

Scheduling di un processo Sterilizzazione ospedaliera



L'assegnazione delle attività di sterilizzazione, nelle varie fasi, ai diversi operatori e macchinari richiede preventiva analisi, modellizzazione e formalizzazione della situazione reale. Interessante la realizzazione e applicazione di un software per ridurre i ritardi di consegna dei kit chirurgici e aumentare l'efficienza del processo di sterilizzazione

✉ **Alessio Puppato, Andrea Rossi, Michele Lanzetta**
Dipartimento di Ingegneria meccanica, nucleare e della produzione, Università di Pisa
Silvia Pagliantini
Azienda Ospedaliero-Universitaria Pisana
Carlo R. Tomassini
Direttore generale Aou Pisana

Il flusso produttivo nella centrale di sterilizzazione dell'Aou Pisana, esaminato in questo articolo e in uno precedente (*Tecnica Ospedaliera*, n.9, ottobre 2011, pp. 68-72) è schematizzato nella figura di pag.55. È unidirezionale e va dalla zona di arrivo dei carrelli contenenti i kit chirurgici a quella di stoccaggio del materiale sterile e con la separazione tra aree "sporco" e "pulito", come consigliato in letteratura(1). Nella centrale i kit decontaminati sono consegnati in prossimità della zona lavaggio; in seguito i container relativi ai vari kit sono svuotati e puliti a mano, i dispositivi medici appartenenti a un certo container sono prima lavati a mano e poi posti su griglie metalliche che vengono caricate su termodisinfettatrici meccaniche (figura di pag.56 in alto). Per evitare mancanza di uniformità nella compo-

sizione del container e facilitare la fase successiva di assemblaggio, nella detersione i dispositivi medici contenuti nel container non sono separati e/o mescolati a quelli contenuti in altri container. Eseguito il ciclo di lavaggio e disinfezione, le griglie in precedenza caricate nella termodisinfettatrice meccanica sono scaricate e i container sono pronti per essere ricomposti nella zona di confezionamento. In questa fase gli operatori verificano lo stato di pulizia dei dispositivi medici presenti nelle griglie e li inseriscono nel container di appartenenza. I dispositivi medici che non superano questa ispezione visiva vengono riprocessati nella fase di lavaggio (il container si blocca in attesa del dispositivo medico difettoso). Il container così composto e sigillato è pronto per essere caricato su autoclavi a vapore per la sterilizzazione. Dall'indagine delle

cause alla base della forte variabilità nel processo di detersione e confezionamento, e quindi di imprevedibilità ed errori nei tempi di consegna che hanno motivato questo studio, si è costruito un diagramma causa-effetto (detto anche a spina di pesce o di Ishikawa), riportato nella figura di pag.56 in basso. Le cause classificate alla voce "macchine, materiali e manodopera" comportano forti investimenti che hanno spinto, come primo approccio, a riorganizzare il processo nel reparto stesso.

