



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

TESI DI LAUREA IN RICERCA OPERATIVA

Scheduling delle sale operatorie

Relatore: Ch.mo Prof. Romanin Jacur Giorgio

Laureando: Andrea Gastaldon

Anno Accademico 2012/2013

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: Scheduling delle sale operatorie	2
CAPITOLO 2: Assegnazione delle operazioni	7
2.1 Notazione	9
2.2 Impostazione del modello	10
2.3 Codifica in linguaggio GAMS	12
CAPITOLO 3: Sequencing delle operazioni	15
3.1 Notazione	17
3.2 Impostazione del modello	19
CAPITOLO 4: Sperimentazione dei modelli	22
4.1 Risultati	23
CONCLUSIONI	25
RINGRAZIAMENTI	26
BIBLIOGRAFIA	27

INTRODUZIONE

Molte istituzioni sanitarie stanno cercando degli strumenti utili a ridurre i costi e a garantire un uso efficiente dei servizi ospedalieri. Tra tutti i servizi che si possono trovare negli ospedali, tra i più costosi vi è sicuramente quello legato all'utilizzo delle sale operatorie. Infatti ben il 52% dei ricoveri ospedalieri è dovuto agli interventi chirurgici: questa stima è ottenuta a partire dal numero totale di cure a lungo termine che interessano l'ospedale al quale viene sottratto il numero totale di pazienti ricoverati che vengono dal pronto soccorso, da un altro ospedale o da cliniche a lunga degenza. Per questo motivo è opportuna una corretta e attenta gestione da parte del manager di tutti gli aspetti relativi ai centri chirurgici presenti negli ospedali, che porta alla formulazione del cosiddetto "Operating Rooms Scheduling".

CAPITOLO 1

Scheduling delle sale operatorie

Le sale operatorie rappresentano un collo di bottiglia nella maggior parte degli ospedali in tutto il mondo. Inoltre possono consumare oltre il 9% del budget complessivo disponibile in un ospedale (Gordon et al., 1988). Lo scheduling delle sale operatorie è diventato una delle maggiori priorità delle istituzioni sanitarie, vista l'intenzione di ridurre i costi pur mantenendo una buona qualità del servizio.

Lo scheduling determina le operazioni chirurgiche che devono essere effettuate nel centro chirurgico di un ospedale, utilizzando al meglio le risorse assegnate per ciascuna operazione, nel periodo di un giorno o di una settimana. Nel contesto di controllo delle spese, quindi, ciò che lo scheduling si pone di raggiungere sono la riduzione dei costi ospedalieri relativi all'uso delle sale operatorie e un miglior utilizzo delle risorse impiegate.

L'obiettivo dello scheduling giornaliero di una sala operatoria è quello di determinare la serie di operazioni chirurgiche da effettuare, attraverso l'allocazione di risorse appropriate e la specificazione dei tempi di esecuzione.

In genere gli ospedali eseguono interventi chirurgici in risposta a tre tipologie di paziente, ovvero a quello urgente, a quello programmato oppure a una situazione di emergenza. Il termine programmabile indica che la sua programmazione può essere spostata per accogliere pazienti bisognosi di un intervento urgente. In genere un intervento viene programmato dopo una visita con il medico di base e eventualmente con alcuni specialisti. Al contrario, un bisogno urgente deriva da una complicazione improvvisa delle condizioni di salute del paziente, quindi non possono essere in nessun modo previsti. Molto simili a quest'ultimi sono i bisogni di emergenza, dovuti per lo più a eventi non prevedibili, come incidenti stradali, che comportano la necessità di un intervento tempestivo per salvare la vita del paziente.

Gli interventi chirurgici possono essere eseguiti sia su pazienti già presenti in ospedale (in-patient) sia su pazienti che arrivano dall'esterno (out-patient). Nel primo caso i pazienti vengono ricoverati in ospedale prima dell'intervento chirurgico e ottengono un posto letto personale; nel secondo caso i pazienti entrano in ospedale solamente per sottoporsi all'intervento, e vengono dimessi ad avvenuta guarigione.

Come si può notare dalla figura 1, all'interno di un centro chirurgico un paziente può

seguire molteplici percorsi; in genere la sequenza tipica seguita da un paziente programmato può essere di due tipi:

- il paziente entra in ospedale e viene collocato in una stanza normale di corsia ospedaliera (suite of regular wards), viene poi trasferito nella sala operatoria al momento dell'operazione, terminata quest'ultima il paziente si sposta nella recovery room e infine viene riportato nella stanza di corsia in attesa della dimissione;
- il paziente entra in ospedale e viene collocato nella stanza normale di corsia ospedaliera, viene poi operato nella sala operatoria, portato nella recovery room, successivamente in terapia intensiva e infine ritorna nella stanza normale di corsia.

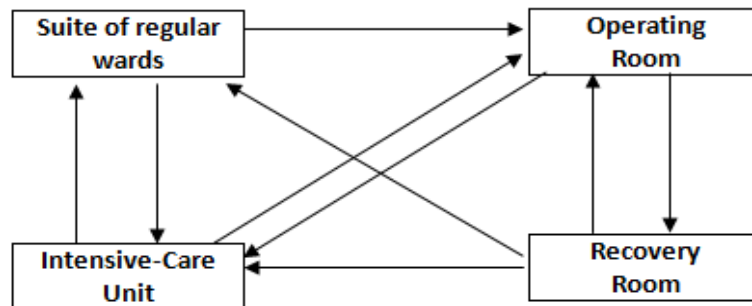


Figura 1. Possibili destinazioni di un paziente in un centro chirurgico

Passando all'atto della vera e propria operazione chirurgica, sulla quale si concentra maggiormente l'attenzione da parte dei manager, essa è divisibile in due fasi:

- fase pre-operatoria, che ha luogo nella sala operatoria. Può a sua volta essere suddivisa in tre sottofasi, ovvero la preparazione della sala, l'operazione vera e propria e la pulitura della sala appena utilizzata. L'operazione vera e propria inizia con la preparazione del paziente e con l'anestesia, seguita dall'operazione;
- fase post-anestesia, che inizia subito dopo l'operazione chirurgica e ha luogo nella recovery room, dove il paziente viene ricoverato e controllato fino alla completa guarigione.

