

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Gestionale

## **Schedulazione di sale operatorie con risorse limitate condivise su più sale**

Tesi di Laurea Magistrale



**Relatore**

Federico Della Croce

**Correlatore**

Carlo Rafele

**Candidato**

Luca Girolodi

Anno Accademico 2018/2019

# Contenuti

<b>1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Il Sistema Sanitario Nazionale .....</b>	<b>3</b>
2.1	Le criticità del Sistema .....	4
2.2	L'efficienza e la riduzione degli sprechi.....	6
2.3	Le difficoltà per ottenere l'efficienza in sala operatoria .....	8
<b>3</b>	<b>Il Blocco Operatorio .....</b>	<b>10</b>
3.1	Analisi Bibliografica .....	10
3.2	L'ospedale di Ivrea .....	14
3.2.1	Il blocco operatorio .....	14
3.2.2	L'équipe di sala .....	16
3.2.3	L'operazione chirurgica .....	18
3.3	Osservazioni e criticità.....	20
<b>4</b>	<b>Strumento di supporto alla pianificazione del blocco operatorio .....</b>	<b>23</b>
4.1	Stato dell'arte .....	24
4.1.1	L'approccio di risoluzione .....	27
4.1.2	Modelli di programmazione lineare intera .....	28
4.2	Descrizione del problema.....	32
4.3	Il Modello.....	34
4.3.1	I dati di input .....	34
4.3.2	Le variabili .....	35
4.3.3	La normalizzazione .....	35
4.3.4	I vincoli .....	36
4.3.5	La funzione obiettivo .....	37
4.3.6	Simulazione della soluzione.....	38

4.4	Implementazione del modello .....	39
4.4.1	Algoritmo .....	42
<b>5</b>	<b>Risultati</b> .....	<b>44</b>
5.1	Istanze generate per l'ospedale di Ivrea .....	44
5.2	Generalizzazione di operazioni in conflitto .....	49
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b> .....	<b>56</b>
6.1	Il lavoro svolto .....	56
6.2	Miglioramenti implementabili .....	58
<b>Appendice</b>	.....	<b>63</b>
A	Modello in Mosel .....	64
B	Dati delle istanze .....	72
<b>Bibliografia</b>	.....	<b>79</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Il mondo ospedaliero sta affrontando un periodo di grande cambiamento, dovuto a fattori contrastanti:

- l'aumento nella domanda di assistenza sanitaria e di prestazioni chirurgiche, dovute all'invecchiamento della popolazione
- la riduzione di risorse, a causa del periodo di crisi economica globale
- l'aumento dei costi delle cure ultra-specialistiche

Di fronte a questa situazione gli ospedali devono essere in grado di mantenere tre caratteristiche prioritarie: efficienza, sicurezza e contenimento dei costi, mantenendo sempre come obiettivo primario il benessere del paziente e la qualità della prestazione a lui fornita.

In questo contesto è fondamentale un appropriato utilizzo della sale operatorie. Sale operatorie sotto-utilizzate inducono costi non trascurabili per gli ospedali e generano tempi di attesa troppo elevati per i pazienti. Sale operatorie utilizzate costantemente oltre il giusto invece possono portare il personale dell'ospedale ad operare in condizioni di stress/stanchezza non trascurabili. Scopo di questa tesi è lo sviluppo di uno strumento di supporto alla decisione per la schedulazione di sale operatorie. Si intende realizzare un modello che, utilizzato da un algoritmo, sia in grado di selezionare e schedulare al meglio le operazioni da eseguire per ogni sala operatoria per ogni giorno. Questo può essere utile all'interno di un blocco operatorio per evitare un oneroso calcolo a mano della schedulazione del piano operatorio, ma anche per fornire una soluzione ideale che può essere utilizzata dal personale di sala e può comunque essere soggetta a modifica. La tesi si sviluppa nel modo seguente. Innanzitutto, viene proposta un'introduzione al mondo sanitario ed alla gestione delle sale operatorie (cap. 1). In seguito, viene analizzata la situazione del Blocco operatorio dell'ospedale di Ivrea (cap. 2), attraverso un'esperienza diretta del lavoro che si svolge al suo interno, con particolare riferimento ai metodi di lavoro ed ai criteri di selezione delle operazioni. Successivamente viene presentato un modello matematico della schedulazione del blocco operatorio (cap. 3), descrivendone le componenti principali e funzionamento. Vengono poi eseguiti test computazionali su diverse istanze di simulazione (cap. 4), ognuna con diversi parametri. A queste sono associati diversi

tempi di elaborazione e si va a valutare come varia il comportamento dell'algoritmo. Infine vengono presentate le conclusioni sul lavoro svolto (cap. 5). In Appendice, si trovano il codice del programma svolto e le istanze utilizzate.

## Capitolo 2

# Il Sistema Sanitario Nazionale

Il Servizio Sanitario Nazionale (SSN) è lo strumento che garantisce la tutela della salute, come stabilito dall'articolo XXXIII della Costituzione Italiana. I principi fondamentali, sui quali si basa, sono quelli di universalità e uguaglianza e quello di globalità. Il primo per garantire che ogni cittadino abbia le medesime prestazioni sanitarie a parità di bisogno, il secondo affinché non venga presa in considerazione la malattia ma in generale la persona, ciò implica un collegamento di tutti i servizi sanitari di prevenzione, cura e riabilitazione.

Il SSN fu istituito nel 1978 con la prima riforma sanitaria, in ambito politico ed istituzionale furono create le Unità Sanitarie Locali, USL, a cui era affidata la gestione dell'assistenza sanitaria. Nel 1992 una seconda riforma sanitaria diede inizio al processo di regionalizzazione e aziendalizzazione, per fare fronte ai problemi emersi quali costi incontrollabili, data la separazione dei poteri tra chi effettua la spesa e chi la finanzia, mancanza di standard minimi di assistenza e scarsa qualità delle prestazioni.

Oggi lo Stato ha compiti di pianificazione in materia sanitaria, con la definizione del Piano Sanitario Nazionale<sup>1</sup> e assicura anche il diritto alla salute tramite l'individuazione dei Livelli Essenziali di Assistenza, cioè standard minimi che devono essere garantiti ai cittadini aventi diritto. Le Regioni costituiscono il secondo livello organizzativo, hanno responsabilità per la programmazione sanitaria, finanziamento e controllo delle attività gestite dalle unità operative. Queste sono oggi conosciute come Aziende Sanitarie Locali, ASL, per sottolineare la personalità giuridica e l'autonomia organizzativa, amministrativa e patrimoniale che hanno acquisito. Perseguono obiettivi di salute imposti da programmazione nazionale e regionale, nel rispetto dei vincoli di bilancio. A livello territoriale, le ASL, si diramano ulteriormente in distretti sanitari, dipartimenti di prevenzione e servizi ospedalieri. La rete ospedaliera è il settore, tra i servizi forniti dal SSN, che incide maggiormente sulla spesa sanitaria complessiva, ecco perché è prioritaria una riorganizzazione che promuova un livellamento nell'utilizzo delle risorse, pur mantenendo buoni livelli di qualità nei servizi offerti.

## 2.1 Le criticità del Sistema

La Direttiva legislativa 65/2000 ha individuato che il SSN è sostenuto da tre elementi portanti: il finanziamento pubblico, che garantisce i Livelli Essenziali di Assistenza, la sanità collettiva integrativa, che copre prestazioni definite non essenziali, e la Sanità Individuale, a sua volta suddivisa tra Fondi Sanitari Integrativi e polizze assicurative da un lato, e spesa diretta dei cittadini (come i ticket) dall'altro.

Secondo la fondazione GIMBE, che nel Settembre del 2016 ha lanciato l'Osservatorio sulla sostenibilità del Sistema Sanitario Nazionale, sono presenti quattro criticità: definanziamento pubblico, sprechi e inefficienze, nuovi LEA e ipotrofia della spesa privata intermediata. Il definanziamento pubblico, che “coincide con un lungo e grave periodo di crisi economica e di conseguenti scelte politiche che hanno trasferito il peso della Sanità quasi interamente sulle regioni”<sup>2</sup> ha portato l'esigenza di allocare nello stesso organo sia le decisioni di spesa sia le decisioni di investimento per poter ridurre gli sprechi. Ciò ha obbligato le regioni a rispondere dei disavanzi dei prodotti proponendo dei Piani di Rientro. È dimostrato in maniera evidente nel confronto tra la crescita della spesa pubblica negli anni 2000-2008, del 60%, e quella negli anni 2009-2015, solo del 2,9%. Seguendo il rapporto GIMBE del 2018 è possibile notare la ripartizione della spesa sanitaria, che ammonta ad un totale di 157,163 miliardi di €, come indicato nella figura 1.1, infatti il 28,8% della spesa sanitaria è privata e di questa circa l'88% è “out-of-pocket” cioè sostenuta dai cittadini.

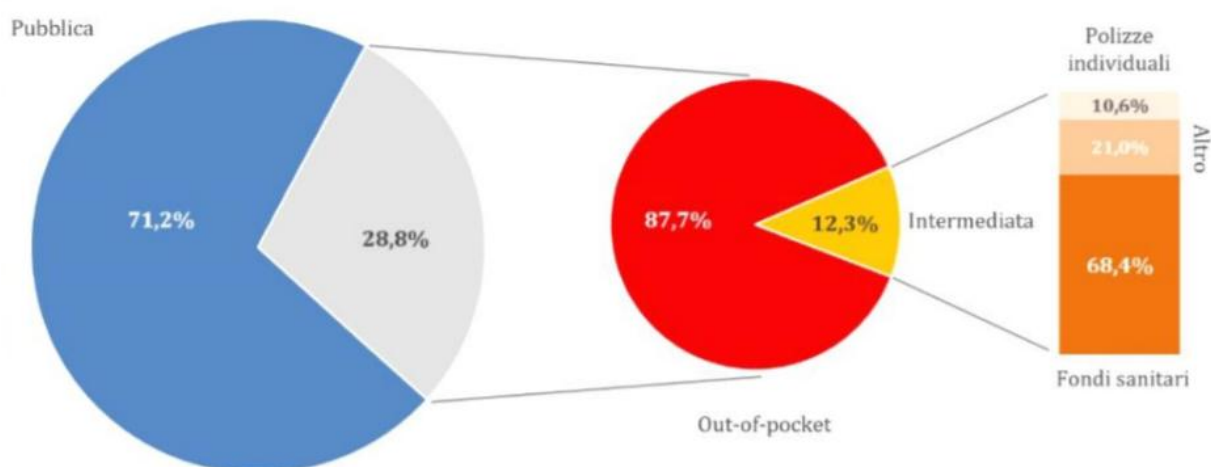


Figura 2.1: ripartizione della spesa sanitaria

Rimane comunque importante il valore della spesa pubblica, che sempre nel 2016 ammonta a 112,542 miliardi di €, avendo un tasso di incremento del 1,2% rispetto al 2015. Nella figura 1.2 viene riportata la suddivisione della spesa sanitaria pubblica, direttamente ricavata dalla Ragioneria Generale dello Stato.

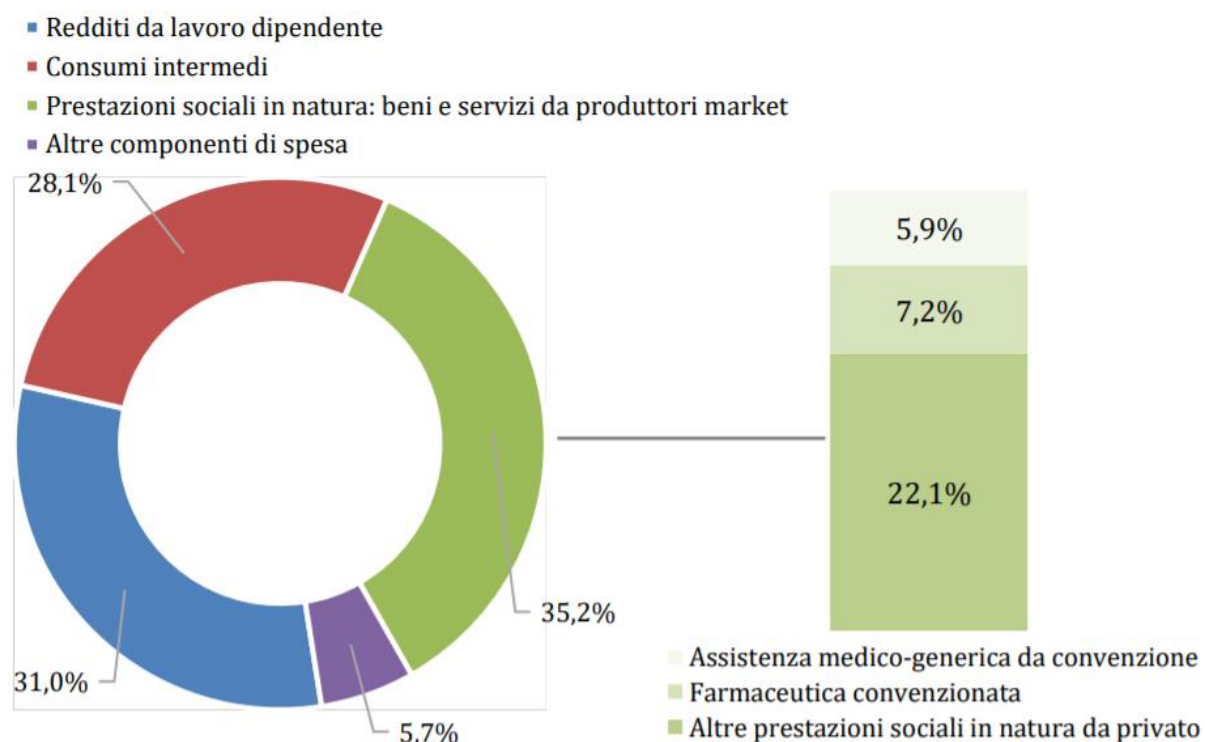


Figura 2.2: ripartizione della spesa pubblica nel 2016 secondo RGS.

Dal grafico si nota che i redditi da lavoro dipendente sono diminuiti del 0,5% rispetto al 2015, ciò è imputabile sia al blocco del turn-over nelle Regioni in piano di rientro, sia alle politiche di contenimento delle assunzioni, che sono state attuate dalle Regioni non in piano di rientro e sia agli automatismi introdotti per rideterminare i fondi per contratti integrativi in relazione al personale dipendente cessato. I consumi intermedi sono aumentati del 4,3% rispetto al 2015, ciò è dovuto soprattutto alla spesa per l'acquisto di prodotti farmaceutici, ma che comprende già il rientro degli importi relativi al pay-back.