Pianificazione della produzione e lean production

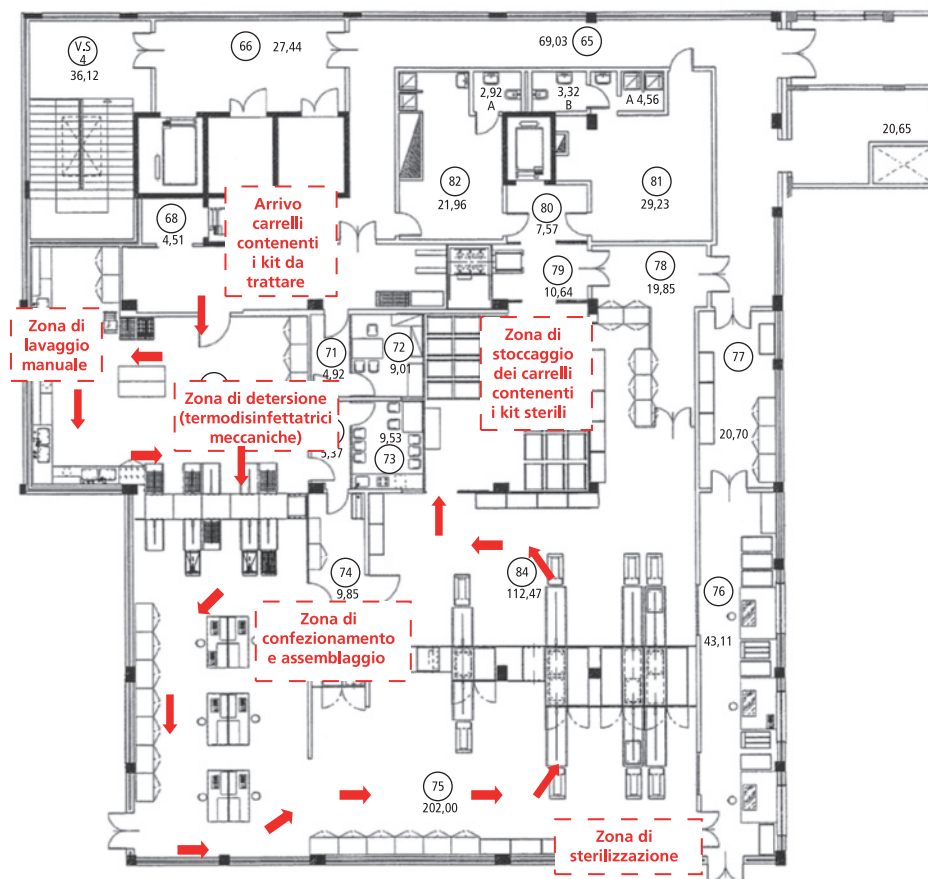
Il grafico di pag.58 mostra che nel periodo considerato il servizio di sterilizzazione non è riuscito

to a smaltire il volume d'attività giunto dalle Uo. Nella centrale e in particolare nella zona d'assemblaggio si realizzano accumuli di kit semilavorati, perché i presidi sanitari consegnati al servizio vanno lavati e disinfettati il prima possibile per evitare incrostazioni di materiale organico sui dispositivi medici stessi, che potrebbero incidere la riuscita del processo di sterilizzazione e/o danneggiare lo strumento. Nella zona d'assemblaggio si riscontra una strategia produttiva di tipo "pull", ossia di tutti i kit disinfettati in uscita dalla zona di detersione sono processati solo quelli richiesti dalle sale operatorie per il giorno successivo alla domanda, quindi la pianificazione della produzione è regolata a valle del processo (lean manufacturing, 2). Al contrario, in un sistema di produzione tradizionale l'avanzamento della produzione sarebbe regolato dalla richiesta (giornaliera) dei kit operatori dalle varie Uo. D'altra parte si possono verificare in pratica richieste di kit in tempi inferiori al tempo standard d'evasione dell'ordine, definito come l'intervallo di tempo tra la richiesta della sala operatoria e la consegna, che sono addirittura inferiori al tempo d'attraversamento (lead time di produzione). In questo caso sono necessarie scorte di kit. Il ricorso a buffer e magazzini è incompatibile con il modello pull, quindi il sistema va riorganizzato e va applicato il metodo tradizionale della pianificazione delle attività.

Modellazione del problema di scheduling

In un precedente articolo (3) si è descritto il problema della determinazione del numero minimo di addetti e macchine per soddisfare la domanda di ferri chirurgici provenienti dai vari reparti. Stabilito che l'impianto produttivo ha capacità sufficiente per elaborare la quantità di kit operatori provenienti dalle varie Uo, si può formulare il modello di scheduling. Il problema di definire la sequenza temporale e il carico dei diversi operatori e macchine in un impianto produttivo (scheduling) è classificabile nell'ambito della complessità computazionale come NP-hard. Per problemi di questo tipo non sono disponibili algoritmi capaci di ottenere una so-

Layout e flusso produttivo nella centrale di sterilizzazione



luzione ottima in tempo polinomiale nella dimensione dei dati. Per questo il programma progettato e implementato si basa su un algoritmo euristico capace di determinare soluzioni soddisfacenti in tempi ragionevoli. Riguardo al parco macchine e alla struttura della centrale, nella zona di detersione vi sono 4 lavelli utilizzabili dagli operatori per le operazioni di lavaggio manuale e 5 termodisinfettatrici con tempo di ciclo 70 minuti.