Uno dei requisiti fondamentali per l'uso corretto delle sale operatorie è avere delle stime precise dei tempi necessari in ogni tipologia di chirurgia, indipendentemente dal

modello che si è deciso di utilizzare. Tuttavia stimare il tempo di esecuzione non è affatto un compito semplice, in quanto dipende da vari fattori, quali la patologia del paziente (che può essere solo parzialmente conosciuta) e la competenza chirurgica propria di ciascun ospedale (Wright et al., 1996; Dexter and Macario, 1996).

Un'accurata stima della durata delle due fasi è necessaria a raggiungere uno scheduling efficiente delle sale operatorie.

Per quanto riguarda la durata della fase pre-operatoria, Zhou and Dexter (1998) mostrano che una distribuzione log-normale (figura 2) può approssimare il tempo di esecuzione delle operazioni per ogni particolare tipo di chirurgia e di operazione. Si possono altresì ricavare tempi medi di operazione da accurati sistemi di informazione, altrimenti possono essere forniti direttamente dai manager dei centri chirurgici.

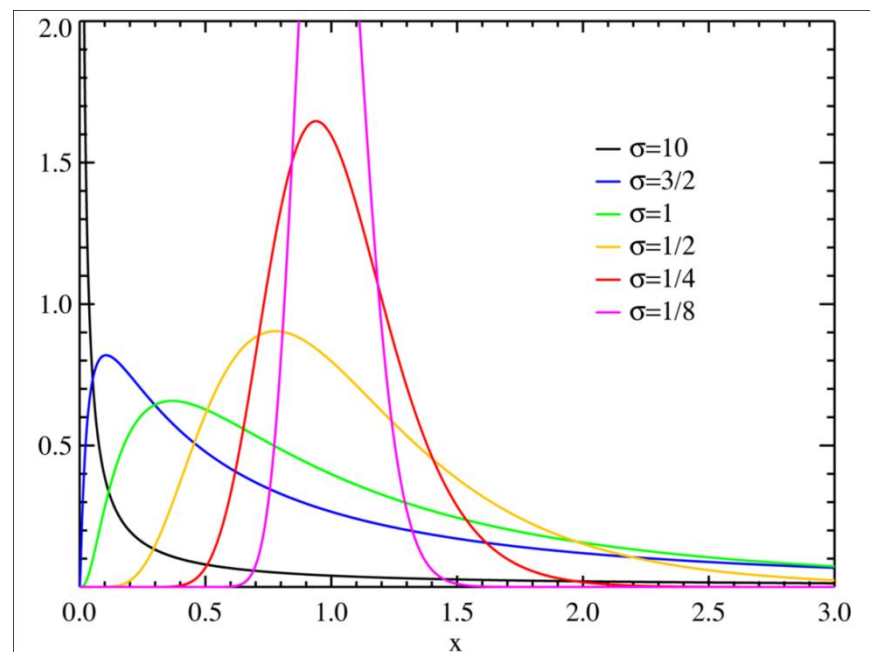


Figura 2. Distribuzione log-normale

A riguardo della fase post-anestesia, la cui durata dipende da quanto il paziente rimane collocato nella recovery room, Dexter and Tinker (1995) analizzano l'effetto di alcune tecniche anestetiche con l'obiettivo di ridurre i costi, e notano che anche il tempo di collocamento può essere approssimato da una distribuzione log-normale. Marcon and Kharraja (2002) invece assumono che la durata della fase post-anestesia dipende dalla tipologia dell'operazione, dalla sua durata e dal codice ASA del paziente (rischio anestesiológico e chirurgico).

In assenza di un sistema informativo attendibile, che registri la durata delle operazioni per chirurgo e per tipo di chirurgia, diventa molto difficile effettuare stime precise, perciò verrà assunto che la durata di tutte le fasi operatorie sia una stima accurata.

Alcuni studi in letteratura esaminano la questione della riduzione dei costi attraverso un uso efficiente delle sale operatorie. Dexter (2000) prende in considerazione la decisione di spostare l'ultimo processo della giornata da una sala operatoria ad un'altra vuota per cercare di ridurre i costi degli straordinari, attraverso l'utilizzo di sistemi informativi specifici; nota quindi che l'utilizzo di un monitoraggio in tempo reale dei pazienti, di telecamere a circuito chiuso o display grafici simili a quelli degli aeroporti, può ridurre i tempi degli straordinari di 2-4 minuti a caso. Dexter and Macario (1996) utilizzano la simulazione Monte-Carlo per determinare se dei piccoli decrementi nei tempi di esecuzione nelle procedure chirurgiche possono permettere di schedulare un ulteriore processo nella sala operatoria durante le ore lavorative regolari.

Altri studi recenti introducono dei metodi per determinare lo scheduling ottimo delle sale operatorie (Guinet and Chaabane, 2003; Kharraja et al., 2002).

Marcon et al. (2001a, b) presenta uno strumento per la "negoziazione" dello scheduling tra attori diversi in un centro chirurgico. Questa "negoziazione" è basata sullo stimare il rischio di mancata realizzazione di una data operazione: l'obiettivo di questo indicatore è quello di valutare la deviazione del programma stabilito da quello che verrà effettivamente raggiunto.

Generalmente gli attori coinvolti nei processi delle sale operatorie prendono attivamente parte in maniera intuitiva alla determinazione dello scheduling giornaliero delle sale operatorie. Attualmente però l'introduzione di strumenti e metodi per ottimizzare le operazioni di un centro chirurgico comporta una nuova cultura manageriale, la quale può portare ad una limitazione di competenze di alcuni individui ma è assolutamente indispensabile per determinare uno scheduling che massimizzi lo sfruttamento delle risorse utilizzate.

Sarà in seguito proposto un approccio a due step per esaminare il problema dello scheduling giornaliero delle sale operatorie. Il primo step consiste nell'assegnazione delle operazioni chirurgiche da eseguire quotidianamente alle diverse sale operatorie, mentre il secondo mira a determinare la sequenza ideale di esecuzione delle operazioni da eseguire in ciascuna sala operatoria. Questa operazione di sequencing può avvenire attraverso due strategie: la prima è una vera e propria sequenzializzazione effettuata senza ri-considerare l'assegnazione delle operazioni alle singole sale operatorie, ovvero viene accettata e considerata come dato certo l'assegnazione risultante dal primo step; la seconda prevede invece la ri-

considerazione delle assegnazioni, in modo tale da tenere conto di un maggior numero di vincoli.