## 2.2 Il problema dell'efficienza e la riduzione degli sprechi

Limitandosi all'argomento della tesi, quindi il blocco operatorio, il percorso che compie il paziente inizia con la visita medica nella quale viene stabilita la necessità di intervento, e termina dopo il post-operatorio e con il follow-up successivo. Nella fase di pre-ospedalizzazione il paziente ha necessità di recarsi alla struttura per potersi sottoporre a ad esami e analisi diagnostiche, visita anestesiológica e compilazione di cartella clinica. Se da un lato il continuo recarsi alla struttura per le visite e le attese troppo elevate fanno percepire al paziente una qualità di servizio bassa, dall'altro una convocazione dopo il limite di tempo definito dal codice di priorità, una visita anestesiológica sbrigativa, scambi di referti sono rischi per la salute del paziente. A questa fase segue l'ospedalizzazione con l'accettazione nel reparto di competenza. Una cattiva gestione di questa fase può ripercuotersi sul paziente che vede annullato il proprio intervento oppure posticipato, ciò comporta una serie di implicazioni che rendono meno soddisfatto il paziente del servizio, quali assenza dal lavoro e permanenza ulteriore in ospedale.

La fase più critica è senza dubbio quella all'interno del blocco operatorio, che deve svolgersi in maniera fluida e senza attese tra un'attività e l'altra, come può essere l'attesa pre-operatoria dopo essere stati accettati al blocco. L'intervento deve svolgersi in maniera organizzata e precisa, così da ridurre il più possibile il tempo dell'operazione e anche la probabilità di rischi connessi, quali complicanze, infezioni, dolore...

Il post-operatorio inizia con il risveglio del paziente, che deve avvenire in un luogo attrezzato, in presenza di personale esperto.

Questa breve panoramica fornisce il motivo per cui l'applicazione del risk management per il monitoraggio e la raccolta dati sia sempre più diffusa all'interno delle strutture sanitarie. Eliminare i rischi potenziali porta ad una revisione dei processi all'interno del blocco operatorio con il fine di migliorare la qualità del servizio e una maggiore sicurezza per i pazienti. L'idea consiste in un risparmio di tempo, costi e impegno, attraverso una riprogettazione dei processi e ridefinizione dei ruoli, per liberare risorse preziose in modo da poter curare più pazienti in maniera migliore.<sup>3</sup> I principali problemi riscontrati sono:

- ritardi e tempi lunghi di attesa;
- errori nei processi clinico-assistenziali;
- ritmi di lavoro eccessivi e stressanti;
- scarsa integrazione tra figure professionali
- inappropriately e sprechi di risorse

Nella Sanità tutti i processi sono coinvolti da sprechi e inefficienze, così come i livelli organizzativi e gli stakeholders; nella tabella 2.1 vengono riportati gli sprechi stimati dell'anno 2016. Il rapporto GIMBE descrive in maniera esplicita che è noto il numero degli sprechi nel totale (22,51 miliardi di €), ma gli sprechi specifici sono soggetti ad una stima (quindi possono variare del 20%). Uno spreco è definito come “attività che consuma risorse senza generare valore”<sup>4</sup>. Le modalità per ridurlo sono due: eliminare tali attività o cercare alternative con la stessa efficacia, ma a minor costo. Secondo il Patto della Salute 2014-2016 “i risparmi derivati dall'applicazione delle misure contenute nel Patto rimangono nella disponibilità delle singole Regioni per finalità sanitarie”, per questa ragione i manager sanitari cercano una riorganizzazione integrata dell'ospedale e hanno la responsabilità sia sulle risorse che sui risultati da ottenere. L'efficienza deve essere massimizzata su due ambiti: la movimentazione delle risorse e la gestione dei flussi dei pazienti. Nel primo caso ci si riferisce ad un uso ottimale dei beni, dal loro acquisto all'utilizzo, passando anche per il loro immagazzinamento. Il secondo ambito riguarda invece le varie modalità con cui i cittadini entrano in contatto con le unità produttive, quali i reparti e i dipartimenti, dal primo accesso alla struttura fino alla dimissione (dal corso “La gestione operativa in sanità”, master in Operations management, SDA Bocconi).

<b>Categoria</b>	<b>%</b>	<b>Miliardi di €</b>	<b>(±20%)</b>
<b>Sovra-utilizzo</b>	30	6.75	(5.40 / 8.10)
<b>Frodi e Abusi</b>	22	4.95	(3.96 / 5.94)
<b>Acquisti a costi eccessivi</b>	10	2.25	(1.80 / 2.70)
<b>Sotto-utilizzo</b>	15	3.38	(2.70 / 4.05)
<b>Complessità amministrative</b>	11	2.48	(1.98 / 2.94)

<b>Inadeguato coordinamento dell'assistenza</b>	12	2.70	(2.16 / 3.24)
---	----	------	---------------

*Tabella 2.1: Stima degli sprechi sulla spesa sanitaria pubblica del 2016<sup>2</sup>*

## 2.3 Le difficoltà per ottenere l'efficienza nella sala operatoria

In un ambiente in continua trasformazione, come quello sanitario, è necessario avere una certa razionalità produttiva e i manager sanitari sono chiamati a migliorare costantemente l'efficienza della struttura per poter venire incontro alle cure di alta qualità, pur contenendo i costi<sup>5</sup>. L'aumento dell'efficienza permette, oltre ad un miglioramento dal punto di vista puramente finanziario, maggior sicurezza per il paziente, miglior livello di servizio e di soddisfazione dell'equipe chirurgica<sup>6,7,8</sup>. Nel contesto della sanità un miglioramento dell'efficienza è da tradurre in un “fare meglio con le stesse risorse”, ossia ridurre costi e sprechi, eliminando colli di bottiglia e creando processi più flessibili e standardizzati.

Chiaramente la sala operatoria è un ambiente in cui sono presenti innumerevoli incertezze, quali i pazienti, essendo ognuno diverso, il tipo di intervento e le procedure decise di adottare, urgenze o cancellazioni dovute ad esami ancora da finire o cambiamento dello stato di salute del paziente<sup>9</sup>. La variabilità può essere a livello clinico, legata al comportamento del personale o anche legata più semplicemente ai flussi.

Nel blocco operatorio operano diverse specialità, che curano diverse patologie di vari livelli di gravità, o urgenza, con diverse terapie, ottenendo risposte diverse da ogni paziente. Inoltre, bisogna tener conto che è preponderante la componente umana all'interno dei servizi ospedalieri, un servizio fatto da persone per persone. Infatti, l'esperienza e abilità del personale sono molto rilevanti per il livello della prestazione e la sua velocità di esecuzione, ma ciò è importante anche dal lato dei pazienti, che possono avere ritardi nel presentarsi, non seguire le istruzioni pre-intervento e cancellare prenotazioni all'ultimo minuto.

La variabilità nei flussi si lega invece alle diverse modalità con cui si può accedere al blocco, programmato o in urgenza, e la modalità di ricovero. La standardizzazione è quindi possibile in Sanità secondo la variabile che si prende in considerazione: si può avere un impatto significativo solo sulla variabilità artificiale, causata da disfunzioni nei processi, che può essere eliminata grazie ad una riorganizzazione degli stessi.

Per incidere in maniera positiva sull'efficienza all'interno della sala operatoria, la letteratura nell'ultimo decennio ha mostrato come si siano applicati i principi seguiti dall'industria, come

la Lean Production e Six Sigma. Vengono definiti dei “clinical pathways” come la sequenza di tutti gli step elementari, e la loro durata, che vanno a comporre un determinato processo, come può essere l’intervento chirurgico. Un ulteriore step per un uso ottimale delle risorse è verificare che la pianificazione delle ore di attività della sala operatoria sia accurata, in letteratura esistono tanti modelli matematici per schedulare, ottimizzando, in modo automatico le attività e determinare, su una certa base temporale, i pazienti da operare<sup>10</sup>.

## Capitolo 3

# Il Blocco Operatorio

All'interno del capitolo si analizzerà il percorso che il paziente deve effettuare dal momento del pre-ricovero, offrendo inoltre una descrizione del blocco operatorio di Ivrea e della sua attuale situazione. Prima della descrizione viene fatta un'analisi bibliografica per introdurre dei metri di paragone e verificare il corretto funzionamento del blocco operatorio.

## 3.1 Analisi Bibliografica

Nel miglioramento di una sala operatoria si creano vantaggi sia da un punto di vista finanziario, sia da un punto di vista di sicurezza e qualità della prestazione fornita al paziente<sup>8,9</sup> e anche da un punto di vista del personale che si trova in un ambiente di lavoro migliore. Già nel secolo scorso le questioni di miglioramento sono state affrontate dal settore industriale. Ciò è avvenuto tramite questioni di miglioramento dell'efficienza che di riduzione di errori, dimostrando il bisogno di metodi sistematici e riproducibili<sup>6,11</sup> i quali servono per ridurre gli sprechi, standardizzare la produzione e abbassare i costi del personale<sup>8</sup>. Solo nel decennio scorso si sono iniziate a trasferire le cosiddette “QI methodologies” anche nel mondo sanitario, dove si è potuto notare un maggior utilizzo del Lean Thinking e Six Sigma<sup>6</sup>.

Il Lean Thinking è una strategia nata negli anni Ottanta, nel settore automobilistico giapponese (Toyota Motor Corporation) con obiettivo il miglioramento dell'efficienza produttiva secondo una riduzione di sprechi e una standardizzazione dei processi produttivi, seguendo 5 step<sup>8</sup>:

- individuazione del valore e di ciò che è importante per il cliente;
- mappatura del processo, stilando l'insieme e la sequenza di azioni che portano alla realizzazione del prodotto, o servizio, finale. Fra queste bisogna riconoscere le azioni che non danno un valore aggiunto e che si cerca di eliminare;
- creazione di flussi: le attività vanno a creare un unico processo e non sono tra loro distinte, così che il prodotto scorra senza interruzioni, in modo fluido;
- capacità di far variare il flusso in base a richieste e tempi del cliente, adottando una strategia “pull”, cioè attrarre i consumatori al prodotto finale;

- ricerca della perfezione, attraverso un continuo miglioramento del processo.

Al Lean Thinking vengono spesso accoppiati i principi del Six Sigma, nato sempre nello stesso periodo, però in una multinazionale del settore tecnologico, cioè Motorola. Il programma di gestione della qualità, attraverso metodi statistici, cerca di rendere i processi più uniformi. Si parte dalla prima fase e si raggiunge la perfezione attraverso sei deviazioni standard (sigma) dalla media<sup>8</sup>, arrivando ad ottenere solo pochissime parti difettose per 1 milione di prodotti. È possibile raggiungere tale risultato solo attraverso uno stretto controllo sul processo produttivo.

La filosofia orientale prevede un ciclo infinito che si concentra sulla mappatura e sull'adattamento delle fasi del processo per poter preservare le attività che generano un valore ed essere in grado di eliminare le fonti che si considerano uno spreco. Questi punti di forza hanno fatto in modo che venissero scelti come metodi di riorganizzazione del processo operatorio da diversi ricercatori<sup>6,8,12,13,14,15</sup>. Nel 2012 fu eseguito uno studio<sup>12</sup> per individuare gli effetti dell'applicazione del Lean Thinking in una singola sala operatoria, in termini di efficienza e redditività. In tale modo un team multidisciplinare ha potuto descrivere l'intero processo operatorio, individuare le azioni che hanno generato uno spreco e eseguire l'analisi delle cause principali per ogni azione. In tal modo si sono potuti attuare cambiamenti mirati e valutare un nuovo processo in termini di efficienza, soddisfazione del team e costi. Date le conclusioni positive si ha prova che la strategia possa essere utile per fornire ai pazienti un miglior servizio. Anche nello studio di Cima e Brown<sup>13</sup> è stato studiato al medesimo scopo un centro medico universitario, applicando tuttavia gli strumenti del Lean in maniera differente, ottenendo un incremento nel numero di sale che iniziano in orario. Sono state individuate così 5 aree di lavoro diverse:

- pianificazione delle operazioni per un uso costante delle risorse;
- processo di prericovero standardizzato;
- riduzione dei tempi operatori per ottimizzare il flusso dei pazienti;
- aumento nel coinvolgimento e nell'impegno del personale;
- minor documentazione per evitare una ridondanza dell'informazione.

Oltre a tali metodi di lavoro, è stata applicata anche la Theory of Constraint<sup>11</sup> (TOC). Considerando che anche in questi sistemi sia possibile trovare dei colli di bottiglia che li bloccano, per migliorare i processi conviene agire su questi ultimi e, in base alla loro tipologia

(mancanza di documentazione, test pre-operatori incompleti, mancanza di chirurghi...) sono state applicate più azioni volte ad alleviarli.

Il process modelling è utilizzato per migliorare l'efficienza tramite diversi metodi quali eliminazione di attività di troppo, parallelizzazione, se possibile, delle attività e infine esecuzione all'esterno della sala operatoria delle operazioni che lo permettono. Secondo Stahl e Sandberg<sup>16</sup> è stato necessario introdurre nuovi spazi (come una sala risveglio) nei quali svolgere attività che sono sempre state svolte in sala operatoria. In questo modo si riesce a parallelizzare al meglio le fasi operatorie (prima, durante e dopo). Non avendole più in serie, infatti, avviene una riduzione delle tempistiche del tempo operatorio totale del 15% (figura 2.1). L'introduzione di nuovi spazi però richiede sia un investimento per la loro costruzione che un investimento in nuovo personale che si occupi della loro gestione e delle nuove tecnologie, come dimostrato in uno studio condotto al Massachusetts General Hospital sempre nel 2005<sup>17</sup>.

Sicuramente la decisione di spostare l'attività di induzione d'anestesia è la più critica, in quanto la mancanza di strumenti e personale adeguato, unito al praticare in un nuovo spazio potrebbero impattare negativamente sia sull'esperienza che sulla salute del paziente. Questa decisione sarebbe sì un'ottimizzazione dei costi ma servirebbe avere un maggior numero di studi che assicurino la sicurezza del paziente.