La quantità di container caricabili su una lavastumenti è legata al tipo di container: molti cestelli al loro interno hanno un numero/volume di dispositivi medici tale da richiedere più griglie di diverse dimensioni standardizzate (si veda la tabella di pag.60 a sinistra). La maggiore altezza di alcuni dispositivi medici costringe gli

operatori a usare portagriglie a 4 piani anziché a 5. In zona confezionamento sono invece disponibili al più 6 tavoli per altrettanti operatori, mentre in zona sterilizzazione vi sono 6 autoclavi a vapore di capacità diverse: 4 di grandi dimensioni con tempo di ciclo 70 minuti, 2 di piccole dimensioni con ciclo di sterilizzazione di 45 minuti. Le autoclavi più piccole sono escluse dal modello di scheduling perché usate solo in casi d'emergenza. Vi sono quindi vincoli sulla quantità di kit che si possono caricare sia sulle termodisinfettatrici sia sulle autoclavi e che andranno rispettati nella pianificazione della produzione (scheduling produttivo). In base a queste considerazioni e al tipo di flusso produttivo possiamo modellare il sistema come una produzione a flusso con macchine pa-

rallele (hybrid flow shop) con 4 stadi, ognuno comprendente macchine parallele identiche. È un sistema di tipo dinamico predittivo e deterministico, in cui non è permessa interruzione (preemption) dell'operazione relativa a un certo job finché essa non è stata completata. Il job rappresenta l'unità produttiva indivisibile che attraversa l'impianto produttivo e può coincidere con l'intero kit, il container o un singolo dispositivo medico. Ulteriore particolarità del modello è la presenza di stadi (il secondo e il quarto) in cui si costruiscono lotti (batch), ossia insieme di jobs che sono mandati in produzione insieme e che dunque condividono gli stessi istanti d'inizio e fine operazione. La funzione obiettivo da ottimizzare è la minimizzazione del tempo complessivo di lavoro per l'intero lotto programmato (detto makespan di processo, 4). In ogni stadio c'è un certo numero di operatori e macchine (indicati nella figura di pag.60 con $m_{j,s}$, dove j indica l'indice della macchina e s lo stadio cui appartiene; per esempio, m_{32} è la terza macchina del secondo stadio). Termodisinfettatrici e sterilizzatrici hanno una capacità di carico. L'unità di misura usata per rispettare questo vincolo è la dimensione minima della griglia corrispondente al container più piccolo tra quelli esistenti in centrale: infatti, un container più grande può essere frazionabile in più container con dimensione minima, così come una griglia è frazionabile in più griglie minime. Dunque, per non superare il vincolo sulla capacità delle macchine termodisinfettatrici basta sapere quante griglie di dimensione minima possono esservi contenute. Analogamente, per le autoclavi sterilizzatrici basta conoscere il numero di container di minima dimensione che possono esservi caricati. Definendo la capacità dei vari stadi come numero di container appartenenti a un kit chirurgico, il problema viene discretizzato e si riduce il numero di soluzioni possibili, che altrimenti sarebbero infinite. Il generico container i -esimo da processare è indicato con J_i e presenta - oltre a una propria dimensione caratteristica e al numero di griglie in cui possono essere inseriti tutti i dispositivi medici contenuti in quel container - altri attributi, come