Uno studio comparativo tra le due strategie di sequencing, basato sulle loro performance, sarà presentato nel capitolo 4, con lo scopo di aiutare gli “attori” di un centro chirurgico nella scelta della strategia migliore, in base ai requisiti richiesti e agli obiettivi che si intende raggiungere.

CAPITOLO 2

Assegnazione delle operazioni

L'assegnazione delle operazioni alle sale operatorie fissa i pazienti che devono essere operati durante un dato giorno in ciascuna sala operatoria presente nella struttura ospedaliera. Alla fine di tale giorno occorrerà determinare l'assegnazione anche per il giorno successivo, di conseguenza disturbi o ritardi nel giorno preso in esame dovranno essere considerati quando si determina lo scheduling del giorno successivo. Per questo motivo l'assegnazione giornaliera alle sale operatorie può essere vista come un continuo aggiornamento del piano principale di ciascuna sala operatoria, che fissa le operazioni da effettuare giorno per giorno per un periodo di tempo non molto lungo, in genere una o due settimane (Guinet and Chaabane, 2003; Rossi-Turk, 2002).

L'assegnazione alle sale operatorie ha come obiettivo quello di minimizzare sia gli straordinari, sia i tempi di undertime (tempi di inattività), ma anche il tempo di attesa dei pazienti tra la data di ricovero e la data dell'operazione, in modo tale da aumentare la loro soddisfazione e la disponibilità di letti.

La funzione obiettivo è quindi convertita in una funzione di costo, che dovrà essere minimizzata.

Teil (2000) analizza i costi di un centro chirurgico e nota come i costi fissi siano molto alti se confrontati con quelli variabili. Ciò si può spiegare con il fatto che una sala operatoria può rimanere inutilizzata e quindi può avere un impatto enorme sui costi. Inoltre al di fuori del regolare orario di lavoro ciascun membro dello staff operatorio è pagato per il lavoro straordinario: Dexter (2001) afferma che il costo degli straordinari è circa 1.75 volte il costo orario regolare. Infine si può notare come il costo di ospedalizzazione è proporzionale al numero di giorni in cui il paziente rimane in ospedale prima dell'intervento, perciò sarebbe opportuno programmare gli interventi, e quindi i ricoveri, in modo tale da minimizzare la permanenza di un paziente nell'ospedale.

Quindi l'assegnazione delle operazioni deve tenere conto di vari vincoli, quali l'orario di lavoro regolare, il massimo numero di ore di straordinari consentite dalla legge, la disponibilità di chirurghi e la tipologia di macchinari presenti in ciascuna sala operatoria. Supponiamo perciò che le ore di disponibilità di ciascun chirurgo, l'orario

regolare di lavoro e le ore di straordinari siano tutti noti. Assumiamo che tutte le risorse necessarie per le procedure anestetiche e chirurgiche (ad eccezione di quelle necessarie per l'intervento vero e proprio) siano disponibili in qualsiasi sala, anche oltre il tempo regolare di lavoro, mentre quelle necessarie per l'intervento vero e proprio, che richiedono particolari attrezzature, possono non essere disponibili in tutte le sale operatorie. Infine consideriamo che ogni paziente viene ricoverato il giorno precedente all'intervento programmato, per cui i pazienti schedulati per il giorno t sono già stati ricoverati, e che è possibile cancellare un intervento programmato a causa di eventi improvvisi, come complicazioni nei pazienti o emergenze.

E' quindi possibile creare un modello matematico basato sulla programmazione intera mista per risolvere il problema di assegnazione.

1.1 Notazione

Nel modello matematico si assumano i seguenti parametri:

D_{tot_i}	durata della fase pre-operatoria dell'operazione i-esima (in minuti)
D_{h_i}	data (giorno) di ricovero del paziente i-esimo
t	data (giorno) di schedulazione
C_m	durata di apertura regolare della sala operatoria m-esima (in minuti)
K_m	disponibilità di straordinari per la sala operatoria m-esima (in minuti)
C_h	costo di ricovero giornaliero (in euro)
C_o	costo al minuto degli straordinari (in euro)
C_u	costo al minuto del tempo di inattività (in euro)
d_{int_i}	data di scadenza dell'operazione i-esima (ultimo giorno di inizio possibile)
S	numero di sale operatorie
N_t	numero di pazienti che possono essere operati nel giorno t
λ_i	1 se il paziente i-esimo transita nella terapia intensiva, 0 altrimenti
R	numero di letti disponibili nella terapia intensiva durante il giorno t
$\eta_{i,p}$	1 se il chirurgo p-esimo è assegnato all'operazione i-esima, 0 altrimenti
L	numero di chirurghi
H_p	massimo tempo lavorativo del chirurgo p-esimo nel giorno t (in minuti)
$\mu_{i,m}$	1 se l'attrezzatura necessaria per il paziente i-esimo è disponibile nella sala operatoria m-esima, 0 altrimenti

Una soluzione al problema di assegnazione è data dalla variabile intera $x_{i,m}$, che assume valore 1 se l'operazione i-esima è assegnata alla sala operatoria m-esima, 0 in caso contrario. Inoltre per trasformare il modello in un programma lineare è necessario introdurre due variabili reali intermedie, y_m e z_m .

2.2 Impostazione del modello

Il modello può essere realizzato come segue:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^S \sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} (t - Dh_i - 1) C_h + \sum_{i=1}^{N_1} \left(1 - \sum_{m=1}^S x_{i,m} \right) (t - Dh_i) C_h + \sum_{m=1}^S C_o y_m \\ & + \sum_{m=1}^S C_u z_m \end{aligned} \quad (1)$$

Soggetto ai vincoli:

$$\sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} Dtot_i - C_m \leq K_m \quad \forall m \in [1 \dots S] \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^S \sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} Dtot_i \eta_{i,m} \leq H_p \quad \forall p \in [1 \dots L] \quad (3)$$

$$x_{i,m} \leq \mu_{i,m} \quad \forall m \in [1 \dots S], \quad \forall i \in [1 \dots N_1] \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_1} \lambda_i \sum_{m=1}^S x_{i,m} \leq R \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^S x_{i,m} = 1 \quad \forall i \in [1 \dots N_1] \quad / \quad dint_i = t \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^S x_{i,m} \leq 1 \quad \forall i \in [1 \dots N_1] \quad / \quad dint_i \geq t \quad (7)$$

$$y_m \geq \sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} Dtot_i - C_m \quad \forall m \in [1 \dots S] \quad (8)$$

$$y_m \geq 0 \quad \forall m \in [1 \dots S] \quad (9)$$

$$z_m \geq C_m - \sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} Dtot_i \quad \forall m \in [1 \dots S] \quad (10)$$

$$z_m \geq 0 \quad \forall m \in [1 \dots S] \quad (11)$$

$$x_{i,m} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in [1 \dots N_1], \quad \forall m \in [1 \dots S] \quad (12)$$

La funzione obiettivo (1) minimizza i costi dovuti al mantenimento dei pazienti in ospedale in attesa dell'intervento chirurgico, tenendo conto dei costi degli straordinari e dell'inattività.