Massimizzare l'efficienza di un blocco operatorio vorrebbe dire aumentare il numero di operazioni che vengono fatte in una giornata operativa<sup>19</sup>. Ciò non è sempre possibile, infatti secondo Dexter et al.<sup>20</sup> il miglioramento dei tempi operatori non è l'unico fattore di influenza nel poter inserire più interventi, infatti questo si rivela più efficace quando sono previsti più interventi di minor durata, in quanto è possibile inserire un intervento nuovo, ma se si hanno pochi interventi che richiedono tempi elevati allora la loro riduzione non sarà molto influente sull'inserimento di nuove operazioni.

Tuttavia, è giusto notare che per il momento non esistono linee guida per l'applicazione delle QI methodologies ai processi nel mondo sanitario in quanto ogni ospedale ha una propria realtà, differente in ogni caso, e bisogna riuscire a rendere ogni soluzione compatibile<sup>21</sup>.



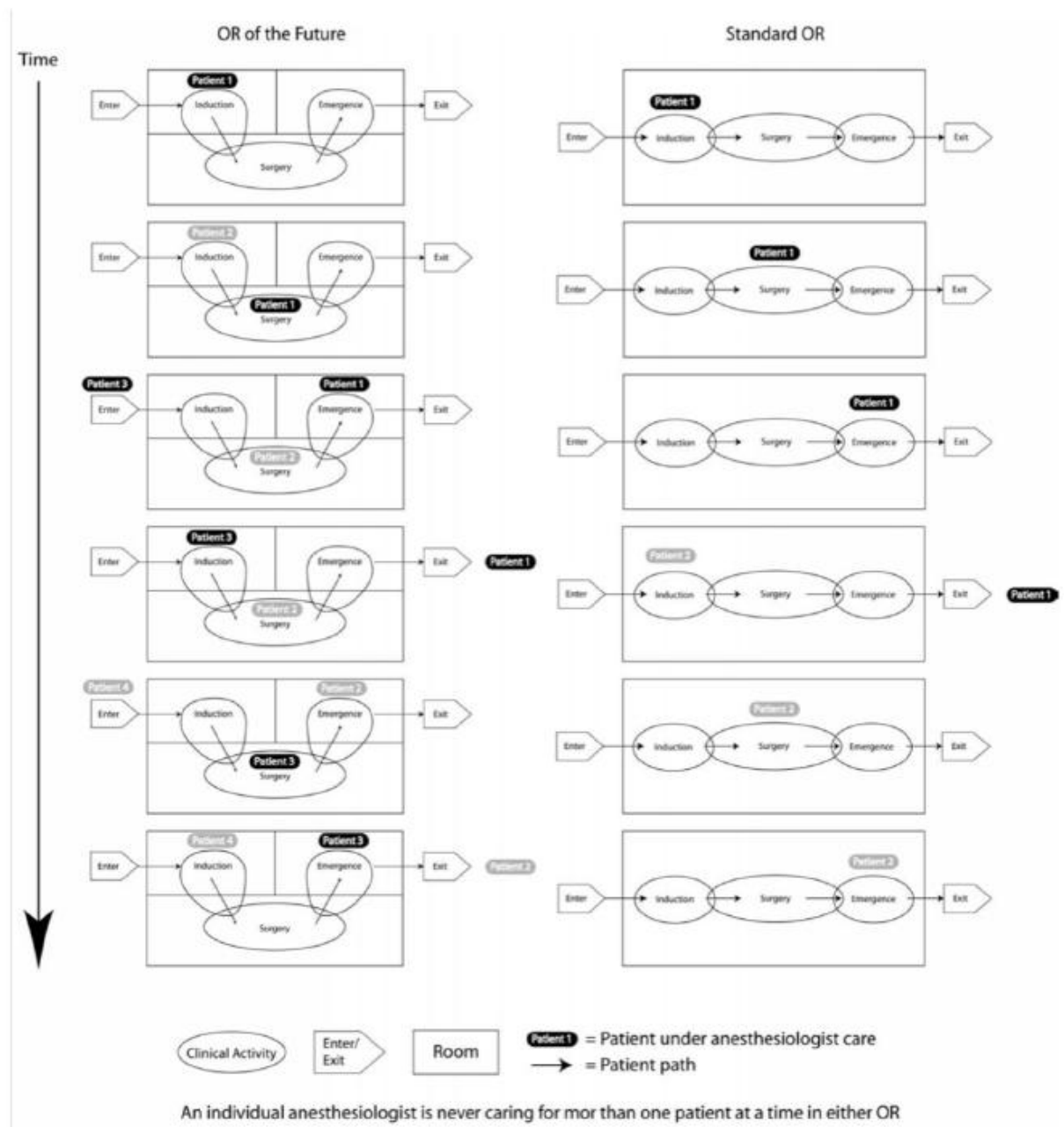


Figura 3.1: Confronto fra parallelizzazione e serie di attività in un processo<sup>16</sup>

Attraverso questi studi quindi si può comprendere quali sono i principali problemi nella gestione del flusso di pazienti:

- cattiva allocazione della capacità o sua carenza;
- incertezza e variabilità;
- coordinazione tra diverse unità operative non ottimale (blocco operatorio, reparti, rianimazione);
- colli di bottiglia nel percorso peri-operatorio che determinano ritardi.

## 3.2 L'Ospedale di Ivrea

Il blocco operatorio di Ivrea è collocato al primo piano della struttura e offre la possibilità di intervento per le specialità di: Chirurgia Generale, Ginecologia, Oculistica, Ortopedia e Traumatologia, Otorinolaringoiatria e Urologia. Il blocco è aperto per gli interventi programmati (di elezione) e anche per urgenze dal Lunedì al Venerdì dalle 8:00 alle 14:00 per tutte le sale, fatta eccezione per una sala aperta fino alle 16. Nel tempo restante, cioè week-end, notti, festivi, è eseguita solo l'attività di urgenza, garantita dal personale disponibile. La supervisione del blocco è affidata alla coordinatrice del blocco operatorio che gestisce l'assegnazione delle sale. Gli interventi vengono programmati di giorno in giorno. Il primario di riferimento riferisce alla coordinatrice del blocco un elenco di operazioni con relativi tempi operatori entro le 12 del giorno precedente. Le urgenze vengono gestite tutte in un'unica sala la cui équipe al mattino è la stessa che si occupa dell'accettazione dei pazienti al passa-malati, mentre al pomeriggio è presente un'équipe dedicata interamente alla sala.

Il blocco operatorio conta (comprendendo anche personale non strettamente legato alle sale, quale personale di pulizia, addetti alla sala risveglio, coordinatrice e aiuto coordinatrice ed escludendo i chirurghi) circa venti persone. Queste persone sono opportunamente distribuite nelle équipe chirurgiche che vanno a operare in ogni sala. Secondo i dati raccolti le specialità compiono dalle 4 alle 9 operazioni al giorno. Se una specialità deve eseguire più interventi dalla breve durata riesce ad eseguirne un numero maggiore (per esempio ciò capita per Otorinolaringoiatria), con l'aumentare della difficoltà dell'operazione diminuiscono quelle eseguite in ogni giorno: per esempio Ortopedia svolge operazioni della durata media di un'ora e mezza, mentre Chirurgia generale arriva anche a dover eseguire una sola operazione che occupa tutta la giornata operatoria. Può capitare a volte che, per criticità del personale di reparto che inducano ad esempio ad esami non eseguiti, oppure del paziente che si trovi a non rispettare delle regole preoperatorie, alcune operazioni nella giornata vengano cancellate.

### 3.2.1 Il blocco operatorio

Lo spazio del blocco operatorio comprende non solo le sale operatorie in cui avvengono gli interventi chirurgici, ma anche i locali e ambienti circostanti che influenzano lo svolgimento dell'attività operatoria. Le Sale Operatorie sono cinque, denominate 1, 2, 3, B, C.

L'assegnazione della specialità per ogni sala è decisa trimestralmente e risulta essere la seguente:

- **Sala 1:** Ortopedia/Traumatologia (tutti i giorni);
- **Sala 2:** Chirurgia (3 giorni), Urologia (1 giorno), Otorinolaringoiatria (1 giorno ogni due settimane), Otorinolaringoiatria/Ginecologia (1 giorno ogni due settimane);
- **Sala 3:** Chirurgia (2 giorni), Urologia (2 giorni), Ginecologia (1 giorno);
- **Sala B:** Oftalmologia (tutti i giorni);
- **Sala D:** adibita ad operazioni latex-free e alle urgenze.

Questa suddivisione trimestrale è stata effettuata tenendo conto degli interventi delle specialità, in quanto Ortopedia/Traumatologia oltre a inserire interventi di elezione deve affrontare le urgenze che si sono create nel weekend, Oftalmologia può operare solo nella sala B, in quanto è l'unica sala che presenta la strumentazione necessaria per compiere gli interventi chirurgici. Tale suddivisione ha sempre dato buoni risultati nel numero di operazioni effettuate e nell'organizzazione del blocco, perciò non è prevista una possibile variazione in proposito. È presente una sala risveglio in cui si svolgono le funzioni di assistenza pre e post operatoria, come monitoraggio dei parametri vitali, somministrazioni di anestesie che richiedono un tempo maggiore per fare effetto (blocchi periferici), sorveglianza dello stato di coscienza e valutazione dello stato del paziente prima che rientri nel reparto di degenza. Oltre alle sale citate sono presenti i depositi dello strumentario chirurgico, dei locali di lavaggio, sterilizzazione e la sala di accettazione.

Tutta la strumentazione è ad uso esclusivo delle sale che ne necessitano, fatta eccezione per lo strumento di scopia intraoperatoria (amplificatore di brillantezza). Infatti, nel blocco è presente un unico strumento a condivisione delle specialità di Ortopedia e Urologia. Questo causa un problema di sovrapposizione specie nelle giornate di Mercoledì e di Giovedì. Infatti in questi giorni, dalle 8 alle 11 e dalle 8 alle 12 rispettivamente, l'apparecchio è ad uso esclusivo di Urologia mentre Ortopedia necessita di tale strumento non solo per alcuni tipi di operazioni, ma anche per verificare il corretto posizionamento delle protesi.

Il blocco tiene nota dell'orario di apertura e chiusura della sala su degli appositi registri in cui sono segnate le operazioni effettuate, l'orario di inizio della prima operazione e l'orario di fine dell'ultima. Ad ogni operazione è assegnata una "checklist" che viene compilata dal personale di sala con le informazioni peculiari sia del paziente (allergie, terapie, stato di

preoccupazione...) sia dell'operazione (ora di ingresso/uscita nel blocco, ora di anestesia, ora di inizio/fine operazione, personale presente nella sala).

### 3.2.2 L'équipe di sala

Ogni giorno sono assegnate alle sale operatorie delle équipe per la giornata operatoria. L'équipe è composta da:

- **Chirurghi:** il loro numero varia da un minimo di 2 fino a 3 per le operazioni più lunghe o più complicate. I chirurghi non partecipano alla preparazione della sala, ma partecipano a quella del “campo operatorio” cioè alla disposizione del paziente nella posizione migliore per effettuare l'operazione, la sua disinfezione e la preparazione tramite teli del luogo in cui operare. Entrano in sala una volta che si sono adeguatamente preparati ed escono appena dopo la sutura per compilare i dati necessari su supporto informatico.
- **Infermiera Strumentista:** è la seconda figura di rilievo in un'operazione in quanto è la figura responsabile della corretta gestione dei dispositivi e dei materiali necessari ed utili ad un intervento, dando molta rilevanza alla verifica della loro presenza e della loro sterilità. Inoltre, è un aiuto a tutti gli effetti per i chirurghi, collabora con loro e passa loro gli strumenti richiesti. Il suo compito inizia dalla preparazione della sala. L'infermiere/a strumentista infatti si occupa di recuperare il materiale necessario per l'operazione e introdurlo in sala. Dopo un adeguata preparazione si occupa della preparazione dei carrelli servitori, in cui si dispone il materiale necessario per l'operazione che deve essere eseguita: garze, ferri, dispositivi (materiale protesico, suturatrici...) e varie. Aiuta i chirurghi nell'allestimento del campo operatorio e durante l'operazione offre loro supporto eseguendo le loro richieste e preparazioni necessarie (es. cemento per protesi...). Alla fine dell'operazione, che si identifica con la fine dell'ultimo punto di sutura, medica la ferita del paziente e inizia a raccogliere lo strumentario utilizzato. In questa fase, ma anche nelle fasi finali dell'operazione, si occupa, insieme all'Operatore Socio-Sanitario, del conteggio della strumentazione che è stata utilizzata. Una volta che è stato tutto verificato e raccolto si occupa di portare la strumentazione nell'apposito locale per la sua sterilizzazione.

- **Medico anestesista:** generalmente si occupa di verificare le condizioni del paziente e di che tipo di anestesia eseguire. Date le complicazioni, si tende sempre a cercare l'uso di un'anestesia locale piuttosto che di una generale, tuttavia se il paziente è particolarmente agitato, e non si riesce ad eseguire l'anestesia locale, o addirittura il paziente si lamenta durante l'operazione, si tende ad usare un'anestesia generale. Il medico anestesista è assegnato ad una sala operatoria, ma può recarsi in altre sale in condizioni di necessità. L'anestesia viene effettuata generalmente poco prima dell'inizio dell'operazione, a meno che questa non preveda un "blocco periferico". Siccome questa particolare metodologia richiede maggior passaggio di tempo perché sia effettiva, viene eseguita in sala risveglio, all'interno della quale il paziente viene portato circa un'ora prima della sua operazione.
- **Infermiera anestesista:** figura di supporto al medico anestesista. Accoglie il paziente nel blocco operatorio e si occupa di compilare la checklist. Prepara il paziente prima che questo entri in sala operatoria, introducendo flebo necessarie per la somministrazione di antibiotici. Prima dell'operazione verifica che siano presenti tutti i farmaci da dover in caso somministrare al paziente. Durante l'operazione ha il compito di monitorare i parametri vitali del paziente e di verificare se è necessario un altro intervento anestesilogico. Finita l'operazione si occupa del risveglio del paziente, se necessario, e si occupa di portarlo fuori dalla sala operatoria e di accompagnarlo all'accettazione per uscire dal blocco operatorio.
- **Operatore Socio-Sanitario:** è una figura di assistenza all'équipe di sala. Aiuta nella preparazione della sala, procurando gli strumenti che di volta in volta sono necessari per l'operazione. Durante l'operazione è una figura di supporto per l'infermiere strumentista in quanto, essendo sterile per poter passare strumenti sterili ai chirurghi, non può più toccare nulla che non sia sterile. Ciò comporta che gli elementi sterili (es. protesi) che sono imbustati in buste non sterili devono essere aperti dall'OSS così che siano poi appoggiati sul tavolo sterile che è stato preparato dall'infermiere anestesista. Oltre a fornire supporto aiuta a muovere le lampade scialitiche necessarie per ben illuminare il campo operatorio ed è anche responsabile di eventuali reperti prelevati per esami istologici, riponendoli in appositi barattoli ed etichettandoli, così che siano pronti per essere esaminati.