Schematizzazione caricamento termodisinfettatrice

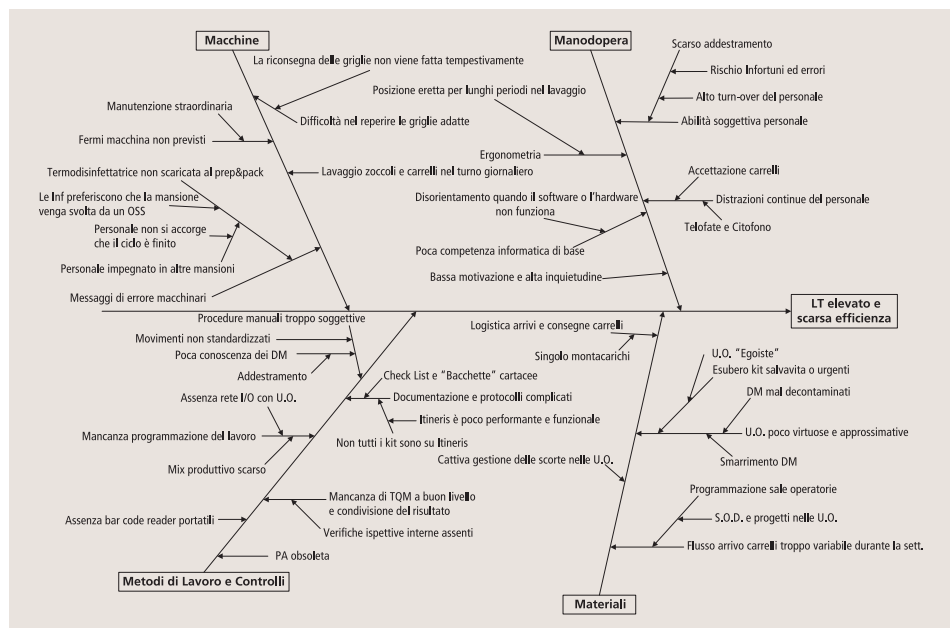


Diagramma di Ishikawa con classificazione delle cause d'inefficienza e ritardi (lead time alto), divise per tipologie

la data (deadline) entro la quale il job va consegnato all'Uo, l'istante d'arrivo alla centrale del job e la sua priorità di lavorazione rispetto ad altri job (kit urgenti o salvavita). L'operazione che assegna il job i -esimo a una qualsiasi macchina j -esima tra quelle appartenenti allo stadio s -esimo è indicata con O_{is} . I tempi di caricamento delle macchine (setup) tra diverse operazioni sono considerati indipendenti dalla sequenza delle lavorazioni (sequence independent setup times), per questo sono stati inglobati nel tempo operazione indicato con $\bar{\tau}_n(O_{is})$ (processing time operation O_{is}).

L'algoritmo implementato

Modellato il problema, si passa alla scrittura dell'algoritmo di risoluzione, essendo questo problema di natura NP-hard (5), si è sviluppato un algoritmo di tipo euristico (6) che utilizza la regola di carico in base al tempo di consegna richiesto per il job (Edd, earliest due date). La regola Edd assegna al job con tempo di consegna minore una maggior priorità di processamento: ogni volta che una macchina si libera, su di essa è schedata l'operazione relativa al job con deadline più vicina. Il linguaggio di programmazione usato per l'implementazio-



DI DEDDA
elettromedicali

Cooling *with Care*



CritiCool®

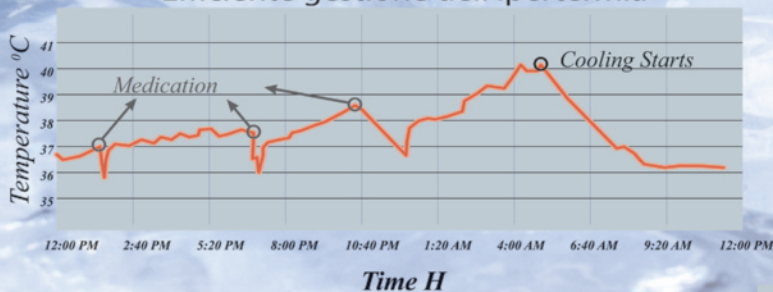
Allon 2001®



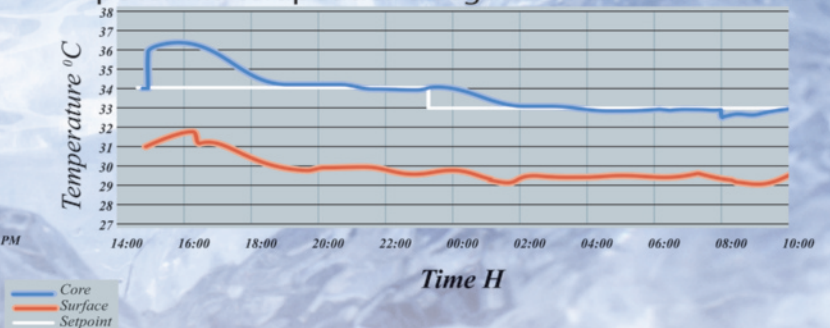
La scelta ideale per
la neuroprotezione
Non-Invasiva in
Terapia Intensiva