Il vincolo (2) specifica che ogni sala operatoria viene utilizzata solamente durante l'orario di apertura permesso. Il vincolo (3) assicura che ogni chirurgo opera rispettando la propria disponibilità nel centro chirurgico. Il vincolo (4) proibisce l'assegnazione di un'operazione chirurgica ad una sala operatoria quando l'equipaggiamento richiesto non è disponibile. Il numero di pazienti che vengono trasferiti al centro di terapia intensiva, successivamente all'intervento, è limitato dalla disponibilità di posti letto (vedi vincolo (5)).

Il vincolo (6) assicura che la data di scadenza (ultima data possibile) di ogni intervento sia rispettata, mentre il vincolo (7) specifica che ogni operazione può essere eseguita al massimo una volta. I vincoli (8) e (9) permettono alla variabile intermedia y_m di assumere il valore massimo tra 0 e $\sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} D_{tot_i} - C_m$, mentre i vincoli (10) e (11) permettono alla variabile intermedia z_m di assumere il valore massimo tra 0 e $C_m - \sum_{i=1}^{N_1} x_{i,m} D_{tot_i}$. Infine il vincolo (12) assicura l'integralità delle variabili.

Questo step di assegnazione delle operazioni alle sale operatorie non specifica la sequenza di esecuzione ottima di tali operazioni, ma solamente la sala operatoria in cui dovranno essere eseguite; perciò saranno in seguito proposte due strategie alternative per risolvere il problema di sequencing, il quale appunto permette di dare un ordine non casuale alle operazioni da eseguire in un dato giorno in una certa sala operatoria.

2.3 Codifica in linguaggio GAMS

SETS room/m1*m3/, operation/i1*i8/, chirurgo/p1*p4/;

PARAMETERS apereg(room)/m1 480,m2 480,m3 480/,
strao(room)/m1 240,m2 240,m3 240/,
dtot(operation) /i1 190,i2 170,i3 210,i4 150,i5 130,i6 170,i7 220,i8 170/,
dh(operation)/i1 10,i2 12,i3 9,i4 12,i5 11,i6 13,i7 13,i8 11/,
dint(operation)/i1 15,i2 16,i3 22,i4 18,i5 19,i6 17,i7 19,i8 15/,
lambda(operation)/i1 0,i2 1,i3 1,i4 1,i5 0,i6 1,i7 0,i8 0/,
massimo(chirurgo)/p1 720,p2 720,p3 480,p4 480/;

SCALARS schedate/15/, costoricgiorn/350/, coststrao/7.00/, costinut/4.00/,
terapia/8/;

TABLE eta(operation,chirurgo)

	p1	p2	p3	p4
i1	0	1	0	0
i2	0	1	0	0
i3	1	0	0	0
i4	0	0	1	0
i5	0	0	0	1
i6	1	0	0	0
i7	0	1	0	0
i8	0	0	1	0;

TABLE mu(operation,room)

	m1	m2	m3
i1	1	1	0
i2	1	1	1
i3	0	1	1
i4	0	0	1
i5	1	1	1
i6	1	1	1
i7	1	0	1
i8	1	1	1;

VARIABLES x(operation,room), y(room), z(room), costot;

POSITIVE VARIABLES y,z;

INTEGER VARIABLE x;

x.up(operation,room) = 1;

x.lo(operation,room) = 0;

y.lo(room) = 0;

z.lo(room) = 0;

EQUATIONS obiettivo, vinc1(room), vinc2(chirurgo), vinc3(operation,room), vinc4,
vinc5(operation), vinc6(operation), vinc7(room), vinc8(room);

obiettivo..costot =e= sum(room,sum(operation, x(operation,room)*(schedate -
dh(operation) - 1)*costoricgiorn)) + sum(operation, (schedate -
dh(operation))*costoricgiorn*(1 - sum(room, x(operation,room)))) +
sum(room, coststrao*y(room)) + sum(room, costinut*z(room));

vinc1(room)..sum(operation, x(operation,room)*dtot(operation)) - apereg(room) =l=
strao(room);

vinc2(chirurgo)..sum(operation, sum(room, x(operation,room)* dtot(operation)*
eta(operation,chirurgo))) =l= massimo(chirurgo);

vinc3(operation,room)..x(operation,room) =l= mu(operation,room);

vinc4..sum(operation, lambda(operation)*sum(room, x(operation,room))) =l= terapia;

vinc5(operation) \$(dint(operation) eq schedate)..sum(room, x(operation,room)) =e= 1;

vinc6(operation) \$(dint(operation) gt schedate)..sum(room, x(operation,room)) =l= 1;

```
vinc7(room)..y(room) =g= sum(operation, x(operation,room)*dtot(operation)) -  
    apereg(room);
```

```
vinc8(room)..z(room) =g= apereg(room) - sum(operation, x(operation,room)*  
    dtot(operation));
```

```
MODEL assegnazione/all/;
```

```
OPTION mip=cplex, optcr = 0.0;
```

```
SOLVE assegnazione USING mip MINIMIZING costot;
```

```
DISPLAY costot.l, x.l;
```

In base ai dati immessi in questo esempio numerico, il calcolatore restituisce i seguenti valori per le variabili in esame:

```
---- 54 VARIABLE costot.L          = 7910.000
```

```
---- 54 VARIABLE x.L
```

	m1	m2	m3
i1	1.000		
i2			1.000
i3		1.000	
i4			1.000
i5		1.000	
i6			1.000
i7	1.000		
i8		1.000	

CAPITOLO 3

Sequencing delle operazioni

Alla fine di ogni operazione chirurgica il paziente dovrà essere trasferito in un letto presente nella recovery room, dove può ricevere le cure e le procedure post-anestetiche necessarie, ad eccezione di qualche intervento per il quale la fase post-anestesia richiede comunque l'utilizzo della sala operatoria. Il trasferimento del paziente nella recovery room avviene senza alcun tempo di attesa all'interno della sala operatoria, a meno che il numero di letti o di infermieri non siano in misura inadeguata se confrontati con il numero di sale operatorie. In questo testo supponiamo che il numero di infermieri sia adeguato in confronto al numero di sale operatorie. Ciò nonostante l'indisponibilità di un posto letto nella recovery room influisce sulla tempistica del processo operatorio di un paziente, in quanto sarà necessario attendere che un posto si liberi, e solo allora sarà possibile iniziare le procedure post-anestetiche.