Oltre a quelle assegnate alle sale di elezione, è presente una quinta équipe che fornisce supporto nell'accettazione del paziente nel blocco e che si occupa della sala delle urgenze. Se

l'équipe in questione è occupata con un'urgenza allora sarà il personale delle sale che si occuperà di accettare/dimettere il paziente. Questo problema è rilevato al mattino in quanto viene risolto al pomeriggio dato che è disponibile del personale in più per poter formare una sesta équipe che si occupi esclusivamente delle urgenze. Questa situazione appena descritta non è tenuta in conto nella schedulazione delle sale, perché soggetta ad imprevedibilità.

### 3.2.3 L'operazione chirurgica

Di seguito si descrive come avviene il processo dell'operazione chirurgica all'interno del blocco operatorio in una giornata lavorativa (figura 3.2):

- **Primo intervento:** il paziente viene portato al blocco operatorio da un membro dell'équipe di accettazione e da un OSS del reparto. Da qui il paziente deve attendere fuori dalla sala di essere preparato con eventuali flebo antibiotiche e sistemi di monitoraggio, dopodiché viene fatto entrare. Per la prima operazione della giornata la sala viene preparata prima dell'orario di apertura (le 8) e quindi l'infermiera anestesista ha già preparato tutto il necessario per poter iniziare. Una volta entrato il paziente viene anestetizzato dal medico anestesista con il supporto dell'infermiera, mentre i chirurghi effettuano il lavaggio necessario per poter iniziare l'operazione. Una volta che l'anestesia ha effetto il paziente viene fatto posizionare per l'operazione e disinfettato dai chirurghi. L'intervento ha inizio con la prima incisione dei chirurghi e si conclude con l'ultimo punto di sutura. Durante l'operazione il primo chirurgo segnala all'infermiera anestesista di chiamare il paziente successivo a circa 10 minuti dalla fine se non è necessario eseguire alcun blocco, altrimenti questa chiamata viene effettuata quasi un'ora prima. In questo frangente di tempo, viene effettuato dall'OSS e dall'infermiera strumentista il conteggio del materiale. Si verifica che il numero di garze e di strumenti utilizzati sia lo stesso dell'inizio dell'operazione, per constatare che non sia stato dimenticato nulla all'interno della ferita del paziente. Può capitare, a volte, che sia solo il secondo chirurgo a mettere i punti di sutura, mentre il primo chirurgo esce dalla sala per compilare la nota operatoria. Finita quest'ultima attività, anche il secondo chirurgo esce dalla sala e si inizia la pulizia della stessa con il risveglio del paziente. Questo viene portato fuori una volta che la sala sia stata pulita per evitare di portare all'esterno della stessa materiale che possa contaminare il blocco operatorio. Dopodiché il paziente viene dimesso dal blocco e riportato in reparto.

- **Interventi successivi:** il paziente viene portato al blocco operatorio da un membro del reparto appena possibile dopo aver ricevuto la chiamata dalla sala. Il paziente viene accettato e portato davanti la sala in cui verrà operato, o in sala risveglio se è necessario il blocco periferico del paziente. Si deve attendere che l'operazione precedente sia terminata e sia fatto uscire il paziente precedente. Da qui avviene l'operazione di ripreparazione della sala da parte dell'infermiera strumentista e dell'OSS. Queste due figure si occupano infatti di andare a portare gli strumenti utilizzati per la sterilizzazione, di recuperare e portare in sala gli strumenti necessari per l'operazione successiva. L'infermiera strumentista effettua il lavaggio chirurgico per essere sterile e prepara il tavolo servitore con gli strumenti necessari per l'operazione. Quando questa preparazione è a buon punto l'infermiera anestesista, che nel frattempo ha preparato il paziente, lo accompagna in sala con l'aiuto dell'OSS. In questo modo mentre la preparazione della sala volge al termine il paziente viene anestetizzato. Da qui l'intervento segue lo schema del primo intervento descritto in precedenza.
- **Interventi di oculistica:** questi interventi seguono in generale l'andamento degli interventi delle altre sale, ma dispongono di un proprio passa malati, in cui non è necessaria alcuna équipe, che porta direttamente alla sala B. Inoltre, in questo caso l'anestesia non viene eseguita in sala, ma mentre il paziente aspetta fuori così che il farmaco possa fare effetto.

La componente umana è preponderante nelle operazioni e il comportamento che può essere assunto dal personale, o dal paziente, è aleatorio. Non si possono pertanto prevedere ritardi del personale o problemi con le condizioni dei pazienti che possono portare rispettivamente a sforamento dell'orario di chiusura o cancellazione dell'intervento.

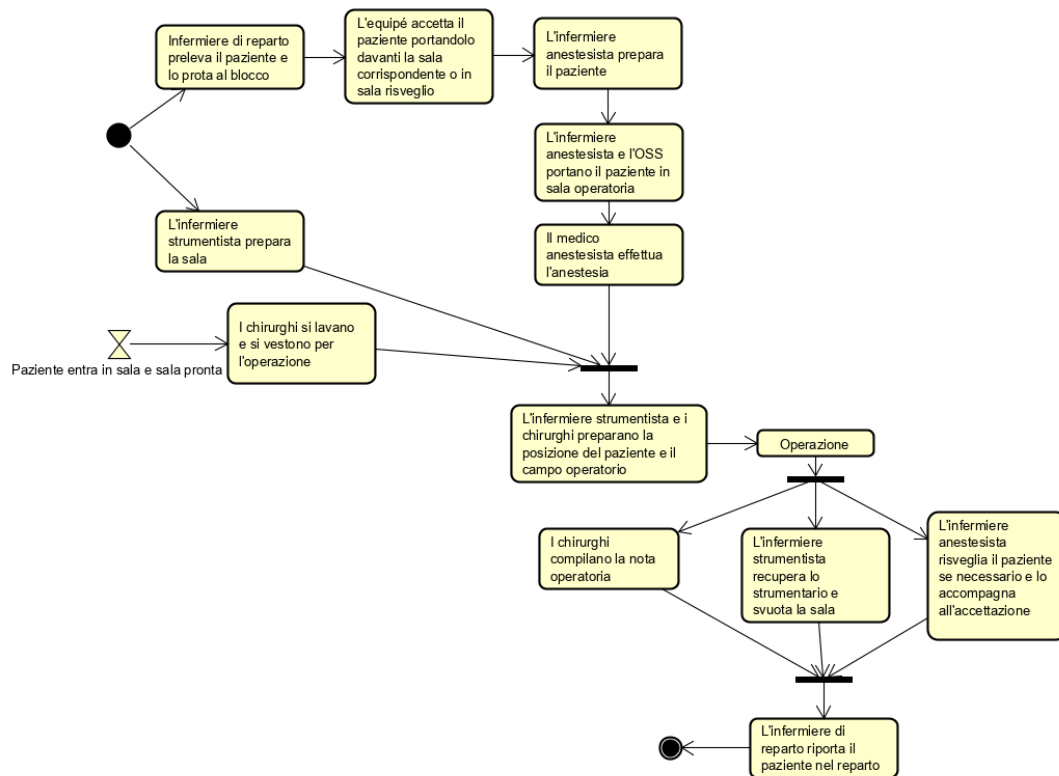


Figura 3.2: processo del blocco operatorio per un'operazione

### 3.3 Osservazioni e criticità

Il lavoro è stato svolto analizzando il comportamento del personale del blocco operatorio nell'eseguire operazioni in elezione, cioè operazioni che vengono prese dalle liste di attesa dell'ASL TO4. Al momento di una prenotazione è assegnata all'operazione una "classe" di appartenenza:

- ❖ A: operazione da fare entro 30 giorni dalla prenotazione;
- ❖ B: operazione da fare entro 60 giorni dalla prenotazione;
- ❖ C: operazione da fare entro 180 giorni dalla prenotazione.

Questa suddivisione delle operazioni non limita l'utilizzo di una sala alle sole operazioni di categoria A, ma di solito si prevede di eseguire anche un certo numero di operazioni di categoria B e C.

Le liste di attesa sono generalmente dell'ordine delle centinaia di operazioni, fatta eccezione per oculistica, in cui i numeri raggiungono l'ordine delle migliaia di operazioni. Infatti,



oculistica conta all'incirca 2000 operazioni da eseguire e ciò è dovuto sia al numero di interventi annullati per diversi motivi come la non raggiunta maturità nel caso di operazioni di cataratta, sia anche al fatto che la specialità, a differenza delle altre, non potrebbe mai usufruire di un'altra sala da utilizzare in contemporanea. L'unica sala attrezzata per poter svolgere le operazioni di oculistica è la B. A meno che non ci sia l'apertura di una seconda sala, oculistica non riuscirà a far fronte al meglio alle operazioni da eseguire.

Dopo la prenotazione il paziente viene ricontattato dall'ospedale nel momento in cui si prevede possa essere operato. La proposta di operazione può essere rifiutata dal malato per un massimo di due volte, dopo le quali occorre prenotare nuovamente l'intervento. Nel momento in cui un paziente accetta la proposta allora inizia il pre-ricovero in cui vengono eseguiti gli esami necessari a confermare la possibilità di operare. Il servizio di pre-ricovero viene eseguito principalmente per verificare l'idoneità anestesiológica, in cui il paziente si sottopone a:

- prelievo di sangue per esami ematochimici
- ECG
- eventuali visite specialistiche (visita cardiologica, RX torace...)
- visita anestesiológica

Seguendo i dati forniti dalle visite del pre-ricovero, i primari detengono quindi una lista di pazienti per i quali sono descritti gli esami ancora da fare e le condizioni necessarie per poter pianificare la loro operazione. A questo punto se un paziente è pronto per poter essere operato il primario verifica la disponibilità di posti in rianimazione o in reparto e lo inserisce nella lista delle operazioni del giorno successivo. Infine comunica tale lista al blocco entro le 12 del giorno precedente. Si può assumere di conseguenza che la decisione del primario sia la più rilevante e che egli sappia, tenendo conto sia della prenotazione effettuata sia delle condizioni del paziente, quali operazioni bisogna affrontare in una giornata e quali possano essere schedate in giorni seguenti. Generalmente se un paziente è il primo della giornata ad essere operato si tende ad avere gli esami già pronti. Può capitare che un paziente schedato da operare per terzo o per quarto debba ancora sostenere alcuni esami e che questi vengano eseguiti al mattino (ciò può portare ad un ritardo nello svolgimento dell'operazione o addirittura al suo annullamento se i risultati non vengono forniti in tempo). Quando un paziente viene chiamato per essere operato, viene prelevato dal reparto e portato al blocco dove sosterrà fuori dalla sala di sua competenza dove nel frattempo si sta concludendo l'operazione precedente.

Il blocco operatorio di Ivrea svolge la sua attività in maniera ottimale. Seguendo la letteratura infatti riesce a parallelizzare le attività svolte da diversi operatori e porta al di fuori della sala operatoria tutto ciò che non deve essere per forza svolto al suo interno. Un esempio di parallelizzazione è nel pre e nel post-operatorio. La preparazione della sala inizia dal momento in cui il malato precedente esce dalla stessa, con l'arrivo degli strumenti necessari all'operazione successiva. Durante questa fase avviene anche l'uscita del malato dal blocco e la preparazione del paziente successivo, così che, quando la preparazione è quasi ultimata, questo possa essere già portato nella sala operatoria e si possa applicare l'anestesia locale o generale. Se la preparazione della sala sta richiedendo più tempo del previsto l'anestesia, se locale, può essere eseguita all'esterno della sala operatoria. Così facendo appena la sala è pronta il paziente e i chirurghi possono entrare e l'operazione può avere inizio. Ciò non è applicabile in caso di scelta di anestesia generale. In questo caso è necessario poter monitorare le condizioni del paziente e bisogna quindi attendere di poter entrare in sala operatoria, dove è disponibile il macchinario necessario a questo scopo. Il post-operatorio invece inizia subito dopo l'applicazione dell'ultimo punto di sutura. In questo periodo il paziente viene risvegliato, se è il caso, e ripulito dal disinfettante, mentre la sala viene pulita dall'addetto.

Il principale problema che si viene a creare nel blocco riguarda i tempi delle operazioni. Dato infatti un numero di operazioni giornaliere il primario comunica i tempi che queste necessitano per essere eseguite considerando come tempo operatorio quello che passa dalla prima incisione alla fine della sutura della ferita. Tuttavia, in questa dato non si tiene conto del tempo che intercorre fra un'operazione e la successiva, in cui il personale deve sistemare la sala e i pazienti. Questo porta ad uno scarto cumulativo che varia dai 15 ai 20 minuti che in una giornata con più operazioni può portare ad un ritardo della chiusura.

Un secondo punto di interesse da tenere conto è la presenza di uno strumento di scopia intraoperatoria, detto strumento di brillantezza. Questo strumento infatti, al momento dell'analisi del blocco, è unico e deve essere condiviso fra due specialità (Ortopedia e Urologia) in due giorni della settimana (Mercoledì 8-11, Giovedì 8-12) venendo a creare problemi di sovrapposizione per due motivi:

- anche se non necessita dello strumento per l'intera durata dell'operazione, Ortopedia si avvale dello strumento per verificare che le protesi inserite siano posizionate correttamente:

- un ritardo nelle operazioni di Urologia (che può essere dovuto ai tempi trascurati citati in precedenza) può bloccare la sala di Ortopedia che deve attendere la disponibilità dello strumento.

I tempi che esistono tra un'operazione e la successiva sono tempi necessari che non possono essere ulteriormente ridotti, di fatto sono tempi non ulteriormente parallelizzabili.

Data l'osservazione dell'attività del blocco operatorio si può supporre che la compilazione della checklist di ogni operazione sia affidabile. Alcune problematiche che si possono riscontrare sono arrotondamenti, dovuti alla presenza di orologi non precisi, e compilazioni successive all'operazione, quindi a memoria del personale. I tempi di inizio e fine operazione sono i più affidabili, dato che vengono sempre segnati al momento giusto dal personale, mentre i tempi di arrivo o uscita dal blocco alle volte vengono tralasciati.