- **raffreddamento efficace grazie alle coperture 3D**
- **tecnologia rivoluzionaria LiquidTEC**
- **accurato servocontrollo della temperatura**
- **ripristino controllato della normotermia**
- **indicatore di sicurezza di fine trattamento**

Efficiente gestione dell'ipertermia



Ipotermia terapeutica a seguito di arresto cardiaco

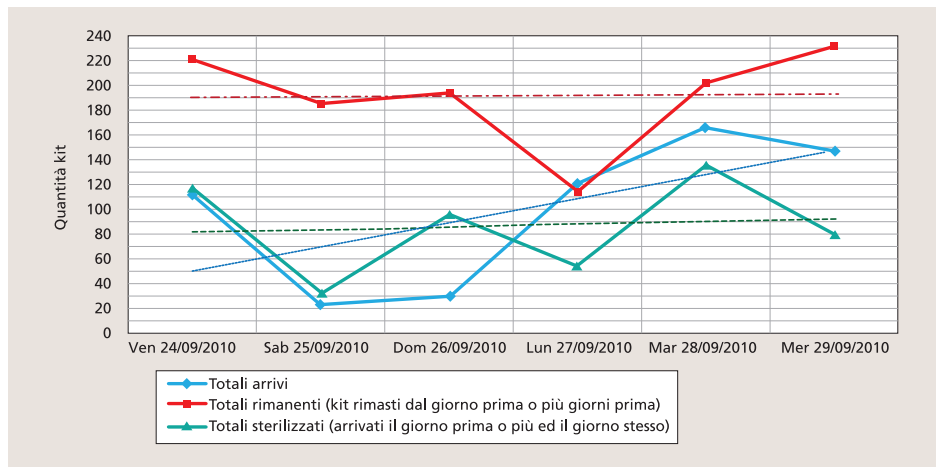


Via Resistenza, 3 - 20090 Assago (MI)
Tel. 02 4887181 - Fax 02 45708448
info@didedda.it - www.didedda.it

ne è Java® (7), totalmente orientato agli oggetti, indipendente dalla piattaforma usata e con diverse librerie open source come JFreeChart (8), usata in questo caso per creare il diagramma di Gantt, in cui si rappresentano i container da processare e le macchine/operatori cui essi sono assegnati. I passi principali dell'algoritmo sono semplificati con lo pseu-

docodice nella tabella qui sotto. Negli stadi 2 e 4 vi sono vincoli di capacità sulle macchine, ossia sulla dimensione del batch di job. Nelle termodisinfettatrici si carica un carrello a 5 ripiani, che possono diventare 4 se i dispositivi medici contenuti nel container hanno altezza superiore al passo tra due ripiani consecutivi (tabella di pag.60 a destra). Prendendo come

riferimento geometrico l'area in pianta delle griglie più piccole DIN¹/₂ (tabella di pag.60 a sinistra) si può suddividere l'area di ogni ripiano in 6 sub-aree, così in ogni ripiano vuoto saranno disponibili 6 slot in cui mettere una qualsiasi combinazione dei due tipi di griglie usate. Ogni griglia DIN¹/₂ riempirà uno slot, mentre le DIN¹/₂ ne occuperanno 2. Analogamente si è modellizzato il vincolo di capacità sulle autoclavi sterilizzatrici. Nelle autoclavi più grandi si possono caricare 2 carrelli, ognuno con 2 ripiani. Un container può avere diverse dimensioni in pianta, ma prendendo come riferimento il container più piccolo tra quelli presenti si può suddividere ogni ripiano in 6 slot, che saranno occupati da una qualsiasi combinazione dei vari tipi di container.



