

## LA GESTIONE DEL LIVELLO DI BUFFER PER LA PROGRAMMAZIONE OPERATIVA IN PROCESSI A CICLO NON DEFINITO

M. Lando, M. E. Nenni    **Dipartimento di Progettazione e Gestione Industriale**  
                                  **Università degli studi di Napoli "Federico II"**  
M. M. Schiraldi        **Dipartimento di Ingegneria Meccanica**  
                                  **Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"**

### Sommario

Viene affrontato il problema della programmazione operativa con riferimento a processi produttivi per i quali non riesce possibile disporre fin dall'inizio di tutte le informazioni al riguardo necessarie. In tali processi (a ciclo non definito) le specifiche del prodotto, non determinate a priori, possono anche mutare in corso di lavorazione, ciò che impedisce l'impiego efficace di sistemi tradizionali di planning.

In precedenza, trattando la stessa casistica, si era scelto di utilizzare un modello statistico appositamente sviluppato per determinare la configurazione probabile dei cicli di lavorazione, impiegato per calcolare un valore atteso del grado di utilizzazione delle risorse di produzione ed individuare possibili colli di bottiglia. In questa sede ci proponiamo inoltre di sincronizzare il flusso produttivo agendo sul *time buffer* posto a protezione della risorsa critica, come sopra individuata. La dimensione ottima del buffer è determinata attraverso il trade-off tra il vantaggio di un'adeguata saturazione dell'anzidetta risorsa critica ed il costo alternativo della coda in attesa. Ciò vale a definire efficaci regole di rilascio dei *job* per le stazioni di lavoro a monte. Il monitoraggio del buffer è necessario inoltre per aggiornare la programmazione al variare delle condizioni operative.

L'efficacia del criterio proposto è stata verificata dagli stessi autori attraverso diretta applicazione presso un'azienda operante nel settore della revisione di motori aeronautici. I risultati ottenuti si sono rivelati più che soddisfacenti in ordine al migliore sfruttamento delle risorse produttive nonché in termini di abbattimento del work in process.

### 1. Introduzione

L'esigenza di offrire configurazioni di prodotto sempre più ampie e la diffusione delle politiche di gestione focalizzate sulla *quick response* hanno progressivamente messo in crisi gli approcci tradizionali alla programmazione della produzione. Non di rado infatti nei moderni impianti industriali le specifiche di prodotto arrivano a mutare anche in corso di lavorazione, alterando inevitabilmente anche i tempi ciclo. Questi ultimi vengono dunque ad essere influenzati in misura di gran lunga maggiore dalle ripetute riconfigurazioni dei programmi di produzione rispetto alle tradizionali cause di rallentamento, come guasti, manutenzioni o set-up. Per questo motivo il numero delle variabili stocastiche in gioco aumenta significativamente, fino ad ostacolare l'efficace impiego di quegli strumenti gestionali che si basano sull'uso di dati di input deterministici.

In particolare in alcuni processi produttivi gli aspetti appena evidenziati assumono una valenza particolarmente critica, in virtù della grande importanza che queste variabili stocastiche rivestono sulle prestazioni del sistema. Tali processi altrove già denominati "*a ciclo non definito (CND)*", risultano caratterizzati dalle seguenti situazioni operative:

- la produzione viene espletata esclusivamente su commessa;
- il ciclo di lavorazione è disegnato *ex novo* di volta in volta a seconda delle caratteristiche della commessa, come ad esempio avviene per i prototipi;
- il grado di utilizzazione delle macchine risente fortemente delle variazioni dei cicli di lavorazione;
- i mezzi produttivi, benché ampiamente flessibili, presentano forti limitazioni in termini di capacità oraria.