Perciò l'indisponibilità di posti letto incrementa il tempo improduttivo della sala operatoria e fa diminuire la sua redditività economica. Inoltre questa perdita di tempo può generare ritardi anche nelle altre sale operatorie, soprattutto se un chirurgo deve operare in differenti sale durante la giornata. Se il numero di posti letto nella recovery room è adeguato in confronto al numero di sale operatorie, non c'è nessun bisogno di considerare la disponibilità di tali posti letto nella programmazione degli interventi nelle sale operatorie (Jebali et al., 2003a). Diversamente diventa assolutamente necessario considerare la disponibilità di posti letto nelle recovery room (Jebali et al., 2003b).

In questo testo si porrà l'attenzione sullo studio di una sala operatoria considerando il numero di letti in una recovery room come una risorsa soggetta al fenomeno del collo di bottiglia, ovvero come un punto critico dell'intero sistema in quanto rallentamenti in questa precisa fase si ripercuoterebbero su tutto il centro chirurgico.

Guinet and Chaabane (2003) tengono conto della disponibilità di posti letto nella recovery room durante la programmazione della sala operatoria. Essi descrivono lo scheduling della sala operatoria come un problema a due stadi, in cui l'obiettivo è quello di minimizzare il tempo che trascorre tra l'inizio dell'operazione sul primo paziente e la fine dell'operazione sull'ultimo paziente. Kharraja et al. (2002) invece descrivono lo stesso problema come un flow-shop ibrido pluri-stadio senza

“magazzino” intermedio, nel senso che terminato l'intervento chirurgico il paziente viene mandato nella recovery room o resta in sala, ma non può attendere in un altro luogo la liberazione di un posto letto. Il termine flow-shop, invece, indica che il sistema sarà ottimizzato come quello delle produzioni in linea, ovvero tenderà a massimizzare la velocità di produzione (nel caso del centro chirurgico cercherà di massimizzare la velocità con cui si susseguiranno le operazioni) mantenendo un'elevata qualità di servizio.

In questo testo il problema viene identificato come un flow-shop ibrido a due stadi. Il primo passo è rappresentato dalle m_1 sale operatorie, mentre il secondo passo è rappresentato dagli m_2 letti nelle recovery rooms. L'indisponibilità di un letto nella recovery room di un centro chirurgico, al termine di un intervento chirurgico, influisce irrimediabilmente sull'inizio della fase post-anestesia, la quale ovviamente avrà inizio non appena si libera un posto letto, ma nel frattempo il paziente deve rimanere nella sala operatoria anche ad intervento concluso: proprio per questo motivo è possibile affermare che il tempo trascorso da un paziente nella fase post-anestesia è condiviso tra la recovery room e la sala operatoria.

Per trattare il problema sopra esposto saranno proposte due strategie concettualmente diverse:

- Strategia 1: L'assegnazione delle operazioni alle sale operatorie ottenuta grazie al precedente modello non viene riconsiderata, ovvero verrà solamente deciso l'ordine con cui eseguire tali operazioni (in un certo senso l'assegnazione precedentemente ottenuta è considerata come input per il sequencing);
- Strategia 2: L'assegnazione delle operazioni alle sale operatorie ottenuta grazie al modello precedente viene ridefinita, con l'obiettivo che risulti meno vincolata, ovvero verrà deciso sia a quale sala operatoria assegnare le operazioni, sia l'ordine con cui verranno effettuate.

L'obiettivo è quello di trovare un programma operativo che minimizzi il totale degli straordinari (Dexter, 2000). Il sequencing delle operazioni, a differenza della semplice assegnazione, tiene conto di un maggior numero di dettagli relativi all'utilizzo delle risorse e considera addirittura la fase post-anestesia attraverso il numero di posti disponibili, per cui fornirà delle stime più precise sui costi complessivi.

3.1 Notazione

Nel modello matematico si assumano:

- N_2 numero di operazioni da programmare nel giorno t
- L_r numero di letti nella recovery room
- p_i^1 durata dell'operazione i -esima
- pre_i^1 tempo di setup dell'operazione i -esima
- n_i^1 tempo di pulizia della sala operatoria per l'operazione i -esima
- p_i^2 durata della fase di post-anestesia per il paziente i -esimo
- d_i^1 durata della fase pre-operatoria dell'operazione i -esima
- $[A_p, B_p]$ intervallo di tempo durante il quale il chirurgo p -esimo può operare
- O_p momento di apertura del centro chirurgico nel giorno t
- M numero che verifica $M \geq \text{Max}_{m \in [1..S]} (K_m + C_m)$
- C_m durata di apertura regolare della sala operatoria m -esima (in minuti)
- K_m disponibilità di straordinari per la sala operatoria m -esima (in minuti)
- $\eta_{i,p}$ 1 se il chirurgo p -esimo è assegnato all'operazione i -esima, 0 altrimenti
- $\mu_{i,m}$ 1 se l'attrezzatura necessaria per il paziente i -esimo è disponibile nella sala operatoria m -esima, 0 altrimenti
- S numero di sale operatorie
- L numero di chirurghi

Una soluzione al problema di sequencing è data dalle seguenti variabili intere:

- $x_{i,m}$ 1 se l'operazione i -esima è assegnata alla sala m -esima, 0 altrimenti
- $f_{k,i}$ 1 se il paziente i -esimo è assegnato al letto k -esimo, 0 altrimenti

$\theta_{i,j}$ 1 se il primo step dell'operazione i-esima inizia prima di quello dell'operazione j-esima, 0 altrimenti

$\pi_{i,j}$ 1 se il secondo step dell'operazione i-esima inizia prima di quello dell'operazione j-esima, 0 altrimenti

e dalle seguenti variabili reali:

t_i^1 inizio dell'operazione i-esima nella sala operatoria

t_i^2 inizio dell'operazione i-esima nella recovery room

α_i^1 durata della fase post-anestetica nella sala operatoria del paziente i-esimo

