
se $n_i = 10$ $a_i = 10/0{,}25 = 40$.

L'importanza del parametro x nella determinazione degli attraversamenti standard dei singoli lotti in funzione del numero di operazioni è evidente. Nella definizione delle caratteristiche di un particolare sistema produttivo a livello aggregato, la x è stata pertanto considerata quale parametro indipendente.

Nel modello di simulazione sono stati assunti come parametri indipendenti a livello aggregato a, l, m, $m\Delta T$, x; i rimanenti due parametri dipendenti sono stati così calcolati:

$$n = ax \qquad \lambda = l/n = l/ax$$

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 sette medesimi parametri che descrivono il sistema produttivo nel suo insieme:

$a_i = \dfrac{n_i}{x}$ = tempo di attraversamento standard del lotto i-esimo [giorni];

m_i = valore standard del materiale del lotto i-esimo [lire/lotto];

$l_i = n_i \lambda_i$ = valore standard dei costi diretti (manodopera, ecc.) del lotto i-esimo [lire/lotto];

ΔT_i = intervallo di tempo tra l'ingresso nel sistema produttivo del lotto i-esimo ed il precedente [giorni/lotto];

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

λ_i = valore standard di costi diretti (manodopera, ecc.) di operazione del lotto i-esimo;

$x_i = \dfrac{n_i}{a_i} = \dfrac{a_i x}{a_i}$ = numero standard di operazioni eseguite sul lotto i-esimo in un giorno [operazioni/lotto giorno].

In questo caso il numero di parametri indipendenti è quattro anziche cinque, infatti come è possibile notare $x_i \equiv x$ per definizione. Nel modello di simulazione si sono assunti come indipendenti: ΔT_i, n_i, m_i, λ_i, calcolando il valore dei rimanenti parametri dipendenti mediante le formule:

$$a_i = n_i/x \qquad l_i = n_i \lambda_i \qquad x_i \equiv x$$

Il valore di ΔT_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 un dato sistema produttivo una volta definiti, oltre al valore medio, i valori massimi e minimi assunti dai parametri indipendenti di lotto ossia:

$$\Delta T_{MIN},\ \Delta T_{MAX},\ n_{MIN},\ n_{MAX},\ m_{MIN},\ m_{MAX},\ \lambda_{MIN},\ \lambda_{MAX}$$

è possibile verosimilmente ottenere i quattro valori specifici di ciascun lotto ΔT_i, n_i, m_i, λ_i come valori delle variabili casuali discrete X, Y, Z, K, con proprie funzioni di probabilità [6] $P(X)$, $Q(Y)$, $R(Z)$, $S(K)$ e media:

$$E(X) = \sum_i x_i p_i = \Delta T \qquad E(Z) = \sum_i z_i r_i = m$$

$$E(Y) = \sum_i y_i q_i = n \qquad E(K) = \sum_i K_i s_i = \lambda$$

dove ΔT, n, m, λ sono i valori medi a livello di sistema produttivo, e X, Y, Z e K variano all'interno dei sottostanti range:

$$\Delta T_{MIN} \leqslant X \leqslant \Delta T_{MAX} \qquad m_{MIN} \leqslant Z \leqslant m_{MAX}$$
$$n_{MIN} \leqslant Y \leqslant n_{MAX} \qquad \lambda_{MIN} \leqslant K \leqslant \lambda_{MAX}$$

Ogni lotto i-esimo resta completamente definito dagli ulteriori parametri rilevati a consuntivo: $\bar{a}_i$, $\bar{m}_i$, $\bar{l}_i$ definiti al precedente punto 3. Possiamo porre:

$$\bar{a}_i = \alpha_i a_i \qquad \bar{m}_i = \beta_i m_i \qquad \bar{l}_i = \gamma_i l_i$$

dove:

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

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

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

Prima di procedere oltre apriamo un breve parentesi sul coefficiente α_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; α_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:

$$\frac{\sum_{i=1}^{t} \alpha_i}{t} = 1 \quad \textit{bensì sarà} \quad \frac{\sum_{i=1}^{t} 1/\alpha_i}{t} = 1$$

L'ultima relazione è facilmente ricavabile dopo facili passaggi a partire dalla condizione:

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

dove $x_i = \frac{n_i}{a_i} \equiv x$ = n. standard di operazioni per lotto e per giorno del lotto i-esimo

$\bar{x}_i = \frac{n_i}{\bar{a}_i}$ = n. consuntivo di operazioni per lotto e per giorno del lotto i-esimo

Tutto ciò concretamente sta a significare che se un lotto i-esimo accelera di α_i, un altro lotto j decelera di α_j con