Lavorando con i processi CND si soffre della difficoltà di reperire le informazioni necessarie per strutturare le decisioni in merito alla programmazione della produzione. Un parziale contributo alla soluzione di tale problema è rappresentato dalle ricerche sullo sviluppo di un modello stocastico bayesiano, in grado di elaborare le informazioni, comunque incomplete, disponibili prima del lancio di un ordine (come ad esempio alcune informazioni sul committente o alcuni parametri operativi specifici del sistema produttivo in esame) e di estrapolare dati sulla probabile successione di lavorazioni nel processo. Sulla scia di quanto in precedenza prospettato [1], l'obiettivo del presente studio è dunque quello di pervenire ad un criterio di programmazione operativa per i processi a ciclo non definito.

L'idea di base consiste nel concentrarsi sull'analisi di quelle risorse produttive che potenzialmente costituiscono il collo di bottiglia, con il fine di massimizzarne il coefficiente di utilizzo, attraverso la sincronizzazione del flusso produttivo. Tuttavia nei processi CND l'entità e la natura delle modifiche a cui è soggetto il sistema produttivo sono tali che neanche il collo di bottiglia può essere identificato in maniera certa. Infatti, il grado di criticità di una risorsa è determinato dalla particolare e sempre diversa combinazione dei cicli di lavoro necessari per l'evasione delle commesse. Ric conducendo la commessa al caso di un

complesso da sottoporre a revisioni – complesso che dunque fluisce all'interno del sistema produttivo in base ad una sequenza di fasi non immediatamente prescrivibile, ma anzi suscettibile di varianti operative -, si comprende quanto incerta possa risultare la posizione del collo di bottiglia all'interno dello stesso sistema. Altrettanto incerta potrà risultare l'effettiva presenza di ciascuna commessa in coda davanti ad ogni stazione di lavoro. Come conseguenza, in questo ambito, il tradizionale concetto di *stock buffer* appare inadeguato. Più convenientemente infatti converrebbe parlare di *time buffer*, intendendo con questo l'intervallo temporale che descrive l'anticipo dell'istante di arrivo della commessa in coda davanti alla risorsa critica, rispetto al tempo di effettivo impiego.

Lo spirito del criterio qui presentato è quindi quello di individuare la corretta sequenza e la corretta tempificazione del lancio di ciascuna commessa nel sistema a partire dal dimensionamento del time buffer della risorsa critica. Si voglia comunque notare come l'anticipo nel lancio della commessa non possa essere semplicemente ricondotto ad una maggiorazione del lead time di processo per raggiungere più convenienti condizioni di sicurezza bensì, come sarà mostrato in seguito nel dettaglio, rappresenti un'aliquota dinamica il cui controllo continuo consente di scandire il ritmo di produzione e di regolare in tempo reale la dimensione delle code di parti in attesa davanti alle stazioni di lavoro.

Il focus del problema a questo punto può spostarsi sul razionale dimensionamento del time buffer. In un approccio ben noto in letteratura [3] viene posta in diretta relazione la dimensione del buffer con il lead time di produzione; è infatti vero che quanto maggiore è la permanenza delle commesse nel sistema produttivo tanto più le prestazioni di quest'ultimo diventano vulnerabili alle eventuali variazioni dei tempi di lavorazione. Nel caso qui descritto però tale relazione corre il rischio di risultare inapplicabile a causa della intrinseca incertezza da cui sono afflitte tutte le specifiche di produzione. Ulteriore limite del suddetto approccio risiede nella assenza dell'analisi dei costi associati al risultato individuato. Per contro, nel presente lavoro si propone di ricercare il trade-off economico tra l'obiettivo di massimizzare l'utilizzazione della risorsa critica e, in alternativa, quello di minimizzare il costo della coda di parti in attesa.

Nel prosieguo del presente lavoro viene formulata un'apposita proposta risolutiva, strutturata in sottoparagrafi rispettivamente dedicati al metodo di individuazione del collo di bottiglia, alla definizione delle modalità di lancio delle lavorazioni e all'interpretazione dei dati che originano dal monitoraggio del time buffer. Nell'ultimo paragrafo, con opportuno commento, vengono riportati i risultati di un'applicazione del criterio, svolta a cura degli scriventi, presso un'azienda specializzata nella revisione dei motori aeronautici.

