

# Lo “scheduling” di un mix di prodotti: il caso di un’azienda metalmeccanica

■ Michele Lanzetta, Luca Del Moro, Tommaso Cognetta  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione Università di Pisa

## Un aiuto per il lettore

Molti termini di questo articolo sono in inglese perché in italiano sono difficilmente traducibili, pertanto, riteniamo di fare cosa gradita al lettore fornendo una loro breve descrizione:

**Job:** una parte da produrre con l’insieme delle lavorazioni che deve subire e la specificazione dei tipi di macchine e tempi necessari. In un lotto, il job rappresenta il numero minimo di pezzi (anche un pezzo singolo o l’intero lotto) in cui è conveniente scomporre il lotto.

**Makespan:** tempo che intercorre tra l’inizio della prima operazione e la fine dell’ultima per un mix di prodotti.

**WIP(Work In Process):** indica il numero di pezzi (o di lotti) che vengono lavorati contemporaneamente all’interno di un sistema produttivo. Questo parametro può essere utilizzato come indicatore per valutare le prestazioni del sistema: a parità di lotti prodotti, si preferisce la soluzione che corrisponde al più basso livello di WIP; l’azienda in questo modo può ridurre i costi dovuti all’immobilizzazione delle giacenze di materie prime e di semilavorati.

**Flow-shop:** linea a flusso, i semilavorati passano da una stazione di produzione all’altra attraverso una sequenza standard e predeterminata, indipendente dal lotto di produzione.

**Task:** singola operazione con le informazioni ad essa collegate (quelle usate in input).

**Taskset:** Raggruppamento di tutti i task di ciascun job. Richiesto dal toolbox di calcolo.

**“Schedule” possibili:** Sono le  $(n-1)!$  combinazioni di job, pari alla moltiplicazione dei primi  $(n-1)$  numeri naturali. Se  $n$  è il numero di job in produzione,  $(n-1)$  sono i job rimanenti dopo aver stabilito quello con la priorità maggiore. Es. con 5 diversi lotti indivisi da ordinare  $(n-1)! = 1 \times 2 \times 3 \times 4 = 24$ . Se invece si hanno 5 diversi lotti con appena 10 pezzi (totale 50) che possono essere lavorati singolarmente, le combinazioni sono già in numero di 3 seguito da 64 zeri

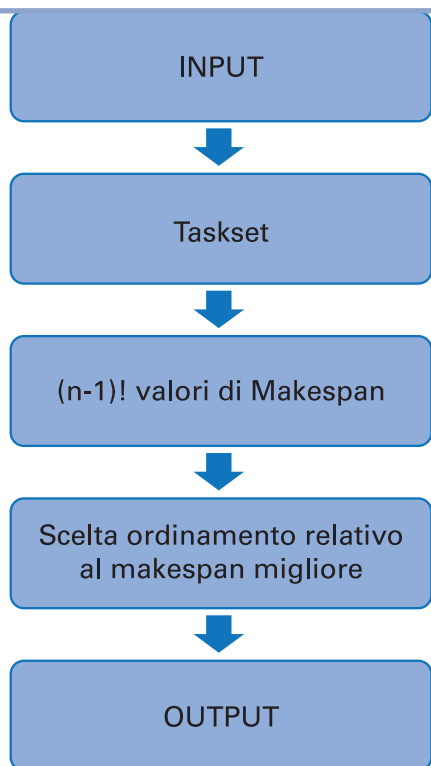
## Definizione del problema

Dato un insieme di pezzi da produrre (job), l’attività di ordinamento delle lavorazioni su un parco macchine assegnato è il cosiddetto *scheduling*. Il termine anglosassone che corrisponde a programmare, pianificare, ordinare, viene mantenuto anche in italiano perché difficilmente traducibile con un solo termine. Analogamente, il tempo necessario per completare le lavorazioni su un mix di prodotti assegnati, viene definito con il termine anglosassone *makespan*.