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

o, 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:

$$\sum_{i=1}^{s} \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=s+1}^{t} \frac{1}{\alpha_j} = t \qquad \alpha_i > 1 \ , \ 0 < \alpha_j < 1$$

e questo per le caratteristiche intrinseche del sistema produttivo job-shop.
Se dunque sono disponibili i valori massimi e minimi assunti da coefficienti δ, β, γ nel particolare sistema produttivo, ossia

$$\delta_{\text{MIN}} = \frac{1}{\alpha_{\text{MAX}}}, \ \delta_{\text{MAX}} = \frac{1}{\alpha_{\text{MIN}}} \qquad , \beta_{\text{MIN}} \ , \ \beta_{\text{MAX}} \ , \ \gamma_{\text{MIN}} \ , \ \gamma_{\text{MAX}}$$

è possibile anche questa volta ottenere verosimilmente i valori specifici di ciascun lotto

$$\delta_i = \frac{1}{\alpha_i} \ , \ \beta_i \ , \ \gamma_i$$

come valori delle variabili casuali discrete $Y1$, $Z1$, $K1$ con proprie funzioni di probabilità $Q1(Y1)$, $R1(Z1)$, $S1(K1)$ e medie:

$$E(Y1) = \sum_i y1_i p1_i = 1 \qquad E(K1) = \sum_i k1_i \cdot r1_i = 1$$

$$E(Z1) = \sum_i z1_i q1_i = 1$$

con $Y1$, $Z1$, $K1$ che variano all'interno dei sottostanti range:

$$\frac{1}{\alpha_{\text{MAX}}} = \begin{array}{ccccc} \delta_{\text{MIN}} & \leqslant Y1 & \leqslant & \delta_{\text{MAX}} & = \dfrac{1}{\alpha_{\text{MIN}}} \\ \beta_{\text{MIN}} & \leqslant Z1 & \leqslant & \beta_{\text{MAX}} & \\ \gamma_{\text{MIN}} & \leqslant K1 & \leqslant & \gamma_{\text{MAX}} & \end{array}$$

I valori consuntivi del lotto generico $\bar{a}_i$, $\bar{m}_i$ $\bar{l}_i$, differiscono da a_i, m_i, l_i per i soli coefficienti α_i, β_i, γ_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, λ_i, sono stati definiti rispettivamente i seguenti coefficienti validi per tutti i lotti:

$$Dn = n_{i\ \text{vero}}/n_i \quad Dm = m_{i\ \text{vero}}/m_i \quad D\lambda = \lambda_{i\ \text{vero}}/\lambda_i$$

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

$$\bar{a}_i = \alpha_i\,(n_i\,Dn)/x \qquad \bar{m}_i = \beta\,(m_i\,Dm) \qquad \bar{l}_i = \gamma_i\,(n_i\,Dn)\,(\lambda_i\,D\lambda)$$

9. I QUESITI POSTI.

Con riferimento al modello 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, ΔT, x (parametri indipendenti di sistema), con $n = ax$, $\lambda = 1/ax$:

- come variano gli errori di stima all'aumentare della variabilità dei parametri indipendenti di lotto ΔT_i, n_i, m_i, λ_i, attorno ai valori medi di sistema ΔT, n, m, λ, ossia all'aumentare dei range di variazione $\Delta T_{\text{MAX}} - \Delta T_{\text{MIN}}$, $n_{\text{MAX}} - n_{\text{MIN}}$, $m_{\text{MAX}} - m_{\text{MIN}}$, $\lambda_{\text{MAX}} - \lambda_{\text{MIN}}$;
- come variano gli errori di stima all'aumentare della variabilità dei parametri indipendenti di lotto

$$\delta_i = \frac{1}{\alpha_i}\ ,\ \beta_i\ ,\ \gamma_i$$

(scostamenti standard-consuntivo), attorno al valor medio costante 1, ossia all'aumentare dei range di variazione $\delta_{\text{MAX}} - \delta_{\text{MIN}}$, $\beta_{\text{MAX}} - \beta_{\text{MIN}}$, $\gamma_{\text{MAX}} - \gamma_{\text{MIN}}$?;
- 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 Dn, Dm, $D\lambda$ (effetto derive)?;

— come variano gli errori di stima al variare dei contesti produt-

tivi, cioè al variare dei valori medi a, m, l, ΔT, x che caratterizzano i diversi job-shop? O ponendo in altri termini la domanda: esistono particolari «condizioni» che rendono le stime più o meno approssimate?

10. Il modello di simulazione.

Per rispondere a tutte le domande formulate ed effettuare il confronto tra i diversi metodi di stima, è stato sviluppato, presso l'Istituto di Organizzazione Aziendale dell'Università di Padova, un modello di simulazione di tipo stocastico ad eventi discreti di un sistema produttivo job-shop. Il modello è completamente parametrico e funziona in modalità sia bacth che on-line. È stato codificato in VAX-BASIC (5) 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.