Inoltre vengono introdotte due variabili intermedie:

H_m tempo di chiusura della sala operatoria m-esima nel giorno t

Y_m tempo straordinario della sala operatoria m-esima

3.2 Impostazione del modello

Il modello può essere realizzato come segue:

$$\sum_{m=1}^M Y_m \quad (13)$$

Soggetto ai vincoli:

$$t_j^1 + pre_j^1 \geq (t_i^1 + pre_i^1 + p_i^1) - M(3 - \theta_{i,j} - \eta_{i,p} - \eta_{j,p}) \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i \neq j, \\ \forall p \in [1..L] \quad (14)$$

$$t_i^1 + pre_i^1 + p_i^1 - M(1 - \eta_{i,p}) \leq B_p \quad \forall i \in [1..N_2], \quad \forall p \in [1..L] \quad (15)$$

$$t_i^1 + pre_i^1 \geq \eta_{i,p} \cdot A_p \quad \forall i \in [1..N_2], \quad \forall p \in [1..L] \quad (16)$$

$$t_j^1 \geq (t_i^1 + d_i^1 + \alpha_i^1) - M(3 - \theta_{i,j} - x_{i,m} - x_{j,m}) \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i \neq j, \\ \forall m \in [1..S] \quad (17)$$

$$x_{i,m} \leq \mu_{i,m} \quad \forall i \in [1..N_2], \quad \forall m \in [1..S] \quad (18)$$

$$t_j^2 \geq (t_i^2 + p_i^2 - \alpha_i^1) - M(3 - \pi_{i,j} - f_{k,i} - f_{k,j}) \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i \neq j, \\ \forall k \in [1..L_r] \quad (19)$$

$$\theta_{i,j} + \theta_{j,i} = 1 \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i > j \quad (20)$$

$$\pi_{i,j} + \pi_{j,i} = 1 \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i > j \quad (21)$$

$$t_j^1 \geq t_i^1 - M(1 - \theta_{i,j}) \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i \neq j \quad (22)$$

$$t_j^2 \geq t_i^2 - M(1 - \pi_{i,j}) \quad \forall i, j \in [1..N_2] \setminus i \neq j \quad (23)$$

$$t_i^2 = (t_i^1 + pre_i^1 + p_i^1 + \alpha_i^1) \quad \forall i \in [1..N_2] \quad (24)$$

$$\alpha_i^1 \leq p_i^2 \quad \forall i \in [1..N_2] \quad (25)$$

$$H_m \geq t_i^2 + n_i^1 - M(1 - x_{i,m}) \quad \forall i \in [1..N_2], \quad \forall m \in [1..S] \quad (26)$$

$$Y_m \geq H_m - (C_m + O_p) \quad \forall m \in [1..S] \quad (27)$$

$$Y_m \geq 0 \quad \forall m \in [1..S] \quad (28)$$

$$Y_m \leq K_m \quad \forall m \in [1..S] \quad (29)$$

$$\sum_{m=1}^S x_{i,m} = 1 \quad \forall i \in [1..N_2] \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^K f_{k,i} = 1 \quad \forall i \in [1..N_2] \quad (31)$$

$$x_{i,m}, f_{k,i}, \theta_{i,j}, \pi_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall m \in [1..S], \quad \forall k \in [1..L_r], \quad \forall i,j \in [1..N_2] \quad (32)$$

$$\alpha_i^1 \geq 0 \quad \forall i \in [1..N_2] \quad (33)$$

$$t_i^1, t_i^2 \geq 0_p \quad \forall i \in [1..N_2] \quad (34)$$

La funzione obiettivo (13) minimizza gli straordinari totali, considerando la somma di quelli di ciascuna sala operatoria m-esima. Il vincolo (14) stabilisce che un chirurgo non può operare più di un paziente per volta, mentre i vincoli (15) e (16) assicurano che ciascun chirurgo lavori durante l'intervallo di tempo in cui è disponibile.

Il vincolo (17) implica che una sala operatoria non può essere occupata da più di un paziente, mentre il vincolo (18) impedisce l'assegnazione di un intervento ad una sala operatoria non equipaggiata. Inoltre ogni letto nella recovery room non può essere occupato da più di un paziente (vincolo (19)).

I vincoli (20), (21), (30) e (31) assicurano che le variabili $x_{i,m}, f_{k,i}, \theta_{i,j}, \pi_{i,j}$ siano intere.

I vincoli (22) e (23) indicano che se un intervento inizia prima di un altro significa che ha un minore tempo di inizio.

Il vincolo (24) definisce la relazione tra il sequencing nella sala operatoria e il sequencing nella recovery room. Invece i vincoli (25) e (33) assicurano che la durata della fase di post-anestesia del paziente nella sala operatoria è positiva e minore della durata totale di tale fase.

Il vincolo (26) definisce il tempo di chiusura della sala operatoria, nel caso sia utilizzata durante gli straordinari; i vincoli (27) e (28) obbligano la variabile intermedia Y_m ad assumere il valore massimo tra 0 e $H_m - (C_m + O_p)$.

Il vincolo (29) specifica che in ogni sala operatoria gli straordinari non devono superare il valore massimo; infine il vincolo (34) assicura che tutte le operazioni abbiano inizio dopo l'apertura del centro di chirurgia.

Il modello appena illustrato viene utilizzato nel caso della strategia 2, ovvero il sequencing con ri-assegnazione; nel caso invece il manager non scelga la ri-assegnazione, ma solamente il sequencing, occorrerà considerare $x_{i,m}$ non più come variabile, bensì come un dato certo ricavato dal modello di assegnazione. In quest'ottica sarà opportuno eliminare i vincoli (18) e (30) perché non sarebbero più utili.

CAPITOLO 4

Sperimentazione dei modelli

Con lo scopo di valutare le prestazioni dei modelli proposti, sono stati testati 25 problemi di diverse dimensioni, che possono essere raggruppati in cinque diversi sottoinsiemi. Ciascun sottogruppo è composto da cinque problemi caratterizzati dallo stesso numero di operazioni chirurgiche da programmare (N_i : 11, 12, 13, 4, 15). Tuttavia ogni problema all'interno di un determinato sottogruppo è caratterizzato da tempi di esecuzione diversi.