In ambito produttivo, la sequenza di ordinamento con cui vengono prodotti i job che viene scelta dipende spesso dal valore del *makespan* calcolato al variare dei possibili piani di produzione.

Questa scelta è soggetta a vincoli di varia natura, frutto di diverse esigenze aziendali secondo cui solo alcuni sono *schedules* ammissibili. Un esempio può essere la necessità di produrre secondo richieste di magazzino, come evitare che prodotti molto costosi rimangano per lunghi tempi in giacenza (aumentando il WIP). Questo aspetto può essere gestito mediante una valutazione preventiva (manuale o automatica) che individua il job a cui assegnare priorità massima. Il caso descritto in questo articolo è tratto da una situazione reale studiata per conto della società Piaggio di Pontedera (PI). Le caratteristiche del problema possono essere così sintetizzate:

- Azienda metalmeccanica; il parco macchine è formato da 31 stazioni di cui 6 manuali e 25 a controllo numerico dedicate alla produzione di diversi tipi (una famiglia) di alberi a gomito per motocicli destinati a motori diversi. In base al modello, il ciclo di fabbricazione può prevedere di evitare il passaggio per alcune stazioni.
- Il mix varia da due a cinque job (modelli di alberi a gomito) a seconda del piano di produzione mensile/trimestrale/annuale; ogni job ha il proprio ciclo di fabbricazione che prevede l’utilizzo in maniera sequenziale delle macchine citate, senza necessariamente



**Fig. 1 Schema logico del programma di scheduling implementato per l'ottimizzazione (minimizzazione) del makespan su  $(n-1)!$  possibili ordinamenti.**

impegnarle tutte: secondo il modello detto di linea a flusso (flow-shop). I diversi modelli, in quanto producibili sulla medesima linea, costituiscono una famiglia.

- La numerosità dei lotti è superiore a 300 pezzi, in base a valutazione fatte preventivamente.
- I tempi di attrezzaggio della linea di produzione per passare da un modello all'altro sono di 8 [unità di tempo].
- Viene assegnata una priorità ai job in maniera da smaltire prima i pezzi che hanno maggiore costo di gestione (stoccaggio, ammortamento, ecc.) per ridurre il WIP.

L'ottimizzazione dello scheduling (cioè l'ordinamento degli ingressi del mix da lavorare sulla linea in modo da minimizzare i tempi totali di produzione), già con tre diversi modelli, non è facilmente risolvibile a mano a causa della grande quantità di operazioni associate agli schedule possibili.

Per affrontare il problema è stato appositamente sviluppato un algoritmo, sviluppato utilizzando un software di calcolo [1]. In tale ambiente è stato applicato un toolbox gratuito [2] descritto in dettaglio in [3].

L'algoritmo calcola per ciascuno schedule ammissibile il tempo totale richiesto (makespan) per lavorare un assegnato mix di prodotti. Valuta inoltre in maniera esaustiva tutte le combinazioni dei job del mix assegnato rimanenti che determinano il valore minimo del makespan. È importante sottolineare che il numero di pezzi e le unità di tempo possono essere scalati in maniera proporzionale, vale a dire che gli schedule per passare da 1 a 10 o 100 pezzi ecc. richiedono un tempo all'incirca 10 o 100 ecc. volte superiore (dipende se i tempi di attrezzaggio siano o meno trascurabili). Analogamente la scala dei tempi può avere indifferentemente come [unità di tempo] il secondo, il minuto, l'ora o il giorno ecc.

### Schema di funzionamento dell'algoritmo

I dati forniti in ingresso all'algoritmo, con le relative [unità di misura], sono elencati di seguito e sono assegnati in tabella 1 per l'esempio applicativo descritto di seguito.