## Capitolo 4

# Pianificazione del blocco operatorio

La situazione del blocco operatorio di Ivrea è gestita al meglio. Le decisioni sulle operazioni da svolgere vengono affidate al primario di competenza e, una volta stilato l'ordine di intervento, vengono confermate dal coordinatore infermieristico del blocco. Questo modo di decidere tiene sicuramente conto dell'ordine di prenotazione e della classe (A, B, C) di appartenenza dell'operazione, ma soprattutto delle condizioni del paziente. Di fronte a pazienti con stessa classe di urgenza ed esami pronti infatti la decisione del primario schedula il prima possibile l'intervento del paziente con i parametri più urgenti. Nel capitolo si intende far fronte a questo tipo di programmazione giornaliero. Identificate un certo numero di operazioni da svolgere, si intende sviluppare un programma che sia in grado di selezionare in modo automatico un certo numero di operazioni da fare per massimizzare le operazioni svolte in una giornata e senza sfiorare il valore nominale di apertura e chiusura della sala. Per fare ciò si utilizzano strumenti software che, ricevendo informazioni riguardo gli aspetti legati all'intervento, come la durata, il tempo di setup necessario calcolino il numero adeguato di operazioni da svolgere. Segue quindi una prima analisi bibliografica, una descrizione del problema e il programma creato per risolverlo.

## 4.1 Stato dell'arte

Verranno di seguito presentate le varie criticità legate alla gestione della pianificazione operatoria e gli strumenti che la ricerca ha messo a disposizione. In questo campo sono fondamentali due aspetti: planning, cioè pianificazione o programmazione, e scheduling, cioè schedulazione o sequenziamento. Il primo termine si riferisce ad un processo di convergenza fra la domanda e l'offerta, avendo a che fare con la disponibilità delle risorse, mentre il secondo riguarda la costruzione di un ordine per ogni attività, a cui associare un tempo di inizio<sup>22</sup>. Sono state individuate 3 strategie di gestione del blocco operatorio da parte di Patterson<sup>23</sup>:

- *Open scheduling*: assegnazione degli interventi secondo un principio di “primo arrivato, primo servito” allocando le varie chirurgie nelle varie sale il giorno prima. Si esegue una pianificazione a medio termine, modificabile secondo le necessità del breve termine;
- *Block-scheduling*: si assegna ad ogni specialità dei blocchi orari fissi, organizzando ognuna come si preferisce vincolando il termine oltre il quale non si può eccedere;
- *Block scheduling modificato*: simile alla precedente, tenta di aumentare la flessibilità inserendo dei “blocchi liberi” da far scambiare tra le specialità in caso di non utilizzo.

Generalmente la maggior parte delle strutture ospedaliere gestisce la pianificazione secondo il principio del buon senso<sup>24</sup>, affidandosi ad una figura esperta che si identifica nel coordinatore del blocco operatorio. Tuttavia, con il progredire degli anni e i cambiamenti nella sanità e nella popolazione per fornire sempre un servizio di qualità facendo fronte ad un numero maggiore di interventi tale approccio non è più sufficiente. Secondo Guerrierio<sup>25</sup> infatti le aziende sanitarie globali si pongono dei nuovi obiettivi:

- esecuzione dell'intervento chirurgico gestito al meglio dal punto di vista temporale (cioè rispettando i codici di priorità ed evitando il più possibile cancellazioni);
- minimizzazione dei tempi di attesa;
- minimizzazione dei costi aggiuntivi (straordinari del personale).

È difficile pensare che una sola persona possa trovare la miglior soluzione possibile, nonostante la sua esperienza, data la grande quantità di stakeholder coinvolti e del numero di risorse da considerare. Il planning del blocco operatorio è un problema con molte variabili, come risorse comuni, sale operatorie e diverse specialità, e può essere affrontato in differenti modi, arrivando anche a conclusioni diverse. Si può quindi giungere ad uno strumento di supporto programmato sulla base decisionale scelta<sup>27</sup> tenendo conto che le decisioni che si prendono sono spesso correlate<sup>22</sup>. Infatti, si possono distinguere tre livelli decisionali:

- **strategico:** distribuzione delle ore della sala operatoria alle diverse chirurgie;
- **tattico:** coincide con la costruzione del Master Surgical Schedule;
- **operazionale:** definizione della sequenza delle varie operazioni selezionate.

Questi tre livelli sono tra loro dipendenti, infatti l'output di un livello sono gli input del livello successivo.

Il problema di livello strategico è prettamente un problema di allocazione di risorse, infatti vuole determinare il numero e il tipo di operazioni da effettuare per ogni specialità, l'équipe medica coinvolta, le risorse necessarie e la loro quantità. Questo tipo di decisioni influenza ed è influenzato dal resto della struttura ospedaliera<sup>26</sup>. Dato un budget fisso esiste un numero limitato di ore in cui si può usufruire della sala operatoria e queste ore devono essere suddivise opportunamente tra le varie chirurgie, sia questa una ripartizione equa o basata sugli interventi effettuati in passato. Come regola generale più anni si pianificano, più imprevedibile sarà stimare l'evoluzione del sistema, quindi si avrà un'accuratezza peggiore.

Una volta che si è usciti dal livello strategico si passa al livello tattico, in cui occorre creare un calendario, comunemente denominato Master Surgical Schedule (MSS). In questo calendario per ogni sala operatoria viene definito l'orario di apertura e di chiusura ogni giorno e le specialità che lavorano al proprio interno. Nel momento in cui una specialità coinvolga, con le sue operazioni, diversi chirurghi, bisognerà rispettare il numero massimo di ore che possono essere loro assegnate. Solitamente il MSS viene stabilito per un determinato periodo di tempo, sia esso annuale o di qualche mese, e tende ad essere ciclico. L'input a disposizione viene fornito dalla domanda attuale e futura, e, partendo da queste, si cerca di mediare tra le specialità in conflitto accogliendo ogni richiesta e cercando di ottimizzare rispetto alla disponibilità delle risorse. Allo stesso modo ci si regola per far fronte agli eventi stagionali: nell'arco dell'anno le quantità e la tipologie di interventi da eseguire potrebbero variare e

potrebbe essere opportuno far variare anche il MSS. Più un MSS si avvicina al numero di ore assegnate ad una specialità a livello strategico (possibilmente nel periodo di tempo più lungo possibile) più questo può essere valutato positivamente. Le eventuali difficoltà che si possono incontrare riguardano il numero di ore assegnate alla specialità, che deve essere un multiplo della durata di un blocco temporale, e lo staff e il materiale disponibile, che potrebbero ridurre l'effettivo numero di ore assegnabili.

Infine, il livello di decisione operativa consente ad ogni specialità la schedulazione degli interventi in elezione e può essere online e offline. Il primo caso avviene quando la pianificazione è stravolta e gli interventi in elezione devono essere riorganizzati data un'urgenza improvvisa, ma sono più rari. Lo scheduling offline avviene invece con la pianificazione degli interventi in elezione. Si può scomporre in due sottoproblemi<sup>27</sup>: advanced scheduling (interventi assegnati ad un giorno) e allocation scheduling (per ogni giorno si definisce l'ordine degli interventi. Si vuole massimizzare la soddisfazione del paziente (riducendo il tempo di attesa) ma anche massimizzare l'efficienza in termini di utilizzo della sala operatoria e di risorse, tenendo sempre in considerazione diversi aspetti come la disponibilità di strumenti e macchinari necessari, personale specializzato e risorse nel post-operatorio).

La pianificazione di questo livello tende ad essere giornaliera o settimanale, al più bisettimanale. Bisogna prendere decisioni riguardo la data, l'orario, la sala operatoria o l'apparecchiatura, tenendo conto che ogni decisione ha un impatto sulla performance del blocco operatorio<sup>27</sup>. Gli obiettivi perseguiti più spesso sono:

- interesse per il paziente:
  - minimizzazione dei tempi di attesa per l'operazione, evitando per esempio di far scadere la validità degli esami preoperatori. Si può ottenere in modo indiretto se si riesce a massimizzare il numero di interventi<sup>26</sup>;
  - minimizzazione del numero di cancellazioni e rinvii;
- uso efficiente della sala operatoria:
  - massimizzazione del suo utilizzo<sup>28</sup>. Bisogna fare attenzione perché una sala operatoria completamente piena, senza alcun periodo di tempo vuoto, è più a rischio rispetto a possibili variazioni dei tempi di operazione (un intervento che incontra qualche complicanza e dura di più può causare criticità all'attività di una per tutta la giornata);

- minimizzazione del sovrautilizzo e del sottoutilizzo;
- interesse del personale:
  - minimizzazione dei tempi in cui il chirurgo non opera e al tempo stesso degli straordinari<sup>29,31</sup>
  - pianificazione degli interventi in modo da operare per primi pazienti particolari, come bambini, anziani, soggetti allergici o chi deve essere sottoposto a interventi particolarmente complessi<sup>31</sup>;
- uso delle risorse:
  - deve essere costante e senza picchi. Fare in modo, ad esempio, che in sala risveglio ci sia un numero quasi sempre simile, evitando momenti in cui non c'è alcun paziente o momenti in cui questi non possono trovare posto;
  - minimizzazione del rischio di problemi legati alle disponibilità degli operatori in caso di eventi non previsti.

I vincoli di queste decisioni possono invece essere:

- temporali: evitare di schedare due interventi in contemporanea nella stessa sala;
- legati alle risorse: due eventi contemporanei non possono utilizzare la stessa risorsa;
- legati al paziente: casi prioritari che devono essere eseguiti per primi.

Nello svolgere una schedulazione automatica si sceglie di lavorare solo sulla pianificazione di interventi in elezione, tralasciando urgenze ed emergenze.

### 4.1.1 L'approccio di risoluzione

Date le osservazioni e le rilevazioni effettuate all'interno del blocco operatorio dell'ospedale di Ivrea si vuole operare giornalmente.

Per fare ciò si può ragionare secondo *project scheduling*<sup>33</sup> cioè allocare più risorse possibili in un solo "oggetto". Ogni sala operatoria deve contenere il massimo numero possibile di operazioni da effettuare nella giornata. Si considerano allora operazioni su sale operatorie a cui è già assegnata la specialità, con vincoli di non sovrapposizione tra le operazioni che condividono una risorsa.



Per risolvere questo tipo di problema è utile l'applicazione di un modello di programmazione lineare intera.

## 4.1.2 Modelli di programmazione lineare intera

Molti problemi di ricerca operativa possono essere formulati tramite l'uso di modelli di programmazione lineare<sup>36</sup>.

Un problema di ottimizzazione combinatoria può essere formulato tipicamente come un modello di programmazione lineare intera (MILP) “traducendo” ogni decisione elementare in una variabile e specificando in seguito la funzione obiettivo con i vincoli assegnati. Perché il modello sia lineare l'obiettivo deve essere una funzione lineare delle variabili, così come i vincoli devono essere equazioni o disequazioni lineari che coinvolgono le variabili. I MILP sono quindi un sottoinsieme dei modelli di programmazione elencati nella tabella 4.1.

Un MILP è generalmente composto da tre elementi fondamentali:

- Variabili decisionali ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )

Sono le incognite del problema, entità tali per cui *data una qualsiasi soluzione (possibile) del problema*, se conosciamo il loro valore, *possiamo immediatamente verificare se la soluzione è possibile e calcolare il valore della funzione di costo*.

- Vincoli

Sono relazioni matematiche che esprimono i requisiti del problema considerato. Quando un set di variabili è definito propriamente allora tutti i requisiti possono essere formulati naturalmente tramite equazioni e disequazioni delle variabili.

- Funzione obiettivo

La funzione  $f$  delle variabili decisionali che deve essere massimizzata o minimizzata.

La risoluzione di un problema di ottimizzazione, che è stato formulato tramite un modello di programmazione matematica, consiste nella determinazione dei valori delle variabili tali da soddisfare tutti i vincoli e da massimizzare o minimizzare il valore della funzione obiettivo. È

possibile che esistano vincoli di continuità sotto forma di vincoli di uguaglianza. La formulazione generale di un MILP è:

$$\min (or \max) f(x_1, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \lesseqgtr b_1$$

.....

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \lesseqgtr b_i$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \lesseqgtr b_m$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n$$

Dove da  $x_1$  a  $x_n$  si parla di variabili decisionali, da  $c_1$  a  $c_n$  si parla di coefficienti di costo (o profitto) nella funzione obiettivo per la minimizzazione (o massimizzazione) del problema, da  $b_1$  a  $b_n$  si parla di limiti “di destra” dei vincoli e da  $a_{11}$  ad  $a_{mn}$  si parla di coefficienti delle variabili nei set dei vincoli.

Le variabili si possono suddividere in 3 grandi categorie:

- Variabili reali positive ( $x_j \geq 0$ );
- Variabili intere positive ( $x_j \geq 0$ , intero);
- Variabili binarie ( $x_j \in \{1, 0\}$ ).

I problemi di ottimizzazione lineare discreta sono i più difficili da risolvere, ma sono uno strumento molto efficace per la modellazione di problemi reali. Si noti che la risoluzione di un problema di questo tipo usando algoritmi di programmazione lineare continua ed arrotondando in tutti i modi possibili così da ottenere soluzioni intere, può portare a raggiungere soluzioni molto lontane dall’ottimo discreto o addirittura a non trovare una soluzione ammissibile.