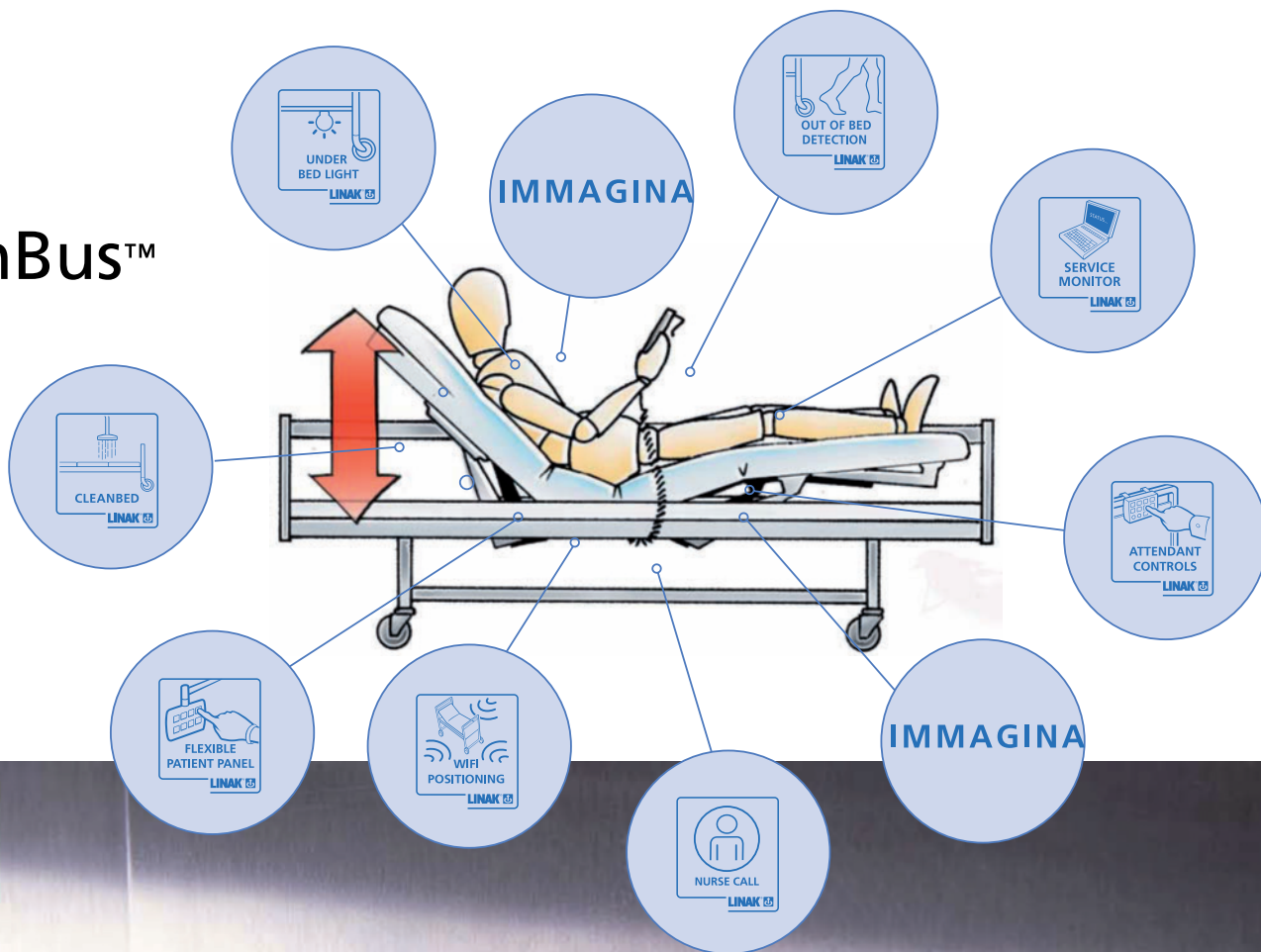
Andamento degli arrivi, semilavorati e kit consegnati