#### Input:

- q: numero di operazioni per job che definiscono il ciclo di fabbricazione;
- delta: tempo di attrezzaggio macchina [unità di tempo];
- n: numero di job;
- m: numero di lotti in cui viene frazionata la commessa;
- p<sub>j</sub>: è il tempo necessario alla task per eseguire l'operazione j-esima [unità di tempo];
- r<sub>j</sub>: tempo in cui una task si rende disponibile [unità di tempo];
- d<sub>j</sub>: specifica un tempo limite per terminare l'operazione [unità di tempo]. Con un valore superiore del makespan si considera fallito l'ordinamento;
- dd<sub>j</sub>: indica un tempo entro cui dovrebbe essere completata l'operazione [unità di tempo];
- w<sub>j</sub>: esprime la priorità (peso – ingl. weight) dell'operazione;
- processore: specifica il processore con cui deve essere eseguita l'operazione
- quale job ha la priorità massima.

Alcuni esempi di valori sono riportati nella tabella 1. Il valore di r<sub>j</sub> nullo indica che tutti i pezzi da lavorare sono disponibili fin dall'inizio (al tempo 0) del piano di produzione. I parametri d<sub>j</sub> e dd<sub>j</sub> sono invece stati impostati a valori elevati (molto superiori al massimo makespan calcolato) in modo da non essere considerati nel calcolo. Come priorità è stato assegnato w<sub>j</sub>=500 al prodotto di massimo costo e quindi con maggior valore di WIP ed è stato assegnato 2 a tutti i restanti n-1 job. L'inserimento degli input nel programma di calcolo è possibile attraverso finestre di dialogo appositamente create. È stato inoltre impostato un foglio di calcolo (tipo Excel), che permette di leggere direttamente i dati di produzione ottenuti come output da altri software gestionali, come ad esempio dal database di richieste dai clienti o dal fabbisogno generato dalle fasi successive di produzione.

#### Output:

- Una volta fissato tra gli n job quello con priorità massima, rimangono n-1 job da ordinare per i quali esistono  $(n-1)!$  output (scheduling) differenti. I possibili ordinamenti dei job sui diversi Processor (macchine) si possono visualizzare nelle seguenti modalità:
- diagrammi di Gantt (fig. 2): fornisce una rappresentazione grafica dell'andamento della linea di produzione;
  - file XML: formato utilizzabile da diversi programmi, permette di effettuare ulteriori visualizzazioni e analisi dei risultati.

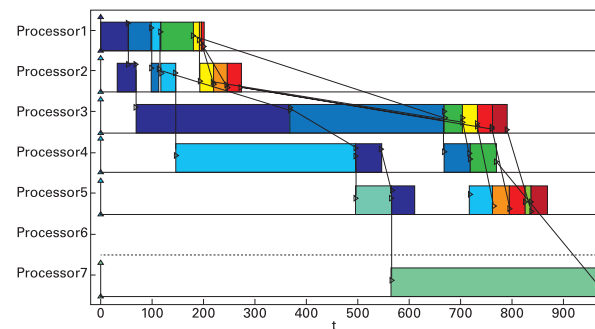
**Esempio applicativo**

In tabella 1 si riportano i dati necessari all'algoritmo di ordinamento per un caso applicativo. Si può osservare che il job con la priorità massima è in n. 1. Il tempo di attrezzaggio è il medesimo per ciascuna macchina e vale 8 [unità di tempo]. In fig. 1 sono riportati due esempi di output grafico del programma: i diagrammi di Gantt relativi agli ordinamenti col migliore e col peggiore valore di makespan tra quelli simulati con il programma, facendo le (n-1)! simulazioni. Il numero di lotti (che contengono lo stesso numero di pezzi) è dato dalla somma degli m e vale 7, corrispondenti ai 7 colori di fig. 1. Per ridurre il numero totale di attrezzaggi è stato imposto al software di lavorare consecutivamente i lotti dello stesso tipo. In questo modo, il parametro m permette di gestire la diversa numerosità dei job per i diversi tipi di prodotto.