Programmazione lineare	$\min(cx)$ $s. t. Ax \leq b$ $x \geq 0$
Programmazione lineare intera	$\min(cx)$ $s. t. Ax \leq b$ $x \in Z^n$
Programmazione lineare binaria	$\min(cx)$ $s. t. Ax \leq b$ $x \in \{0,1\}^n$
Programmazione lineare mista	$\min(c_1x + c_2y + c_3z)$ $s. t. A[y] \leq b$ $x \geq 0$ $y \in Z^n$ $z \in \{0,1\}^n$

Tabella 4.1: Diverse tipologie di programmazione lineare con relativi esempi

In molti casi le variabili decisionali del problema sono soggette a condizioni logiche, che possono essere sia requisiti specifici sul valore di una singola variabile o condizioni logiche su due o più variabili. È possibile modellizzare queste relazioni introducendo variabili binarie fittizie, unendo queste variabili a quelle originali e aggiungendo vincoli lineari alle variabili binarie. Un esempio può essere la condizione o...o in cui si impone che solo uno dei due vincoli sia rispettato:

$$f(x_1, \dots, x_n) \geq k \quad \text{oppure} \quad f(x_1, \dots, x_n) \leq \gamma$$

In questo caso è sufficiente introdurre una variabile binaria  $y_i$ , tale che questa sia =1 se vale la prima condizione, o uguale a 0 se vale la seconda, aggiungendo una costante molto grande indicata con  $M$  tale per cui  $f(x_1, \dots, x_n) \leq M$  sia sempre verificata ed aggiungere i vincoli:

$$f(x_1, \dots, x_n) \geq ky \quad \text{e} \quad f(x_1, \dots, x_n) \leq \gamma + My$$

Importante anche è la linearizzazione di prodotti di variabili binarie. Considerando infatti due variabili binarie  $x_i, x_j$  si può realizzare un modello lineare introducendo una nuova variabile binaria  $y_{ij}=x_i x_j$ . Questo si traduce in  $y_{ij}=\min\{x_i, x_j\}$  e può essere reso esplicito attraverso tre condizioni lineari:

$$x_i \geq y_{ij}$$

$$x_j \geq y_{ij}$$

$$x_i + x_j \leq 1 + y_{ij}$$

Nella tabella 4.2 sono riportati diversi esempi di condizioni logiche e i loro corrispondenti vincoli lineari su variabili binarie che sono da aggiungere in un MILP.

Condizioni logiche	Vincoli lineari
$y_1 \rightarrow y_2$	$y_1 \leq y_2$
$y_1 \rightarrow \overline{y_2}$	$y_1 \leq 1 - y_2$
$(y_1 \cap y_2) \rightarrow y_3$	$y_1 + y_2 - 1 \leq y_3$
$(y_1 \cup y_2) \rightarrow y_3$	$y_1 + y_2 \leq 2y_3$
$\cap_{i \in I} y_i \rightarrow \omega$	$\sum_{i \in I} y_i -  I  + 1 \leq \omega$
$\cup_{i \in I} y_i \rightarrow \omega$	$\sum_{i \in I} y_i \leq  I  * \omega$

Tabella 4.2: corrispondenza tra condizioni logiche e vincoli lineari in variabili binarie.

Tipicamente un modello di programmazione lineare intera si considera buono se il valore della soluzione ottimale del rilassamento continuo è sufficientemente vicino al valore della soluzione ottima del problema considerato. Per raggiungere tale obiettivo tutte le proprietà strutturali del problema devono essere considerate, tanto più ciò accade tanto migliore sarà il corrispondente modello di programmazione lineare intera.

## 4.2 Descrizione del problema

Nel blocco operatorio dell'ospedale di Ivrea sono presenti cinque sale operatorie (1, 2, 3, B, C). Di queste la sala C è sempre designata per le urgenze, la B è sempre designata alle operazioni in elezione di Oftalmologia, in quanto è l'unica che possiede la strumentazione adeguata, e le altre sono riservate agli interventi di elezione delle altre specialità. Le sale lavorano dalle 8 alle 14, dal Lunedì al Venerdì, solo la sala 2 opera fino alle 16 ed è pertanto adatta ad ospitare operazioni più lunghe. Le operazioni sono schedate rispettando questo tempo e nessuna specialità dovrebbe pianificare operazioni usando un tempo "extra". La suddivisione delle sale è trimestrale, quindi ogni specialità conosce la sala in cui dovrà operare ogni giorno della settimana. Questo MSS tende a ripetersi, a meno che non sorgano particolari problemi, visto che nel tempo ha sempre dato buoni risultati. Assegnando ad Ortopedia/Traumatologia la sala 1 per tutti i giorni della settimana questa specialità riesce anche a fare fronte alle eventuali urgenze del week-end nella giornata del Lunedì (che tende a mantenere libero proprio per questa ragione). La sala 2 e la sala 3 vedono ruotare le specialità di Chirurgia Generale, Urologia, Ginecologia e Otorinolaringoiatria. La frequenza con cui queste occupano la sala dipende dal numero di operazioni che devono eseguire. Otorinolaringoiatria lavora un solo giorno a settimana a causa del numero di operazioni molto minore rispetto alle altre specialità. Ginecologia lavora un solo giorno a settimana perché molti degli interventi riguardano il parto e possono essere eseguiti anche nell'ambulatorio del reparto.

Ogni sala operatoria vede assegnata un'équipe giornaliera che può variare ogni giorno. In generale non c'è un'assegnazione strumentista-sala o strumentista-chirurgo, ma più un rapporto di tipo strumentista – specialità. Non può capitare quindi che una stessa strumentista sia richiesta in due sale operatorie contemporaneamente. Inoltre, l'équipe chirurgica ha un cambio nell'orario della pausa pranzo. Per operazioni particolarmente lunghe può capitare che il personale cambi durante un'operazione e poi ritorni il personale originale prima che questa sia finita. Ogni cambio di personale viene opportunamente annotato sulla checklist, dove è presente una sezione per poter segnare il personale presente in sala al momento dell'operazione.

Nel blocco è presente anche una sala risveglio, con 3 posti letto, in cui possono essere preparati i pazienti prima delle operazioni (in caso per esempio di blocco periferico) e dove essi vengono

costantemente monitorizzati, oppure dove questi possono sostare mentre il personale ne attende il risveglio per poterli far uscire dal blocco operatorio.

Problematica principale del blocco operatorio è l'apparecchio di scopia intraoperatoria che costituisce una vera e propria criticità dovendo essere condiviso fra due specialità. La ricerca di soluzioni che comprendano orari alternativi di lavoro non è perseguibile in quanto mentre Ortopedia non ha problemi di orari, Urologia, che è la seconda specialità ad usufruire dell'apparecchio, non ha sufficiente personale per poter gestire la situazione in maniera diversa.

Di fronte a tale situazione si è deciso di partire da una situazione affine all'ospedale di Ivrea e di generalizzarla. Si considera quindi, per quanto riguarda il modello di blocco da affrontare, un numero di sale pari a 5, aperte dalle 8 alle 14, la presenza di un solo apparecchio di scopia e la classificazione delle operazioni secondo la loro categoria di urgenza.

## 4.3 La descrizione del modello

Stilando il modello devono essere inseriti vincoli necessari e utili alla programmazione giornaliera. Si vuole evitare che ogni sala compia degli straordinari. Inoltre si devono selezionare le operazioni da compiere all'interno di un pool di operazioni possibili da eseguire il giorno successivo.

### 4.3.1 I dati di input

I dati forniscono a tutti gli effetti dei veri e propri input per il programma. Questi servono a definire l'intervento e a poterne permettere una giusta schedulazione. Per ogni operazione  $i$  vale:

- la *durata* dell'intervento: in termini di minuti viene indicato quanto dura un intervento dalla prima incisione alla chiusura dell'ultimo punto di sutura;

$$DurataE(i) = t, \quad t \text{ minuti necessari per l'operazione } i \in \text{Operazioni} \quad (3.1)$$

- la *sala* dell'intervento: si indica, con un numero da 1 a 5, la sala in cui tale intervento deve avvenire;

$$Sala(i) = n, \quad n \text{ è il numero della sala dell'operazione } i \in \text{Operazioni} \quad (3.2)$$

- l'utilizzo dell'apparecchio di *scopia*: è un parametro binario che vale 1 se l'operazione utilizza l'apparecchio di scopia e vale 0 se non lo utilizza;

$$Scopia(i) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad 1 \text{ se serve l'apparecchio, 0 altrimenti } i \in \text{Operazioni} \quad (3.3)$$

- l'*urgenza* dell'operazione: può assumere valore A, B, C seguendo le linee guida dell'ASL;

$$Urgenza(i) = x, \quad x \text{ appartiene alla categoria } A, B, C \quad i \in \text{Operazioni} \quad (3.4)$$

- il *setup* dell'operazione: è un tempo già standardizzato in cui si indica per quanto tempo dopo l'operazione la sala o il macchinario di scopia non può essere agibile.

$$Setup(i) = t, \quad t \text{ minuti necessari per il setup } i \in \text{Operazioni} \quad (3.5)$$

Nel periodo svolto all'interno del blocco operatorio di Ivrea è stata effettuata un'attività di raccolta dati relativa ai tempi operatori, raccolti dalle checklist ancora presenti nei reparti e anche da diretta osservazione delle operazioni. Questi dati sono poi stati confrontati tra loro per avere un tempo medio per ogni operazione. Ad ognuno di questi tempi medi dovrà essere poi sommato dal programma il tempo di setup che ne segue. In sequenza si trascrivono i dati delle operazioni su un apposito file .dat, in cui si riportano i minuti necessari per il compimento dell'operazione, quale sala viene utilizzata, necessità dell'apparecchio di scopia, urgenza dell'operazione e minuti già normalizzati necessari per il setup successivo all'operazione. Va ricordato che se un'operazione è nella lista di quelle da schedulare allora è possibile eseguirla e non si deve attendere oltre. I dati raccolti sono disponibili nell'appendice B.

### 4.3.2 Le variabili

La variabile è un elemento fondamentale in un modello matematico di ottimizzazione, serve infatti ad aiutare a prendere delle decisioni e possono essere ridenominate “variabili decisionali”. Sono grandezze di cui il sistema non conosce il valore e sulle quali si può andare ad agire per essere in grado di avere diverse soluzioni per il problema proposto. In questo caso la variabile è:

$$x(i, t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, \quad i \in \text{Operazioni}, t \in \text{Slot} \quad (3.6)$$

$x_{it}$  è una variabile binaria che determina il tempo di inizio dell'operazione  $i$ ; dati l'operazione  $i$ -esima e l'istante  $t$ -esimo,  $x_{it}$  assume valore 1 se l'operazione  $i$  inizia nell'istante  $t$ , e 0 altrimenti.

### 4.3.3 La normalizzazione

Se come istanti temporali, si considerassero i minuti (in questo caso 360 per 6 ore), il modello potrebbe avere un numero di variabili fin troppo elevato. Si è deciso quindi di ricorrere ad una normalizzazione del tempo considerato dividendo e arrotondando al multiplo di 5 più vicino.



Questo avviene tramite l'uso di due vettori, il primo descritto dall'equazione 3.1, il secondo invece tramite l'assegnazione:

$$Durata(i) = round\left(\frac{DurataE(i)}{5}\right), \quad \forall i \in Operazioni \quad (3.7)$$

Si ottiene così un numero di slot temporali  $\leq 72$ , diminuendo corrispondentemente il numero totale di variabili.

### 4.3.4 I vincoli

Per esprimere tutti i requisiti a cui è soggetto il problema in questione, il modello necessita dell'introduzione di relazioni matematiche. Queste vengono quindi inserite sottoforma di vincoli, che aiutano a discriminare le combinazioni di valori delle variabili ammissibili rispetto a quelle non ammissibili. Nell'implementazione di tali vincoli si parte dal presupposto che se una operazione è inserita come schedabile allora sia possibile eseguirla senza problemi.

- Ogni operazione non può terminare oltre il numero massimo di “slot” temporali, questo per evitare straordinari. Se in questo caso si considerano 72 slot, nessuna operazione deve finire oltre tale valore;

$$\sum_{k=1}^{Durata(i)} x(i, 72 - Durata(i) + k) = 0, \quad \forall i \quad (3.8)$$

- Ogni operazione non può essere eseguita in una sala occupata da un'altra operazione. Questo si traduce in due vincoli, per i quali un'operazione  $j$  non può iniziare in uno slot temporale  $t$  in cui ci sia un'operazione  $i$  attiva e un'operazione  $j$  non può iniziare in uno slot temporale  $t$  tale da finire durante l'attività di un'operazione  $i$ . Per entrambi i vincoli vanno gestiti alcuni sottocasi come indicato successivamente. Per il primo vincolo (un'operazione  $j$  non può iniziare in uno slot temporale  $t$  in cui ci sia un'operazione  $i$  attiva) si ha:

- Se  $t - Durata(j) < Setup(j)$  allora si definisce un valore  $r = t - Durata(j)$ :

$$x(i, t) + \sum_{k=t-Durata(j)-r}^{t+Durata(i)+Setup(i)} x(j, k) \leq 1, \quad \forall i, \forall j \in i + 1 \dots Operazioni, \forall t \quad (3.9)$$

- Se  $t - Durata(j) \geq Setup(j)$  allora si hanno i seguenti due sotto casi.
  - Se l'operazione non fosse l'ultima allora:

$$x(i, t) + \sum_{k=t-Durata(j)-Setup(j)+1}^{t+Durata(i)+Setup(i)} x(j, k) \leq 1, \quad \forall i, \forall j \in i + 1 \dots Operazioni, \forall t \quad (3.10)$$

▪ Se l'operazione fosse l'ultima allora:

$$x(i, t) + \sum_{k=t-Durata(j)-Setup(j)+1}^{t+Durata(i)} x(j, k) \leq 1, \quad \forall i, \forall j \in i + 1 \dots Operazioni, \forall t \quad (3.11)$$

Per il secondo vincolo (un'operazione j non può iniziare in uno slot temporale t tale da finire durante l'attività di un'operazione i) si ha:

- Se la somma della durata dell'operazione i (e del suo setup) e della durata dell'operazione j dovesse essere maggiore a 72 allora si definisce una costante  $d = 72 - Durata(i) - Setup(i)$  e si definisce:

$$x(i, t) + \sum_{k=0}^{d+Durata(i)+Setup(i)} x(j, k) \leq 1 \quad (3.12)$$

- Se la somma della durata dell'operazione i (e del suo setup) e della durata dell'operazione j dovesse essere invece minore o uguale a 72 allora:

$$x(i, t) + \sum_{k=0}^{t+Durata(i)+Setup(i)} x(j, k) \leq 1, \quad \forall i, \forall j \in i + 1 \dots Operazioni, \forall t \quad (3.13)$$

- Allo stesso modo del punto precedente un'operazione che richieda l'apparecchio di scopia non può essere eseguita in contemporanea ad un altro intervento che richieda lo stesso apparecchio e che si trova in un'altra sala. Di fatto a parte questa condizione i vincoli che scaturiscono sono gli stessi di quelli del punto precedente, quindi basta ripetere le equazioni da 3.9 a 3.13 sotto questa condizione.
- Infine, per tutte le operazioni la somma di tutti gli istanti non deve essere maggiore di 1. Questo serve a garantire che un'operazione venga schedata al più una volta in tutta la giornata.

$$\sum_{t=0}^{72} x(i, t) \leq 1, \quad \forall i \quad (3.14)$$

### 4.3.5 La funzione obiettivo

La funzione obiettivo rappresenta una quantità da massimizzare (o minimizzare) in funzione delle variabili decisionali che la compongono. L'obiettivo, in questo caso, è quello di assegnare il maggior numero di interventi di classe A, poi quelli di classe B e infine quelli di

classe C se possibile. Per fare ciò tuttavia è necessario imbastire dei vettori che tengano conto del fatto che un'operazione sia di una certa classe.