## 2. Formulazione del criterio

Generalmente, in ogni tipo di processo, e quindi anche per quelli a ciclo non definito, alcune informazioni di carattere generale (dati relativi al parco clienti oppure allo storico delle commesse) sono presenti prima dell'accettazione degli ordini; altre si rendono disponibili al momento dell'inizio delle lavorazioni. Questa conoscenza, seppure parziale, è utile per estrapolare un'indicazione stocastica in merito alla probabile richiesta di cicli di lavoro.

Sia noto per una commessa un vettore di informazioni iniziali  $\bar{U}$ , e sia inoltre

$E = (E_1, \dots, E_H)$  l'insieme di tutti i cicli di lavoro incompatibili e necessari.

In accordo con un modello precedentemente sviluppato, la probabilità che sia richiesto un ciclo di lavoro  $E_h$  per la commessa in questione è calcolata come una probabilità condizionata nella forma.

$$P(E_h / \bar{U}) = \frac{P(E_h) \times P(\bar{U} / E_h)}{\sum_{h=1}^H [P(E_h) \times P(\bar{U} / E_h)]}$$

E in generale si avrà,  $\forall h = 1, \dots, H$

$$Y = \begin{pmatrix} P(E_1 / \bar{U}) \\ \dots \\ \dots \\ P(E_H / \bar{U}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

dove  $\sum_{h=1}^H P(E_h / \bar{U}) = 1$

perché, come già detto, gli eventi  $E_h$  sono incompatibili e necessari.

Il vettore  $Y$ , di dimensione  $H$ , descrive proprio la configurazione stocastica di tutti i possibili cicli di lavoro per evadere una commessa; ciò che permette di identificare il collo di bottiglia del processo produttivo.

### 2.1 Individuazione del collo di bottiglia

Si definisce generalmente collo di bottiglia di un processo la risorsa (centro di lavoro, stazione di assemblaggio, stazione di collaudo, ecc.) il cui vincolo di capacità limita l'intero flusso produttivo. In un processo CND il collo di bottiglia è la risorsa che, a fronte di una richiesta di lavorazioni, imporrà verosimilmente una strozzatura per il flusso produttivo.

Siano  $M$  le risorse all'interno del sistema e  $N$  le commesse in attesa di essere evase; quindi  $\forall i = 1, \dots, M$  e  $\forall j = 1, \dots, N$  si hanno:

- il vettore di probabilità di richiesta dei cicli di lavoro per la commessa  $j$ ,  $Y^j$ , calcolato come in (1);
- il sottoinsieme dei cicli di lavoro della commessa  $j$  che interessano la risorsa  $i$ , ( $E^{ij} \subseteq E^j$ );
- il tempo ciclo  $TC_{ij}$  che la risorsa  $i$  riserva alla commessa  $j$ .

La probabilità che la risorsa  $i$  sia impegnata da una lavorazione per la commessa  $j$  è espresso da:

$$P_{ij} = \sum_{h=1}^{\hat{H}} P(E_h^{i,j} / \bar{U}^j)$$

dove  $\hat{H}$  è la dimensione del sottoinsieme  $E^{ij}$ . Il valore atteso del tempo in cui la risorsa  $i$  è impegnata da tutte le commesse è invece espresso da

$$E(TR_i) = \sum_{j=1}^N TC_{ij} \times P_{ij}$$

Nell'ipotesi di tempo di carico uguale per ogni risorsa, il collo di bottiglia è dunque individuato dal valore massimo del  $TR$  atteso.