Il modello simula per un periodo di definirsi (un anno o più) con scansione giornaliera il funzionamento di job-shop: 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.

La descrizione del modello non verrà qui data per ragioni di spazio. Vogliamo solo precisare che:

— viene attribuita a tutte le variabili casuali discrete, nei loro intervalli di definizione, 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. (6));

— il WIP alla fine del generico giorno j del mese è calcolato a partire da quello della fine del giorno precedente aumentato 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 $jlav_j$);

e diminuito di:

- costi totali dei lotti usciti nel giorno j:

$$\sum_{2} \left(\bar{m}_i + \bar{l}_i \right)$$

In formula:

$$WIP_J = WIP_{J-1} + \sum_{1} \bar{m}_i + \overline{lav_j} - \sum_{2} \left(\bar{m}_i + \bar{l}_i \right)$$

— il WIP «vero» mensile, definito come il valor medio nel mese del WIP giornaliero, è calcolato come segue:

$$WIP\ VERO = \left(\sum_{J=1}^{\bar{G}} WIP_J \right) \Big/ \bar{G} \qquad [V]$$

— gli errori di ciascuna metodologia di stima sono calcolati mediante la formula:

$$ERRORE = \left(\sum_{s=1}^{MM} \frac{WIP\ STIMATO_s - WIP\ VERO_s|}{WIP\ STIMATO_s} \right) \Big/ MM$$

dove $WIP\ STIMATO_s$ = valore calcolato mediante la formula [F] nel metodo adottato nel mese generico s;
$WIP\ VERO_s$ = valore calcolato mediante la formula [V] nel mese generico s;
MM = n. totale di mesi nel periodo considerato (uno o più anni).

11. I RISULTATI QUALITATIVI DELLA SIMULAZIONE.

Prima di passare ai risultati qualitativi della simulazione vogliamo solo osservare che durante lo svolgimento della ricerca è stata notata la presenza di errori sistematici. Le cause di tali errori è stata indivi-

duata nelle discontinuità del flusso entrante/uscente. Infatti in condizione di costanza di tutti i parametri in gioco gli errori di stima per tutte le formule sono nulli, purché il $\Delta T = \text{cost}$ comporti un flusso entrante/uscente non discontinuo. Mentre ad esempio valori costanti quali $\Delta T = 0{,}1$ o $0{,}5$ determinano l'ingresso giornaliero di un numero costante di lotti, così non può dirsi per $\Delta T = 2$ o $0{,}45$.

È possibile dimostrare che per valori interi costanti di $\Delta T > 1$ e in condizioni di costanza di tutti parametri in gioco, per tutte le metodologie di stima l'errore sistematico è dato da:

$$\text{ERRORE SISTEMATICO} = \frac{\Delta T - 1}{a} \frac{l}{2m + l}$$

Analoghe formule anche se più complesse sono state ricavate per $\Delta T < 1$. Gli errori calcolati in tale modo sono stati ottenuti anche tramite simulazione a conferma della validità delle formule individuate.

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 ([6]). Allo stato attuale della ricerca un calcolo di questo tipo non è stato ancora eseguito e pertanto verranno qui presentati risultati e trends da un punto di vista qualitativo, utilizzando valori da considerarsi validi solo a livello indicativo.

A partire da un job-shop caratterizzato dai seguenti valori medi: $\Delta T = 1$ $a = 24$ $l = 36$ $m = 54$ $n = 6$ $\lambda = 6$ $x = 0{,}25$ si è ottenuto, per quanto concerne la [F1], 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
ΔT_i	± 100%	10%
n_i	± 80%	10-15%
m_i	± 90%	5%
λ_i	± 90%	5%
$\delta_i = 1/\alpha_i$	± 50%	10-12%
β_i	± 50%	2-3%
γ_i	± 25%	3-4%

I comportamenti delle altre formule a livello di trend sono i medesimi, con la differenza che [F2] ed [F3] danno in generale risultati peggiori di alcuni punti percentuali rispetto ad [F1], e viceversa [F4] ed [F5].