In tutti i problemi si consideri il caso di un centro chirurgico composto da tre sale operatorie, ciascuna delle quali ha un tempo di apertura regolare di 480 minuti e una disponibilità di straordinari di 240 minuti. I chirurghi che operano nel centro di chirurgia sono quattro e la recovery room contiene quattro posti letti. La data di schedulazione (t) è impostata a 15.

Il massimo tempo di lavoro per ciascuno dei quattro chirurghi è rispettivamente 720 minuti, 720 minuti, 480 minuti e 480 minuti. Il centro chirurgico apre al tempo 0.

L'intervallo di tempo all'interno del quale ognuno dei chirurghi può operare nel giorno t è rispettivamente $[0,720]$, $[0,720]$, $[0,480]$ e $[120,600]$.

Il costo di ospedalizzazione giornaliera è impostato a 366.41 € (Guinet and Chaabane, 2003); il costo al minuto degli straordinari è 7.06 €; il costo al minuto dell'undertime è 3.97 € (Teil, 2000).

Per generare i tempi di durata delle operazioni chirurgiche è stata impiegata una distribuzione log-normale con una media di 180 minuti e una deviazione standard di 60 minuti: il tempo minimo possibile risulta 30 minuti, quello massimo 420 minuti.

Il tempo di setup di una sala operatoria è impostato a 10 minuti se l'operazione dura meno di 90 minuti, altrimenti 20 minuti.

Il tempo di setup e anestesia del paziente è di 10 minuti (se l'operazione dura meno di 60 minuti), 20 minuti se l'operazione dura tra i 60 e i 120 minuti, 30 minuti negli altri casi.

I tempi di post-anestesia, come nel caso di quelli di durata dell'intervento, sono generati da una distribuzione log-normale con media di 170 minuti e deviazione standard di 15 minuti. Tutti questi dati sono ricavati da Kharraja et al. (2002).

I rimanenti dati sono scelti casualmente da un insieme di 15 operazioni.

4.1 Risultati

No.	N ₁	Z(IA)	CPU(IA)	N ₂	DS	Z(SS1)	CPU(SS1)	Z(SS2)	CPU(SS2)
1	11	3775,27	1,10	8	1412	48	1,68	19	10,74
2	11	3074,20	1,51	10	1404	0	6,14	0	296,13
3	11	3082,44	1,35	10	1449	17	10,87	17	13005,69
4	11	3844,27	1,35	8	1414	36	1,68	18	29,49
5	11	3281,53	1,35	10	1457	39	6,45	39	102,99
6	12	5275,11	1,42	9	1420	6	2,64	6	198,55
7	12	4379,85	1,11	12	1352	0	6,52	0	5,98
8	12	6185,65	1,36	7	1486	119	1,17	85	1,67
9	12	4586,56	1,41	11	1467	27	16,35	27*	1018,00
10	12	5353,89	1,21	9	1414	11	1,71	11	103,98
11	13	5918,47	1,87	9	1437	28	2,51	22	1023,51
12	13	5579,24	1,67	10	1444	9	3,69	9	2132,97
13	13	5375,57	1,42	11	1475	50	10,53	37	1458,83
14	13	6276,95	1,55	8	1439	43	1,66	43	3,55
15	13	5316,34	1,81	11	1393	0	3,33	0	48,84
16	14	6024,12	1,31	10	1463	33	5,33	27	2507,37
17	14	6285,19	1,23	9	1448	132	3,10	100	80,31
18	14	6316,34	1,26	9	1418	22	1,70	12	7,51
19	14	6037,86	1,28	10	1418	8	2,02	8	646,86
20	14	5128,55	4,12	13	1492	52	286,12	52*	8115,76
21	15	6611,30	2,51	9	1436	0	8,28	0	142,38
22	15	6874,81	2,10	9	1461	33	4,01	33	78,71
23	15	6615,27	2,14	10	1495	55	28,68	55	1337,63
24	15	6566,11	2,13	10	1488	106	10,23	59	1637,63
25	15	5930,69	3,73	11	1445	8	12,99	8	2894,32

* Miglior soluzione trovata (non necessariamente l'ottimo) dopo il tempo di calcolo indicato

La tabella mostra i risultati ottenuti al calcolatore, attraverso l'utilizzo del software ILOG OPL STUDIO 3.0, con la versione 7.0 di CPLEX.

Per ogni configurazione di problema essa mostra: il numero del problema (No), il numero di operazioni presenti nello scheduling (N₁), il valore della funzione obiettivo ottenuto dal modello di assegnazione delle operazioni alle sale operatorie (Z(IA)) in euro, il tempo impiegato dal calcolatore per ottenere la soluzione (CPU(IA)) in secondi, il numero di operazioni da realizzare (N₂), il tempo totale di utilizzo del centro chirurgico (DS) in minuti, senza considerare i risultati del sequencing. Inoltre sono mostrati il valore della funzione obiettivo dato dal modello di scheduling relativo allo scenario 1

(Z(SS1)), ovvero al sequencing senza ri-assegnazione, e quello dato dal modello di scheduling con ri-assegnazione (Z(SS2)) in minuti; sono inoltre indicati i rispettivi tempi impiegati dal calcolatore per raggiungere una soluzione ottimale, in secondi.

Si nota come il numero medio di operazioni da eseguire nel centro chirurgico è 9.72, e l'occupazione media del centro (includendo i tempi di setup e pulitura della sala) è del 100%. Tuttavia uno studio ha definito come occupazione media di una sala operatoria il rapporto tra il tempo in cui la sala è occupata da un paziente e il numero di ore disponibili per la chirurgia nella sala operatoria in esame (il tempo di turnover, ovvero setup e pulitura della sala, non viene considerato). Se si adotta quest'ultima definizione, l'occupazione media del centro chirurgico è del 76% e quindi il tempo di turnover rappresenta il 24% del tempo di occupazione. Dexter constatò (in OR Manager, Gennaio 2000) che ridurre il tempo di turnover può essere utile solamente per aumentare la soddisfazione del chirurgo (Mathias, 2000).

Nella pratica una percentuale di occupazione massima accettabile è dell'85%; tuttavia limitare a questa percentuale l'occupazione può portare a costi aggiuntivi di ricovero, ma questo aspetto è bilanciato dal fatto che è presente una maggiore flessibilità della programmazione, per cui possono essere introdotti in caso di necessità anche casi più urgenti inizialmente non previsti.