Come già accennato, la posizione del collo di bottiglia non è costante né individuabile in maniera deterministica; infatti l'assetto produttivo, in continua variazione, determina via via lo spostamento della criticità da una risorsa ad un'altra (si ricordi al riguardo che il vettore  $Y^j$ , usato come input, è un vettore di probabilità). Di conseguenza la procedura appena presentata deve essere aggiornata ad ogni lancio di una nuova commessa, o al sopraggiungere di informazioni aggiuntive sulle commesse in corso.

In via generale quindi è possibile identificare, in base all'assetto produttivo in esame, un collo di bottiglia e una serie di risorse "a rischio", per le quali vale la pena comunque prestare attenzione nel gestire il flusso produttivo entrante.

### 2.2 Dimensionamento del time buffer

Il time buffer è rappresentabile come una "riserva" di tempo che, assorbendo le fluttuazioni del sistema produttivo, garantisce una costante disponibilità di commesse pronte ad essere lavorate dalla risorsa identificata come collo di bottiglia. In base a questa definizione - ed a quanto in precedenza accennato -, potremmo ricondurre il time buffer ad un semplice anticipo del momento di lancio delle commesse che interessano la risorsa critica. Si osservi che l'anticipo del lancio di una lavorazione comporta l'incremento del lead time; ciò che si traduce in un accumulo di parti in attesa davanti al collo di bottiglia. Tuttavia nei processi a ciclo non definito anche il solo calcolo operativo di tale anticipo non è agevole in quanto, come già detto, vengono coinvolte una molteplicità di variabili per lo più di natura aleatoria.

È possibile invece considerare la risorsa critica come l'unico servente di un sistema di coda, ad esempio M/M/1; più lunga è la coda di attesa, minore è la probabilità che il servente sia inattivo.

Se dunque chiamiamo,

- $C_1$  il valore economico medio generato dalla risorsa critica per unità processata;
- $C_2$  il costo medio unitario della coda per unità in coda per unità di tempo,

essendo inoltre

$$\mu \times \rho \times C_1 \quad \text{il valore prodotto dalla risorsa critica} \quad (2)$$

$$\frac{\rho^2}{1-\rho} \times C_2 \quad \text{il costo della coda di attesa} \quad (3)$$

il trade-off economico, rappresentato dall'alternativa tra opportunità di saturare il collo di bottiglia ovvero sostenere il costo della coda, si risolve attraverso l'ottimizzazione dalla differenza delle aliquote (2) e (3) (Figura 1)

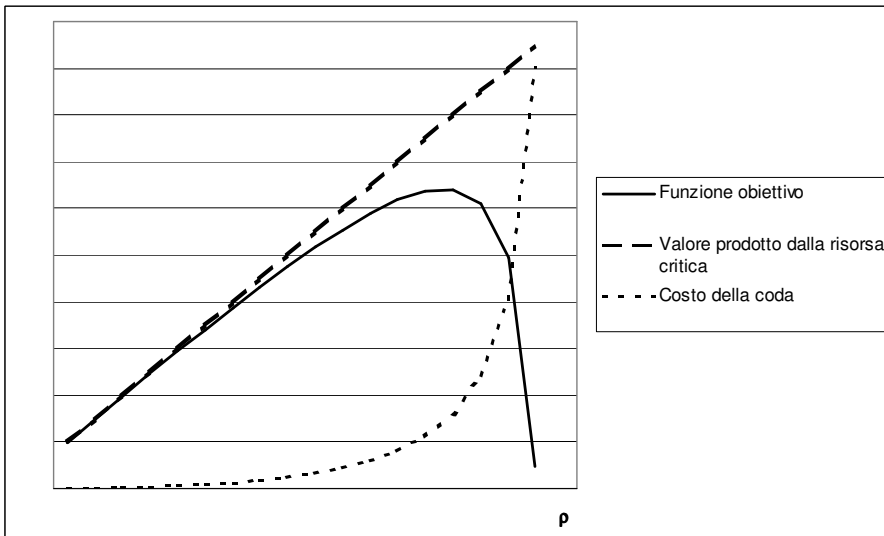


Figura 1: trade-off tra il valore prodotto dalla risorsa critica ed il costo della coda

Sicché ponendo:

$$\frac{d}{d\rho} \left( \mu \times \rho \times C_1 - \frac{\rho^2}{1-\rho} \times C_2 \right) = 0$$

si trae subito

$$\rho^* = 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu \frac{C_1}{C_2} + 1}} \quad (4)$$

come valore ottimo del tasso di utilizzazione del collo di bottiglia.