- Se un'operazione è di classe A:

$$A(i) = 5, \quad \forall i \quad (3.15)$$

- Se un'operazione è di classe B:

$$B(i) = 3, \quad \forall i \quad (3.16)$$

- Se un'operazione è di classe C:

$$C(i) = 1, \quad \forall i \quad (3.17)$$

In questo modo abbiamo dei vettori che fungono da peso per l'operazione nella funzione obiettivo. Si definisce allora un obiettivo (da massimizzare) che è composto dalla somma pesata di operazioni di A, di B e di C. Si ha

$$obj = \sum_i \sum_t x(i, t) * A(i) + \sum_i \sum_t x(i, t) * B(i) + \sum_i \sum_t x(i, t) * C(i) \quad (3.18)$$

Dopodiché si massimizza tale funzione:

$$\max (obj) \quad (3.19)$$

### 4.3.6 Simulazione della soluzione

Una volta che il modello sceglie una soluzione ideale quello che si vuole fare è simularla in modo da renderla il più compatta possibile.

Una simulazione di questo genere permette di generare una soluzione con tempi non più normalizzati e considerano vincoli di precedenza indotti dai tempi di inizio trovati dalla risoluzione del modello.

Vengono raccolte tutte le operazioni della soluzione in un vettore apposito, ordinate per tempi di inizio crescenti. In seguito per ogni operazione si considera la disponibilità o meno della sala operatoria e la presenza o meno di altre operazioni in conflitto. Se la sala è disponibile e in contemporanea non sono simulate altre operazioni che possono essere in conflitto, allora

l'operazione può partire. Questa simulazione prosegue fino all'ultima operazione da schedare. Il modello e la simulazione sono riportati in codice mosel nell'appendice A.

## 4.4 Implementazione del modello

Per implementare il modello si è scelto di utilizzare il software FICO@Xpress, che, per risolvere i MILP, utilizza un approccio branch&bound<sup>34</sup>. Il metodo del branch and bound è un metodo che si può applicare a problemi di ottimizzazione combinatoria, all'interno dei quali rientra la programmazione lineare intera. È un metodo esatto che implementa un sistema efficiente di enumerazione, garantendo di sveltire la valutazione della funzione obiettivo per ogni possibile soluzione di un problema.

Questo modello prevede la suddivisione dell'insieme delle soluzioni ammissibili in sottogruppi (generalmente ogni livello si divide in due) e risolvere il problema su ogni sottoinsieme<sup>34</sup>. Ciò è fatto in maniera ricorsiva, dividendo ulteriormente le regioni dei sottoproblemi in ulteriori sottoinsiemi. Se si facesse operare in maniera completa sarebbero enumerate tutte le soluzioni intere del problema. In questo caso però si avrebbero due questioni rilevanti:

- se il problema avesse un numero esageratamente grande di soluzioni ammissibili, la loro completa enumerazione non sarebbe possibile;

Si possono applicare diverse strategie di branching, ma queste devono sempre dare sottoinsiemi disgiunti (intersezione nulla), e l'unione di questi deve sempre dare l'insieme di partenza, così da non perdere alcuna soluzione. Generato quindi lo spazio delle soluzioni bisogna saperlo esplorare in maniera efficiente, utilizzando una tecnica che permetta di esplorare solo le aree buone della regione ammissibile, immagazzinando i limiti superiori e inferiori (bounding) per il valore ottimale in una certa area e usandoli per decidere se è il caso di risolvere certi sottoproblemi. Se si conosce quindi una soluzione ammissibile e il valore della sua funzione obiettivo sarà possibile eliminare i nodi che hanno un bound inferiore (e i loro figli di conseguenza). La ricerca del limite deve utilizzare solo una descrizione implicita delle caratteristiche delle soluzioni e garantire tempi rapidi di elaborazione, infine il valore deve essere il più stringente possibile, ma sempre ottimistico. Per un problema di minimizzazione si utilizzerà un limite inferiore (lower bound), cioè una valutazione ottimistica del valore della funzione obiettivo minimo che possono offrire le soluzioni di un certo gruppo, invece nel caso di massimizzazione si parla di limite superiore (upper bound).

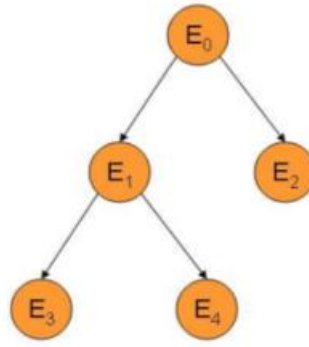


Figura 4.1: generazioni delle soluzioni tramite branching

Il metodo di branch & bound prevede quindi<sup>34</sup>:

- *branch*: ripartizione e ramificazione che permette di generare un insieme di soluzioni con struttura ad albero (figura 4.1). Da un nodo padre si ottengono dei nodi figli.
- *bound*: esplorazione efficiente dello spazio di soluzioni tramite enumerazione implicita di tutte le soluzioni del problema, calcolando un valore limite per la funzione obiettivo.

Si ha un procedimento iterativo, ad ogni step viene selezionato un sottoinsieme ideale, si calcola il limite e si decide se il sottoinsieme deve essere ulteriormente partizionato ed esaminato oppure si possa eliminare. L'eliminazione di un nodo avviene se:

- la valutazione ottimistica del nodo non è migliore del valore della funzione obiettivo dell'ultima miglior soluzione ammissibile;
- la valutazione ottimistica è una soluzione ammissibile del problema. Essendo la migliore di tutte quelle appartenenti allo stesso gruppo, si possono eliminare quest'ultime. La restante quindi viene confrontata con l'ultima miglior soluzioni ammissibile e se ha un valore di funzione obiettivo più alto diventa la miglior soluzione ammissibile;
- il nodo è un insieme vuoto, non ha soluzioni ammissibili.

Se non ci si trova in nessuno di questi casi il sottoinsieme viene partizionato nuovamente in due o più sottoinsiemi, aggiunti poi alla lista dei candidati. Ciò continua fino a quando non finiscono i sottoinsiemi da esplorare, la miglior soluzione ammissibile costituisce la soluzione ottima del problema originario.

Nella programmazione lineare intera la regola del branching e il bounding sono facilmente deducibili, introducendo il concetto di rilassamento continuo. Il rilassamento continuo di un problema ossia la definizione di un problema di programmazione lineare identico a quello originale ma senza i vincoli di interezza delle variabili. In un problema di max, il massimo valore della funzione obiettivo del rilassamento continuo è maggiore (o uguale) al massimo valore della funzione obiettivo trovato dal MILP, quindi può essere definito il limite superiore. La regola del branching segue come riferimento la soluzione ottima del problema del rilassamento continuo. Si considera una variabile che ha componente frazionaria non nulla e si effettua un branching binario così che nei due sottoproblemi questa sia minore (o maggiore) della sua parte intera come si può vedere nella figura 4.2.

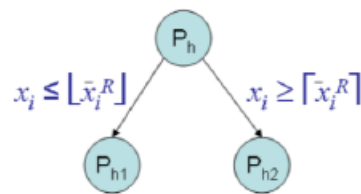


Figura 4.2: operazione di branching in programma lineare intera

Dei due sottoproblemi allora si calcola il rilassamento continuo per recuperare i vincoli (se inferiore viene eliminato) e si guarda la soluzione. Se questa è intera allora è anche la miglior soluzione intera dell'insieme e la si confronta con la migliore corrente, per valutare se è bisogna eliminarla o renderla la nuova migliore. Se almeno una variabile è frazionaria allora si continua con il branching, quando sono stati eliminati tutti i nodi la soluzione intera corrente è la migliore possibile e risolve il problema originale.

Risolvendo il rilassamento continuo del problema (non si considerano casi “ill-posed” con presenza di rilassamento continuo illimitato) si ottiene una delle seguenti possibilità:

- il rilassamento continuo non ha soluzione ammissibile, non ne ha nemmeno il problema iniziale;
- il rilassamento continuo ha una soluzione ammissibile ma alcuni dei vincoli di integralità del MILP originale non sono rispettati;
- il rilassamento continuo ha una soluzione ammissibile, i vincoli di integralità sono rispettati, il MILP ha soluzione;
- il rilassamento continuo è illimitato.

Il primo ed il terzo caso sono risolti, il secondo caso richiede di individuare il vincolo di integralità non soddisfatto e riapplicare il branching. I nodi che si ottengono avranno gli stessi vincoli del nodo padre più un ulteriore vincolo di disuguaglianza. Considerando quindi due rilassamenti LP, uno padre e uno figlio, l'ultimo avrà un valore di funzione obiettivo al più uguale a quella del padre.

### 4.4.1 Algoritmo

Il modello descritto viene implementato nell'algoritmo. Come prima esecuzione vi è un vero e proprio scheduling, che viene risolto applicando un solver MILP (in questo caso il software XPress) al modello. Una volta ottenuto il risultato e le operazioni scelte, si passa allora ad una semplice simulazione. In questo caso si considera un'operazione alla volta, selezionandole per tempi di inizio crescenti rispetto alla soluzione trovata dal modello MILP. Queste operazioni vengono quindi fatte partire al più presto così da essere compatibili con la disponibilità della sala (se questa è occupata non si può eseguire un'altra operazione) e/o con i vincoli di conflitto di altre operazioni attive.

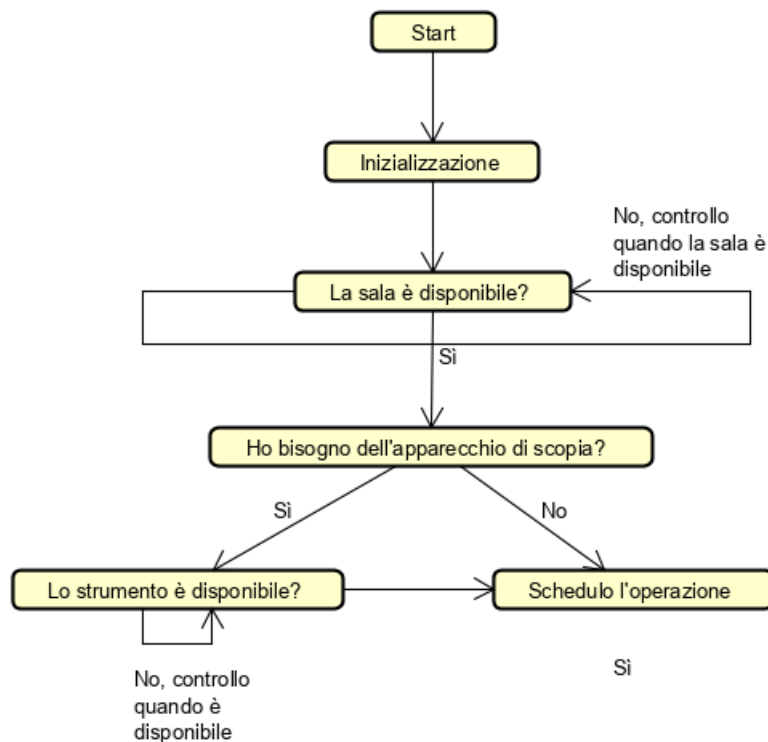


Figura 4.3: Flowchart della simulazione per ogni soluzione nel caso dell'ospedale di Ivrea



Di seguito è riportato uno pseudocodice di funzionamento del modello:

**Algoritmo 1** – Prima fase

**Input:** Dati del problema

**while** tempo limite T non è raggiunto **do**

    Generazione di una permutazione variabile delle soluzioni

    Valutazione della soluzione corrente

    Eventuale aggiornamento della miglior soluzione

**end while**

**Output:** Soluzione s

La seconda parte ha lo scopo di accorpare il più possibile la soluzione trovata con la prima parte verso gli istanti iniziali, così da far partire tutte le operazioni all'istante 0, ed eseguirle senza avere tempi morti fra loro (se non dovuti a operazioni in conflitto). Di seguito si riporta uno pseudocodice del secondo modello:

**Algoritmo 2** – Seconda fase

**Input:** soluzione migliore trovata nella prima fase

**for all** operazioni trovate nella soluzione migliore **do**

    ordinef=1 se l'operazione può essere eseguita

**end for**

**Output:** Soluzione migliore con operazioni ordinate

## Capitolo 5

# Risultati

### 5.1 Istanze generate per l'ospedale di Ivrea

Sono stati eseguiti diversi test per verificare il corretto funzionamento degli algoritmi. Nei test sono stati implementati dati raccolti dal blocco operatorio e sono state scelte 10 operazioni da svolgere per ogni sala. L'algoritmo decide quindi quali interventi schedare e con che ordine in ogni sala, successivamente fa partire ogni sala all'istante 0 e man mano riempie la sala il più possibile compattando la soluzione trovata. Partendo da un totale di 5 sale il programma lavora con circa 3000 variabili e 11000 vincoli, da un punto di vista di elaborazione questo porta il programma a lavorare per molto tempo. Si sceglie quindi di far funzionare il programma e annotare quando la soluzione migliora. Più il programma verrà lasciato lavorare, più la soluzione tenderà all'ottimo globale. Sarebbe comunque possibile definire un tempo massimo di lavorazione del programma. I dati utilizzati per le istanze sono disponibili nell'appendice B.

Nella prima istanza il primo valore che si prende in considerazione è a 100 secondi, con funzione obiettivo pari a 120, il valore aumenta a 180 secondi e poi a 250. Per valori superiori di tempo (comunque compresi in 500 secondi) il valore non varia. Nella tabella 3.3 vengono riportati i valori della funzione obiettivo e nel grafico 5.1 viene mostrato l'andamento del gap tra la soluzione ed il miglior upper bound possibile rispetto al tempo impiegato per l'istanza 1. Questa istanza segue il più fedelmente possibile i dati dell'ospedale di Ivrea.

Istanza 1			
Tempo limite	100s	180s	250s
Funzione obiettivo	120	121	122
Operazioni inserite	28	28	30

*Tabella 5.1: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 1)*

Avendo inserito come vincolo quello di non superare l'orario disponibile della sala non avremo mai una sala operatoria piena oltre al 100% come potrebbe capitare per una schedulazione fatta a mano.