Algoritmo euristico di scheduling implementato

Passo 1	Ordinamento della lista di job secondo il tempo di arrivo r_i , decrescente di priorità w_i e di tempo di consegna d_i
	Stadio $s=1$
Passo 2	Per ogni job appartenente alla lista ordinata, estrazione del primo J_i
Passo 3	Assegnazione dell'operazione O_{is} del job J_i alla prima macchina/operatore m_{js} disponibile fra quelle dello stadio s
Passo 4	Determinazione del tempo di completamento $C_i = t_{end}(O_{is})$ dato dalla somma dell'istante di inizio operazione e tempo di processamento di O_{is} : $t_{end}(O_{is}) = t_{start}(O_{is}) + \tau_n(O_{is})$
Passo 5	Introduzione del job J_i in una nuova lista riguardante lo stadio $s=s+1$ con aggiornamento del tempo in cui è disponibile $r_i = C_i = t_{end}(O_{is})$
Passo 6	Eliminazione del job J_i dalla lista precedente
Passo 7	Se la lista è vuota vai al passo 8, altrimenti al passo 2
Passo 8	Per ogni stadio $s = 2, 3, 4$
Passo 9	Per ogni job nella nuova lista
	Estrazione del job J_i secondo una logica FCFS (first come - first served)
Passo 10	Vai al passo 3 e ripeti fino al passo 7
Passo 11	Se la lista è vuota vai al passo 8, altrimenti vai al passo 12
Passo 12	Se siamo allo stadio $s = 4$ vai al passo 13
Passo 13	Determinazione del massimo tempo di completamento delle varie operazioni schedulate sulle varie macchine. Makespan $C_{max} = \text{MAX}\{C_i\}$

Risultati

Da queste considerazioni si evincono altre due particolarità del problema di scheduling, cui l'algoritmo di risoluzione dovrà rispondere. La prima è data dal fatto che ogni job (inteso come container) in ingresso alla centrale dopo il primo stadio deve suddividersi in sotto job correlati tra loro, per poi essere ricostruiti nel terzo stadio. La seconda riguarda l'imposizione di una condizione di chiusura del batch se la quantità di job arrivati non è sufficiente a saturare la capacità di una macchina. Si ricorda, infatti, che questo è un problema dinamico-predittivo, quindi non è detto che a un certo orario d'arrivo sia consegnato un numero di job tale da riempire una macchina. Per ovviare a questo inconveniente è introdotto un parametro di ritardo δ , che impone la chiusa del batch e l'avvio della termodisinfettatrice (o sterilizzatrice) entro il ritardo tollerato δ a partire dall'istante in cui sulla macchina è stato caricato il primo sotto job (o job). Ovviamente, se si assume $\delta \rightarrow \infty$ s'impone che una macchina può essere avviata solo se riempita completamente (massima saturazione del parco macchine); se invece $\delta \rightarrow 0$, si massimizzerebbe il tempo d'attraversamento (flow time) dei job nel ipotesi d'infinita macchine disponibili. Nel caso in esame, in un'ottica di bilanciamento



... la tecnologia intelligente per letti ospedalieri

della linea produttiva, si assume $\delta = 70$ minuti: così una macchina non del tutto saturata è comunque avviata rispettando la cadenza della linea. Si può settare opportunamente il parametro δ di carico della macchina da raggiungere prima di far chiudere il batch, per minimizzare il numero di jobs in ritardo sui tempi di consegna. Infatti, questo parametro consente di bilanciare i tempi medi manuali di lavaggio e confezionamento con i tempi macchina di termodisinfezzatrici e sterilizzatrici. L'algoritmo euristico proposto testato su una settimana campione ha permesso di ridurre il tempo di totale di consegna dei kit. Inoltre, si è ridotto il numero di kit consegnati in ritardo.