Risulterà anche

$$\lambda^* = \mu \times \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu \frac{C_1}{C_2} + 1}} \right) \quad (5)$$

il tasso di arrivo delle commesse al servente e

$$L_q^* = \sqrt{\mu \frac{C_1}{C_2} + 1} \times \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu \frac{C_1}{C_2} + 1}} \right)^2 \quad (6)$$

la lunghezza della coda in attesa.

### 2.3 Le modalità di lancio delle lavorazioni

In quanto precede ci si è occupati di ricercare la dimensione ottima di una linea d'attesa davanti al collo di bottiglia in funzione di parametri economici  $C_1$  e  $C_2$ , determinando un tasso di arrivo ottimo  $\lambda^*$ . La stessa conoscenza di tale ultimo parametro permette di sincronizzare opportunamente il processo; le parti devono essere rilasciate in ogni fase in modo che il loro arrivo al collo avvenga con frequenza massima espressa da  $1/\lambda^*$ .

A questo scopo, riuscendo  $t$  l'istante dell'ultimo lancio di una lavorazione, assunto  $t$  come tempo iniziale per la programmazione, definiamo

- $k = 1, \dots, K$  il sottoinsieme di commesse in attesa di lavorazione, che interessano la risorsa critica;
- $TC_k, \forall k=1, \dots, K$  il tempo di processamento atteso per la parte  $k$  fino al collo di bottiglia;
- $TC_t$  il tempo di processamento atteso fino al collo di bottiglia per la parte lanciata all'istante  $t$ .

I due parametri per ultimi introdotti possono essere posti nella forma

$$TC_k = \sum_{i=1}^{M_i} TC_{ik} \times P_{ik} \quad \text{e} \quad TC_t = \sum_{i=1}^{M_i} TC_{it} \times P_{it}$$

dove  $M_k$  e  $M_t$  sono le dimensioni degli insiemi,  $I_k$  e  $I_t$ , delle risorse che ancora interessano, fino al collo di bottiglia, rispettivamente le commesse  $k$  e  $t$ .

L'istante in cui dalla risorsa critica è atteso l'arrivo della commessa oggetto del lancio successivo è espresso chiaramente da

$$t + TC_t + \frac{1}{\lambda^*}$$

Tale commessa rimane individuata da

$$\text{Min}_k \left\{ \left( t + TC_t + \frac{1}{\lambda^*} - TC_k \right) : t + TC_t + \frac{1}{\lambda^*} - TC_k \geq 0 \right\}$$

In definitiva la modalità di sequenziamento propone di lanciare la commessa che si presume possa garantire presso il collo di bottiglia il tempo di interarrivo meglio approssimato a  $1/\lambda^*$  e comunque non superiore.

L'istante di lancio della commessa così selezionata risulta dunque

$$\tau = t + TC_t + \frac{1}{\lambda^*} - TC_k$$

Questa modalità di sequenziamento è ovviamente valida per le sole commesse che chiamano in causa la risorsa critica. Per tutte le altre resta valida la regola di lancio "al più tardi", dal momento che una diversa politica oltre ad aumentare il WIP incrementerebbe la variabilità dei tempi di processamento, che risentono della congestione del sistema.