Per la strategia 1 la soluzione ottima è stata trovata in pochissimo tempo (molto meno di un'ora) per ciascun problema, mentre usando la strategia 2 il 12% dei casi ha impiegato più di un'ora per raggiungere l'ottimo; inoltre utilizzando la prima strategia si sono ottenuti ottimi risultati: nel 64% dei casi l'ottimo è stato ottenuto con un tempo di calcolo irrilevante se confrontato con il corrispondente della seconda strategia. Per questi motivi se lo scheduling deve essere costruito in pochissimo tempo, le due strategie possono essere usate contemporaneamente e si sceglie la migliore soluzione tra le due.

Inoltre il costo ottenuto dal modello di assegnazione non si discosta molto da quello ottenuto con le due strategie di sequencing, in quanto per la strategia 1 c'è un incremento dell'1% mentre per la strategia 2 l'aumento è dello 0.4%: per questo motivo non è molto utile analizzare nel dettaglio i costi ottenuti dal sequencing perché non influiscono in maniera evidente.

CONCLUSIONI

In questo testo è stato presentato un approccio a due step per risolvere il problema sempre più importante dello scheduling delle sale operatorie. Il primo step, come visto, consiste nell'assegnazione delle operazioni alle sale operatorie. Il secondo step, invece, consiste nel dare un ordine (sequencing) alle operazioni che sono state assegnate a ciascuna sala operatoria dal primo step. Relativamente alla fase di sequencing sono state presentate due strategie alternative:

- 1) sequencing puro;
- 2) sequencing con ri-assegnazione.

Questo approccio si basa sull'obiettivo di incrementare l'utilizzo delle sale operatorie. Le simulazioni al computer mostrano una bella performance del sequencing delle operazioni senza ri-considerare l'assegnazione, oltre ad una buona accuratezza della fase di assegnazione in termini di minimizzazione dei costi.

Non è stato considerato il fatto che possono esistere degli interventi con maggiore priorità rispetto ad altri: ad esempio certi chirurghi preferiscono operare seguendo un ordine di difficoltà decrescente, oppure per ragioni di igiene e sicurezza operazioni con un alto rischio di contaminazione vengono effettuate per ultime.

Lavori futuri integreranno all'approccio corrente il concetto di priorità; un altro aspetto importante da studiare in futuro sarà la dimensione ottimale delle recovery rooms in termini di disponibilità di letti.

Ci saranno quindi più leve d'azione sulle quali il manager potrà agire, sempre con l'obiettivo fondamentale di limitare i costi cercando di mantenere un elevato livello di servizio.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Professor Giorgio Romanin Jacur per la disponibilità e per la cortesia mostratami durante lo sviluppo di questo lavoro, per tutto l'aiuto fornito e per la possibilità di sviluppare e approfondire le mie conoscenze in questo campo.

Un ringraziamento speciale ai miei genitori, Giuseppe e Luciana, che con il loro prezioso sostegno mi hanno accompagnato fino a questo traguardo, dandomi sempre motivo di guardare avanti. Ringrazio tutti i miei familiari, in particolare i nonni che mi hanno sempre offerto consigli validi con la maturità di una vita alle spalle.

Grazie a Caterina, che mi ha sostenuto sempre durante il mio percorso e che riesce a farmi sorridere anche nei momenti più difficili.

Ringrazio gli amici di sempre e quelli conosciuti all'università: grazie a Leonardo, Alice, Sofia, Francesca, Anna e Florentina, per avermi fatto trascorrere tre anni di lezioni in ottima compagnia, incitandomi continuamente allo studio, che con loro non è mai stato pesante.

Un ultimo ringraziamento a tutti quelli che non ho citato e che, nel loro piccolo, hanno contribuito a farmi raggiungere al meglio questo traguardo.

BIBLIOGRAFIA

Dexter, F., 2000. A strategy to decide whether to move the last case of the day in an operating room to other empty operating room to decrease overtime labor costs. International Anesthesia Research Society 91, 925-928.

Dexter, F., 2001. Cost implications of various operating room scheduling strategies. American Society of Anesthesiologist's Clinical Update Program 52 (262), 1-6.

Dexter, F., Macario, A., 1996. Applications of information system to operating room scheduling. Anesthesiology 85 (6).

Dexter, F., Tinker, J.H., 1995. Analysis of strategies to decrease postanesthesia care unit costs. Anesthesiology 82 (1).

Guinet, A., Chaabane, S., 2003. Operating theatre planning. International Journal of Production Economics 85, 69-81.

Gordon, T., Lyles, A.P.S, Fountain, J., 1988. Surgical unit time review: Resource utilization and management implications. Journal of Medical Systems 12, 169-179.

Jebali, A., Hadj Alouane, A., Ladet, P., 2003a. Performance comparison of two strategies for operating room scheduling, CD-ROM ISCIII'03 (International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics 2003), Nabeul, Tunisia, May.

Jebali, A., Hadj Alouane, A., Ladet, P., 2006. Operating rooms scheduling, International Journal of Production Economics 99, 52-62.

Jebali, A., Ladet, P., Hadj Alouane, A., 2003b. Une approche heuristique pour la construction du programme opératoire, Actes du 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel, Quebec, Canada, Octobre.

Kharraja, S., Chaabane, S., Marcon, E., 2002. Evaluation de performances pour deux stratégies de programmation opératoire de bloc, Actes de la 2^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nantes, France.

Marcon, E., Kharraja, S., 2002. Etude exploratoire sur la stratégie de dimensionnement d'une SSPI, Actes de la 2^{ème} Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nantes, France.

Marcon, E., Kharraja, S., Simmonet, G., 2001b. Minimization of the risk of no realization for the planning of the surgical interventions into the operating theatre, Eight IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'2001, France, pp. 675-680.

Mathias, J.M., 2000. Benchmarking OR Turnover Times, OR Manager, June, vol. 16, no. 6.

Rossi-Turk, D., 2002. Comment garantir la qualité et la sécurité au bloc opératoire par une programmation et une logistique innovante? Santé et Systémique 6 (1-2-3).

Teil, A., 2000. Coûts d'une minute de bloc opératoire et Coûts d'un service d'anesthésie: Quelles utilisations. Actes du colloque SNPHAR, Djerba 165-181.

Wright, I.H., Kooperberg, C., Bonar, A.B., Bashein, G., 1996. Statistical modeling to predict elective surgery time. Anesthesiology 85 (6).

Zhou, J., Dexter, F., 1998. Method to assist in the scheduling of add-on surgical cases: Upper prediction bounds for surgical case durations based on the log-normal distribution. Anesthesiology 89 (5).