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

— [F3], [F4] ed [F5] sono insensibili a derive negli standard di attraversamento, ossia a Dn;

— [F1] e [F5] 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 [F1] ed [F2] errori crescenti da valori nulli fino a valori intorno al 30%. Lo stesso dicasi in generale per [F2], [F3] ed [F4] 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 [F5], [F4], [F1], [F3] ed [F2], 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 ΔT l'errore cresce;

— al crescere di a, ossia di $n = ax$, l'errore cala;

— al crescere di m l'errore cala;

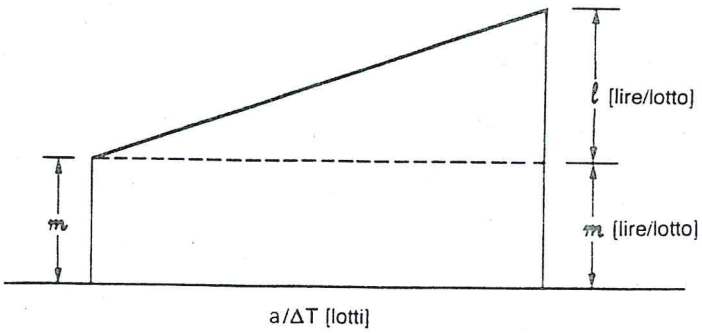

FIG. 3. *Altra rappresentazione grafica del WIP*

— 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. 3 che è simile dal punto di vista grafico alla fig. 2. L'area sottesa dal trapezio è ancora una volta il valore del WIP medio dato da:

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

Se ci è concessa l'approssimazione:

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

$$= \frac{\text{AREA TRAPEZIO - AREA RETTANGOLO}}{\text{AREA TRAPEZIO}}$$

$$= \frac{\text{AREA TRIANGOLO}}{\text{AREA TRAPEZIO}} \frac{1}{2m + l}$$

notiamo appunto come una tale formalizzazione dell'errore spiega i comportamenti dovuti alle variazioni di m ed l.

L'errore risulta però indipendente dal valore di $a/\Delta T$. I trends

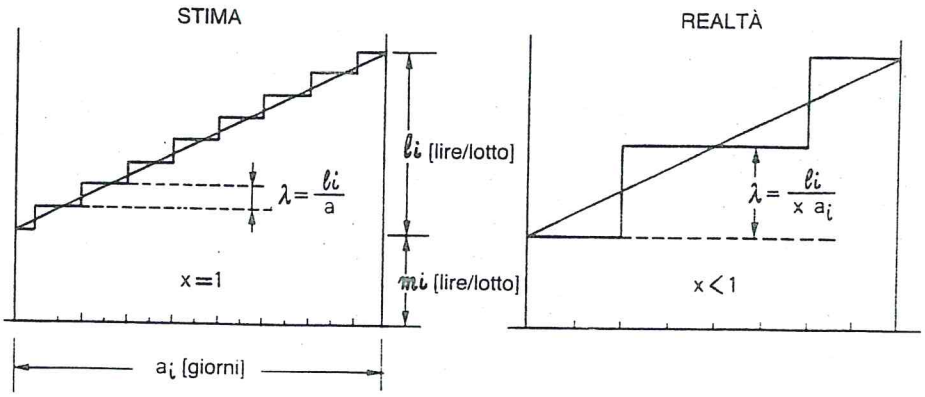

FIG. 4. *Confronto tra λ_i STIMA e λ_i STANDARD*

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 effetto volano di compensazione di tutte le variazioni.

La precedente formula dell'errore sistematico d'altronde

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

sta anch'essa a confermare i trends trovati.

Un modo per motivare l'effetto dovuto alla variabile x può essere quello rappresentato in fig. 4. Nelle stime delle formule [F1], [F2] ed [F3] si suppone una linearità nella crescita del valore del WIP. In altri termini si assume:

$$\lambda_i \text{ STIMA} = l_i/a_i \text{ mentre è } \lambda_i \text{ STANDARD} = l_i/n_i = l_i/x a_i$$

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.

12. Le possibili ulteriori linee di ricerca.

Possono risultare interessanti i seguenti sviluppi:

— realizzare una gestione per singolo lotto dei coefficienti di scosta-

mento tra standard assunti e standard effettivi, anziché unica per tutti;

— tentare l'individuazione di «leggi» per l'individuazione degli errori a partire dalle condizioni medie standard di sistema produttivo;
— estendere anche ai sistemi FMS le metodologie di stima apportandovi tutte le modifiche necessarie.

Bibliografia

1. Brandolese, Brugger, Geretti, Misul: *Analisi dei sistemi di produzione manifatturiera*, Finanza, Marketing e Produzione, n. 1, 1985, pag. 75.
2. The Boston Consulting Group: "Strategic study of the machine tool industry", Summary Report, Commission of the European Communities, 1985.
3. D. Corke: Production Control is Management, E. Arnold, 1969.
4. F. Da Villa: *Programmazione e controllo della produzione*, Etas Libri, 1985.
5. J. Guay: *Programming in VAX-BASIC*, Addison Wesley, 1985.
6. B. Martinoli: Guida alla simulazione, Angeli, 1982.
7. E.J. Phillips: "Flexible manufacturing systems worldwide: advantages, problems, opportunities", ASME, Computers in engineering, New York, 1984.