### 2.4 Controllo di avanzamento della produzione mediante monitoraggio del buffer

Il criterio di sequenziamento descritto nel paragrafo precedente non garantisce che effettivamente le parti si presentino al collo di bottiglia in base al tasso di arrivo calcolato con la (5), a causa della stessa aleatorietà propria ai processi a ciclo non definito. Perciò è opportuno prevedere un monitoraggio della coda, con l'obiettivo di controllare l'avanzamento del flusso produttivo nella direzione del collo di bottiglia. Ne consegue che il monitoraggio del buffer si traduce, secondo questo approccio, nella verifica che la dimensione della coda d'attesa resti quella prestabilita, nonché nella verifica della effettiva presenza delle necessarie commesse in coda. Tale controllo permette di evidenziare eventuali scostamenti dalle previsioni già effettuate in merito ai valori attesi dei tempi di transito delle commesse presso i centri di lavoro. Lo stesso controllo consente, ad un tempo, di intraprendere azioni correttive per garantire il livello di protezione desiderata per la risorsa critica, individuando quali sono le commesse che si trovano in ritardo rispetto ai tempi previsti e perciò esposte al rischio di non raggiungere nei tempi stabiliti il collo di bottiglia.

La procedura proposta prevede che una commessa assente in coda debba essere rintracciata presso stazioni di lavoro a monte, e accelerata fino al raggiungimento del collo di bottiglia. La regola di lancio si modificherà allora in maniera opportuna per tenere conto della priorità aggiuntiva di cui godono alcune commesse.

L'efficacia del monitoraggio è ovviamente commisurata alla frequenza con cui lo stesso viene effettuato, e dipende senz'altro anche da considerazioni di tipo economico. Poiché, d'altra parte, il monitoraggio ha senso finché consente di intervenire in maniera efficace, ne risulta che esso è senz'altro funzione del rapporto tra il tempo di processamento ed il tempo di interarrivo.

### 3. Risultati conseguiti nell'applicazione del criterio esposto

In quanto segue si passa a riferire in merito all'applicazione del criterio esposto che gli scriventi hanno curato presso un'azienda operante nel settore della revisione di motori aeronautici. In tale ambito di processi – tipicamente a ciclo non definito - il complesso oggetto di revisione (per l'appunto un motore per aeromobili) viene preliminarmente disassemblato in *moduli*, ciascuno dei quali seguirà una diversa sequenza di interventi, sulla scorta dell'analisi diagnostica per esso formulata; diagnosi, che tuttavia, non potrà che essere espressa dopo l'avvenuto inizio del processo e comunque non prima della fase di disassemblaggio. Si rende quindi necessario effettuare una programmazione operativa di massima prima dell'inizio del processo di revisione di ciascun motore, basandosi sulle sole informazioni disponibili, nella consapevolezza che detta programmazione verrà rispettata solo in termini di "probabilità".

Lo studio svolto dagli scriventi è stato dunque condotto sottoponendo ad esame un ordine di revisione già evaso, per il quale sono stati resi disponibili i dati relativi agli interventi operati su ciascun modulo componente. Ciò ha offerto l'opportunità di effettuare una puntuale analisi comparativa tra l'efficacia del criterio proposto in questa sede e quella offerta dal sistema già in uso, basato su una semplice politica FIFO. Al solo scopo di non appesantire le presenti note con un'eccessiva numerosità di dati, si è scelto per una migliore comprensione di riportare solamente i calcoli relativi ad alcuni moduli e lavorazioni significative. Al contrario i risultati di sintesi presentati in seguito si riferiscono alla verifica complessiva, che è stata svolta considerando appunto un'intera commessa e tutte le risorse del sistema.

Si è assunto dunque pari a 10, dopo la fase di disassemblaggio, il numero dei moduli principali di un motore da revisionare e pari a 7 il numero di centri operativi presso cui dovranno svolgersi gli interventi più significativi.

Il tempo di processamento atteso su ogni centro operativo è supposto noto, e, in base alla (1) è possibile calcolare la probabilità di visitare un determinato centro operativo in una data fase di lavoro

Nella tabella che segue sono riportati i valori attesi dei tempi (in ore e frazioni di ore) per cui ognuno dei sette centri di lavoro viene impegnato nel corso della settimane; la tabella mostra chiaramente che la risorsa critica è rappresentata da CL<sub>1</sub>.