Conclusioni e sviluppi futuri

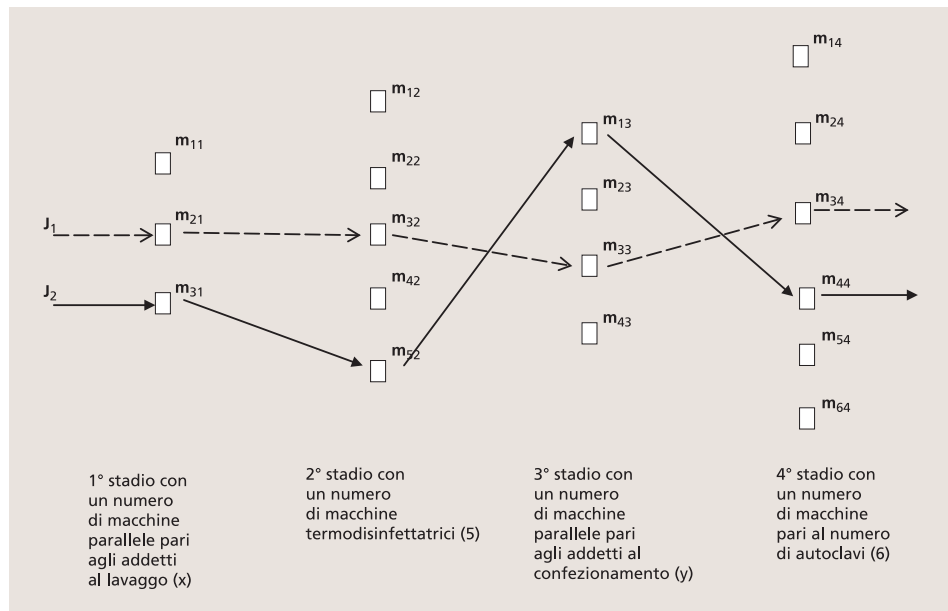
Optimizing è la scienza dell'ideale; satisficing è l'arte del fattibile (9). L'algoritmo di scheduling realizzato permette di trovare soluzioni ammissibili, che probabilmente non saranno ottime però già soddisfacenti. Dal punto di vista scientifico, tali soluzioni si possono però usare come valori di partenza per un successivo algoritmo meta euristico, per esempio genetico, tabù search o ant colony, su cui gli autori hanno già esperienza (10). Creando una funzione ad hoc della forma $\delta = \delta(d_i)$ - ove d_i rappresenta la deadline di consegna del job i -esimo - si minimizzano i consumi delle utenze relative alle macchine del secondo o quarto stadio. Aumentando l'ampiezza del campionamento si realizzano carte di controllo del processo e delle unità operatorie, con possibilità di verificare se il flusso produttivo interno alla centrale e il flusso operatorio sono soggetti a fluttuazioni e picchi (possibilmente da eliminare). ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA

Ringraziamenti

Questo studio è stato svolto presso l'Aou Pisana come tirocinio per il conseguimento della laurea in Ingegneria meccanica del dott. Alessio Puppato.

Si ringrazia il direttore dell'Uo Innovazione e Sviluppo e Analisi dei Processi dott. Marco Nerattini.



Schematizzazione modello hybrid flow shop con quattro stadi

Tipo e dimensioni delle griglie porta dispositivi medici

Dimensioni in mm	DIN standard	
	DIN 1/1	DIN 1/2
lunghezza	480	240
larghezza	250	250
altezza	50	

Tipo e dimensioni dei container porta dispositivi medici

Dimensioni container in mm		
lunghezza	larghezza	altezza
600	300	210
300	300	210
120	300	50

Bibliografia

- 1) Gaetano Del Vecchio, *Moderni orientamenti in campo organizzativo, igienico, sanitario, progettuale e tecnologico*, Igiene e Tecnica Ospedaliera, vol. 1
- 2) D. P. Hobbs, *Lean manufacturing implementation*, J. Ross Publishing, 2003
- 3) Alessio Puppato, Andrea Rossi, Michele Lanzetta, Silvia Pagliantini, Marco Nerattini, Carlo R. Tomassini, *Analisi di un processo di sterilizzazione ospedaliero*, Tecnica Ospedaliera n. 9, 2011, pp. 68-72
- 4) M. Pinedo, *Planning and scheduling in manufacturing and services*, Springer, 2009
- 5) GJ. Kyriaris, C. Koulamas, *Flexible flow shop scheduling with uniform parallel machines*, Euro-

pean Journal of Operational Research 168 (2006) 985-997

- 6) F. Xhafa, *Metaheuristics for scheduling industrial and manufacturing applications*, Springer, 2008
- 7) Java www.oracle.com/technetwork/java/index.html ult. acc. 05/2011
- 8) JFreeChart www.jfree.org/jfreechart/ ult. acc. 05/2011
- 9) S. Eilon, *Goals and Constraints in Decision making*, Operational Research Quarterly. 23: 3-15, 1972.
- 10) A. Rossi, G. Dini, *Flexible job-shop scheduling with routing flexibility and separable setup time using ant colony optimisation method*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 23, num. 5, pp. 503-516, 2007