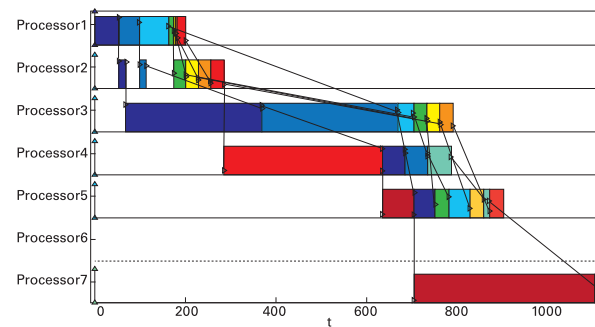
**Conclusioni**

L'algoritmo di scheduling sviluppato e sommariamente descritto in questo articolo permette di effettuare un confronto tra possibili sequenze di ordinamento di job e individuare la combinazione ottima (es. la più economica, quella che richiede minor tempo, quella che

Makespan = 971 [unità di tempo]



Makespan = 1110 [unità di tempo]



**Fig. 2** Output del programma di scheduling sviluppato. **Sull'asse dei tempi (orizzontale) si contano minuti/ore/giorni/ecc. totali minimi (sopra) e massimi (sotto) per produrre il mix stabilito con i corrispondenti carichi sulle diverse macchine (Processor). Nessuno dei prodotti richiede l'utilizzo della macchina n. 6. I diversi colori rappresentano i diversi lotti.**

**TABELLA 1 - DATI DI INPUT PER IL PROGRAMMA DI SCHEDULING.**

pj	rj	dj	ddj	wj	Processor	n	m
45	0	5000	3000	500	1	1	2
15	0	5000	3000	500	2		
300	0	5000	3000	500	3		
50	0	5000	3000	500	4		
46	0	5000	3000	500	5		
4	0	5000	3000	2	1	2	3
27	0	5000	3000	2	2		
29	0	5000	3000	2	3		
31	0	5000	3000	2	5		
10	0	5000	3000	2	1	3	1
30	0	5000	3000	2	2		
350	0	5000	3000	2	4		
70	0	5000	3000	2	5		
400	0	5000	3000	2	7		
56	0	5000	3000	2	1	4	1
36	0	5000	3000	2	3		
52	0	5000	3000	2	4		
12	0	5000	3000	2	5		
5	0	5000	3000	2	7		

minimizza il numero di attrezzaggi). È stato riportato un esempio realistico ed è stato mostrato che attraverso simulazioni è possibile ridurre il valore del makespan (13% del tempo nel caso particolare). Il caso semplice descritto e il calcolo sul numero di schedule possibili mostrano l'elevato numero di operazioni richieste da un'attività di scheduling e lasciano intuire la necessità di appositi algoritmi di ottimizzazione del software e l'elevata richiesta di potenza computazionale. In un prossimo articolo verranno introdotti ulteriori parametri per rendere il modello descritto adatto a diverse realtà industriali.

**Ringraziamenti**

Studio sviluppato dagli studenti Del Moro e Cagnetta nell'ambito dell'insegnamento di Studi di Fabbricazione del Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica anno accademico 2009-10, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa in collaborazione con la Società Piaggio & C. S.p.A. Si ringraziano in particolare Daniele Urso, Raffaello Fontanini, Daniele Landini e il Direttore del Manufacturing Carlo Coppola.

**Bibliografia**

- [1] The MathWorks™, Matlab®
- [2] TORSCHES Scheduling Toolbox for Matlab, <http://rttime.felk.cvut.cz/scheduling-toolbox/> ult. acc. Luglio 2010
- [3] P. Šůcha, M. Kutil, M. Sojka, Z. Hanzálek. TORSCHES Scheduling Toolbox for Matlab. In IEEE International Symposium on Computer-Aided Control Systems Design. Munich, Germany: Ott. 2006, 1181-1186.