	CL <sub>1</sub>	CL <sub>2</sub>	CL <sub>3</sub>	CL <sub>4</sub>	CL <sub>5</sub>	CL <sub>6</sub>	CL <sub>7</sub>
E(TR)	38.4	13.2	13.8	10.2	14	11.1	9.6

Per tale risorsa è stato stimato un tasso di servizio  $\mu$  distribuito secondo una funzione esponenziale con valore atteso pari a 0.25 moduli/h; il valore del rapporto dei parametri economici  $C_1/C_2$  è di 327 ore.

Ottimizzando la funzione obiettivo riportata nel paragrafo precedente risulta rispettivamente dalle formule (4), (5) e (6)

$$\lambda^* = 0.22 \text{ moduli/h}$$

$$\rho^* = 0.89$$

$$L_q^* = 7 \text{ moduli}$$

A questo punto è possibile sincronizzare il flusso produttivo dall'ingresso a CL<sub>1</sub> utilizzando come variabile decisionale la frequenza (nel caso in esame  $1/\lambda^* \cong 4.5$  h) che determina l'intervallo di tempo ottimale che trascorre tra due arrivi successivi alla risorsa critica.

Si noti come ora sia possibile applicare i risultati ottenuti per decidere il momento migliore per il lancio della commessa. A partire dall'avvio della revisione del motore infatti è possibile calcolare, in base alle formule precedentemente riportate, i valori dei tempi attesi (in ore) di raggiungimento del CL<sub>1</sub> per ogni modulo.

Questi sono mostrati ad esempio nel vettore sottostante:

	Mod <sub>1</sub>	Mod <sub>2</sub>	Mod <sub>3</sub>	Mod <sub>4</sub>	Mod <sub>5</sub>	Mod <sub>6</sub>	Mod <sub>7</sub>	Mod <sub>8</sub>	Mod <sub>9</sub>	Mod <sub>10</sub>
TC	0	0	4.6	5.3	6.16	7.6	10.6	5.3	9.2	6

Da questa tabella e dal confronto con il valore del tempo di interarrivo ottimale alla risorsa critica è possibile calcolare il corretto sequenziamento e la tempificazione esatta dell'avvio della lavorazione di ciascun modulo, che viene mostrata nel vettore immediatamente successivo:

	Mod <sub>1</sub>	Mod <sub>2</sub>	Mod <sub>3</sub>	Mod <sub>4</sub>	Mod <sub>5</sub>	Mod <sub>6</sub>	Mod <sub>7</sub>	Mod <sub>8</sub>	Mod <sub>9</sub>	Mod <sub>10</sub>
$\tau$	40.6	40.6	0	30.8	16.44	1.5	3	26.3	8.9	21.1

I risultati osservati evidenziano in primo luogo l'efficacia dell'approccio adottato per stimare la richiesta di cicli di lavoro; infatti confrontando i valori attesi dei lead time di processamento dei moduli con quelli effettivamente consumati da parte dell'azienda abbiamo potuto riscontrare un'affidabilità di previsione ben superiore all'85%. Lo stesso dicasi per la stima dei valori del tempo di impegno delle risorse. Inoltre i valori dei tempi di interarrivo e del grado di utilizzazione del collo di bottiglia risultano molto vicini a quelli stimati per il sistema di coda M/M/1; ciò che convalida l'efficace rappresentazione modellistica del comportamento del processo. La tabella sottostante riepiloga i valori ottenuti:

	Stimato	effettivo
$1/\lambda$	4.5 h	4.4 h
$\rho$	0.89	0.85

Infine, per quanto riguarda parametri più prettamente attinenti al processo, richiamiamo in quest'ultima tabella i risultati offerti dall'analisi comparativa da noi condotta.

	soluzione in uso	approccio proposto
$L_q$ media	3 unità	0.2 unità
$L_q$ max	7 unità	7 unità
$TA_{max}$	41 h	47 h
WIP	402 unità	320 unità

Si riscontra che il tempo  $TA_{max}$  di attraversamento massimo risulta incrementato di circa il 14%, ma questo è fisiologicamente riconducibile all'introduzione del time buffer, cioè all'anticipo dei tempi di lancio delle lavorazioni. Tuttavia tale incremento è efficacemente compensato dal vantaggio che si ottiene con la riduzione del WIP di circa il 20%.

#### 4. Considerazioni conclusive

Nel presente lavoro è stato in definitiva presentato un criterio particolarmente efficace per la programmazione operativa dei processi a ciclo non definito. Le ipotesi effettuate sulla disponibilità di alcune informazioni con anticipo rispetto all'avvio delle lavorazioni – e soprattutto quelle relative alle distribuzioni di probabilità dei tempi di lavorazione – hanno consentito di ricondurre l'attività del collo di bottiglia a quella di un servente in un sistema di coda. È stato dunque possibile calcolare la dimensione ottimale dei relativi parametri strutturali (tasso di arrivo, grado di utilizzazione, lunghezza della coda). A partire da tali risultati si è pervenuti a formulare un criterio di sequenziamento e tempificazione delle lavorazioni che ha offerto risultati più che soddisfacenti in termini di riduzione del WIP.

Gli scriventi ritengono di poter concludere che il criterio in questa sede prospettato si sia rivelato particolarmente adatto alla sincronizzazione del flusso produttivo per quei particolari processi in cui le informazioni sui cicli da effettuare risultano per necessità incomplete, con quanto ne deriva di incertezza per le stesse specifiche di produzione.

#### Riferimenti bibliografici

1. M. de Falco, M.G. Gnoni, M.E. Nenni, Bayesian model for capacity requirements planning in uncertain cycle times processes, Euroma, Copenhagen, 2-4 giugno 2002.
2. E. M. Goldratt, Theory of Constraints, North River Press, USA, 1990.
3. P. Newbold, Statistics for business and economics, Ed. Prentice-Hall International, 1991.
4. V. Daniel, R. Guide Jr, A simulation model of Drum-Buffer-Rope for production planning and control at a naval aviation depot, Simulation, pag. 157-168, 1995.
5. L. Kleinrock, Sistemi a coda. Introduzione alla teoria delle code, Ed. HOEPLI, Milano, 1996.
6. V. Daniel, R. Guide, Jr, Scheduling with priority dispatching rules and drum-buffer-rope in a recoverable manufacturing system, Int. J. Production Economics, Vol. 53, 1997.
7. H. Hsu, Probabilità. Variabili casuali e processi stocastici, Ed. McGraw-Hill, Milano, 1998.
8. Z. D. Radovitsky, A quantitative approach to estimate the size of the time buffer in the theory of constraints, Int. J. Production Economics, Vol.55, 1998.

9. T. J. Hodgson, D. Cormier, A.J. Weintraub, A.Zozom Jr., Satisfying due dates in large job shops, *Management Science*, Vol. 44, No 10, 1998.
10. J. Schonberger, E.M. Knod Jr., *Gestione della produzione*. Ed. Mc Graw-Hill Italia, Milano, 1999.
11. S. F. Hurley, D.C. Whybark, Inventory and capacity trade-offs in a manufacturing cell, *Int. J. Production Economics*, Vol. 59, 1999.
12. Gasparin, W. Schroder, E. Sant'Elia, Repair specification, build and standards, Power plant engineering department for narrow body aircraft engines, Fiumicino, 2000.
13. S.N.Kadipasaoglu, W. Xiang, S. Hurley, B.M. Khumawala, A study on the effect of the extent and location of protective capacity in flow systems, *Int. J. Production Economics*, Vol. 63, 2000.