Si è deciso di ripetere l'esecuzione del modello con diverse istanze, differenti tra loro, con diversi parametri che definiscono le operazioni. Ogni istanza sarà quindi caratterizzata da durata, tempo di setup, urgenza dell'operazione e utilizzo di apparecchio di scopia diversi, ma comunque consoni ai dati che sono stati raccolti all'ospedale di Ivrea. Nelle tabelle successive sono elencati i valori di funzione obiettivo e di numero di operazioni inserite per ogni istanza, così come il grafico dell'andamento del gap % per le istanze dalla 1 alla 4.

Nella seconda istanza a 100 secondi abbiamo un primo valore della funzione obiettivo che però non subisce variazioni nonostante il tempo di processamento sempre più ampio. Si decide quindi di utilizzare i valori di secondi utilizzati per l'istanza 1.

Nella terza istanza ci si aspetta che siano schedulate meno operazioni. In queste istanze tuttavia si seguono sempre i dati raccolti dal blocco operatorio in maniera fedele. Ogni sala è quindi associata ad una specialità e si utilizzano i tempi medi delle operazioni. Si è scelto di prendere operazioni che hanno anche lunga durata, per vedere se il programma preferisce eseguire solo un'operazione lunga o più operazioni di breve durata. In questo caso il primo valore della miglior soluzione è a 100 secondi (funzione obiettivo a 121) che, come nell'istanza precedente, rimangono tali anche per un tempo di processamento molto elevato.

Infine, nella quarta istanza a 100 secondi la funzione obiettivo assume un valore di 115, a 230 secondi il valore aumenta a 117 per giungere al valore di 118 a 300 secondi.

Istanza 2			
Tempo limite	100s	180s	250s
Funzione obiettivo	121	121	121
Operazioni inserite	29	29	29

*Tabella 5.2: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 2)*

Istanza 3			
Tempo limite	100s	180s	250s
Funzione obiettivo	121	121	121
Operazioni inserite	29	29	29

*Tabella 5.3: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 3)*

Istanza 4			
Tempo limite	100s	230s	300s
Funzione obiettivo	115	117	118
Operazioni inserite	27	29	28

*Tabella 5.4: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 4)*

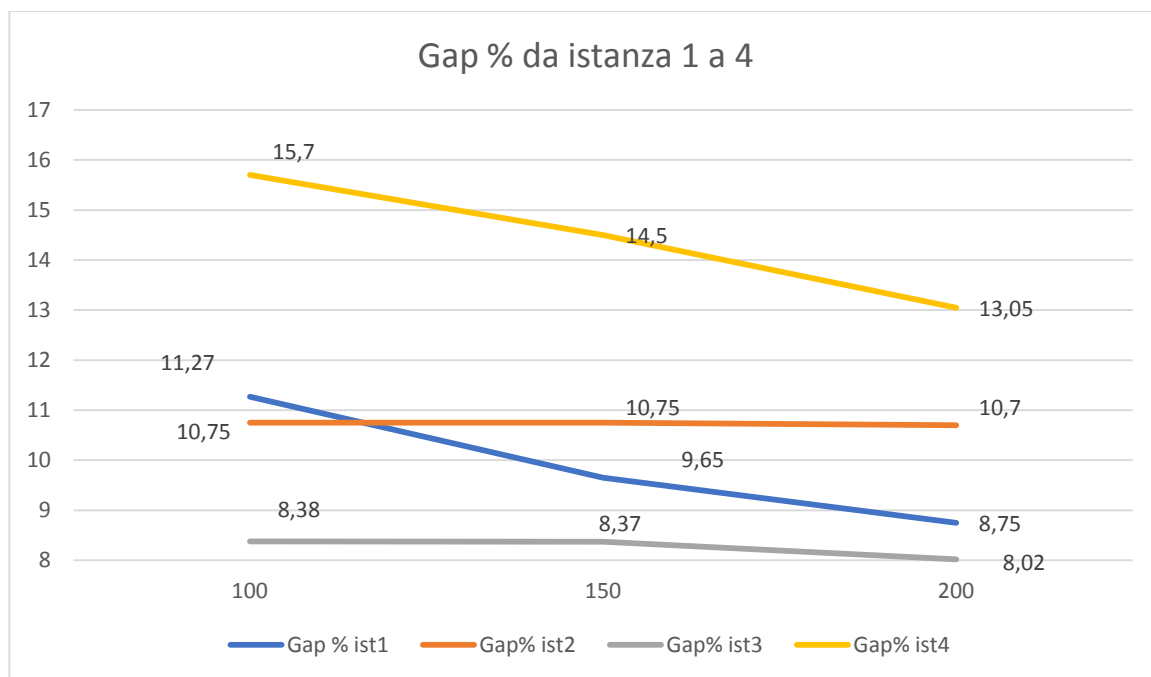


Figura 5.1: Andamento del gap tra la soluzione approssimata e l'upper bound migliore facendo lavorare il programma per periodi di tempo sempre maggiori (istanze da 1 a 4)

Dalla tabella 5.5 alla 5.8 sono riportate, in base ai tempi di elaborazione, le percentuali di utilizzo di una sala con l'ordinamento calcolato dal modello. È importante notare che sebbene la funzione obiettivo faccia finire la sala sempre all'ultimo istante, con l'ordinamento si vengono a creare degli slot temporali in cui non si opera. Questo è dovuto all'ordinamento compatto, non eseguito dalla funzione obiettivo, che invece di “spalmare” le operazioni su tutta la durata della sala, le avvicina il più possibile tra loro.

TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE	100S	180S	250S
SALA 1	100%	100,00%	100%
SALA 2	81,94%	91,67%	90,28%
SALA 3	94,44%	94,44%	94,44%
SALA 4	97,22%	97,22%	97,22%
SALA 5	90,28%	84,72%	100%

Tabella 5.5: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 1)

TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE	100S	180S	250S
SALA 1	88,89%	88,89%	88,89%
SALA 2	87,50%	87,50%	87,50%
SALA 3	94,44%	94,44%	94,44%
SALA 4	97,22%	97,22%	97,22%
SALA 5	95,83%	95,83%	95,83%

*Tabella 5.6: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedulate (istanza 2)*

TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE	100S	180S	250S
SALA 1	98,61%	98,61%	98,61%
SALA 2	100,00%	100,00%	100,00%
SALA 3	91,67%	91,67%	91,67%
SALA 4	95,83%	95,83%	95,83%
SALA 5	95,83%	95,83%	95,83%

*Tabella 5.7: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedulate (istanza 3)*

TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE	100S	230S	300S
SALA 1	98,61%	98,61%	98,61%
SALA 2	87,50%	93,06%	87,50%
SALA 3	90,28%	90,28%	90,28%
SALA 4	98,61%	76,39%	98,61%
SALA 5	90,28%	97,22%	76,39%

*Tabella 5.8: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedulate (istanza 4)*

Dalle tabelle risulta evidente il concetto dell'avvicinamento all'ottimo. Infatti, più il tempo a disposizione del solver è grande, meglio questo riesce a schedulare le operazioni. In particolare, si nota che anche il loro avvicinamento risulta essere migliore e occupare maggior tempo possibile all'interno di una sala operatoria senza sforare il tempo da questa previsto.

## 5.2 Generalizzazione di operazioni in conflitto

Il prossimo passo da compiere è la generalizzazione del conflitto tra le operazioni. Siamo partiti dal solo apparecchio di scopia (o comunque risorsa comune) all'interno dei dati, in linea con l'ospedale di Ivrea. Questo limita le operazioni in conflitto alla sola presenza dello strumento in comune, di conseguenza se l'operazione 1 è in conflitto con l'operazione 9 e questa è in conflitto con l'operazione 21, allora l'operazione 1 è in conflitto con l'operazione 21. Negli ospedali non è sempre così. Allora si sceglie di generare conflitto tra le varie operazioni su sale differenti fissata una certa probabilità (10%, 20%, 30%). In questo modo è possibile avere delle operazioni in conflitto non per forza collegate con le altre. Le informazioni sulle operazioni in conflitto sono riportate nell'appendice B.

Con queste considerazioni vengono eseguite dall'algoritmo la quinta e la sesta istanza. Utilizzeremo due matrici differenti per stabilire la conflittualità tra coppie di operazioni. In questo caso non è più rilevante ai fini del modello l'utilizzo o meno di un apparecchio di scopia, infatti questo è considerato all'interno della matrice di conflitto. Per entrambe queste istanze si considera una conflittualità con probabilità del 10%.

L'istanza 5 presenta un valore della funzione obiettivo iniziale a 128, che cresce, con l'inserimento di 3 operazioni, a 129 a 250 secondi. Da questo valore anche se il tempo di elaborazione è molto elevato non sembra necessario far procedere ulteriormente l'algoritmo, in quanto non cambia il risultato. I risultati sono riportati nelle tabelle 5.9, 5.11 e nel grafico 5.2.

Per l'istanza 6 il primo valore della funzione obiettivo è disponibile a 100 secondi ed è di 122, aumentando poi a 280 secondi. Il valore rimane stabile anche per tempi di elaborazione molto elevati. I dati sono riportati nelle tabelle 5.10, 5.12 e nel grafico 5.2.

Istanza 5			
Tempo limite	100s	250s	400s
Funzione obiettivo	128	129	129
Operazioni inserite	30	33	33

Tabella 5.9: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 5)

Istanza 6			
Tempo limite	100s	280s	400s
Funzione obiettivo	122	123	123
Operazioni inserite	28	29	29

Tabella 5.10: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 6)

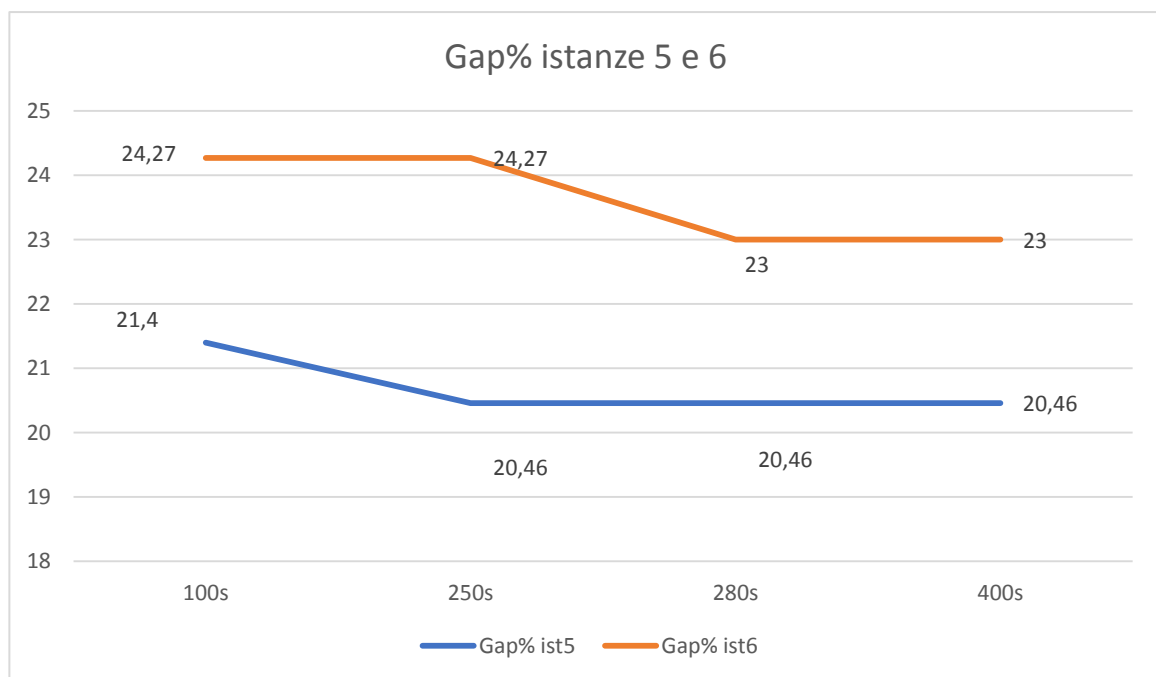


Figura 5.2: Andamento del gap tra la soluzione approssimata e l'upper bound migliore facendo lavorare il programma per periodi di tempo sempre maggiori (istanze 5 e 6)



<b>TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE</b>	<b>100S</b>	<b>250S</b>	<b>400S</b>
<b>SALA 1</b>	90,28%	90,28%	90,28%
<b>SALA 2</b>	93,06%	97,22%	97,22%
<b>SALA 3</b>	86,11%	97,22%	97,22%
<b>SALA 4</b>	83,33%	91,67%	91,67%
<b>SALA 5</b>	91,67%	97,22%	97,22%

*Tabella 5.11: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 5)*

<b>TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE</b>	<b>100S</b>	<b>280S</b>	<b>300S</b>
<b>SALA 1</b>	91,67%	90,28%	90,28%
<b>SALA 2</b>	90,28%	100,00%	100,00%
<b>SALA 3</b>	91,67%	91,67%	91,67%
<b>SALA 4</b>	91,67%	81,94%	81,94%
<b>SALA 5</b>	81,94%	93,06%	93,06%

*Tabella 5.12: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 6)*

Nelle prossime due istanze, si viene a creare un conflitto fra operazioni diverse con percentuale del 20%.

Nell'istanza 7 il primo valore rilevato è di 111 a 100 secondi. Questo valore rimane costante anche con tempi computazionali molto elevati. I dati sono rilevabili dalle tabelle 5.13, 5.15 e dal grafico 5.3.

L'istanza 8 invece presenta un valore iniziale di funzione obiettivo pari a 122 a 100 secondi. Anche in questo caso, tempi computazionali maggiori non hanno portato a delle soluzioni migliori. La differenza si nota solo a livello di gap %, che diminuisce di qualche punto. I dati sono rilevabili dalle tabelle 5.14, 5.15 e dal grafico 5.3.

Un conflitto del 20% all'interno delle operazioni porta quindi ad una risoluzione più difficile da parte dell'algoritmo.

Istanza 7			
Tempo limite	100s	260s	400s
Funzione obiettivo	111	111	111
Operazioni inserite	27	27	27

Tabella 5.13: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 7)

Istanza 8			
Tempo limite	100s	260s	400s
Funzione obiettivo	122	122	122
Operazioni inserite	30	30	30

Tabella 5.14: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 8)

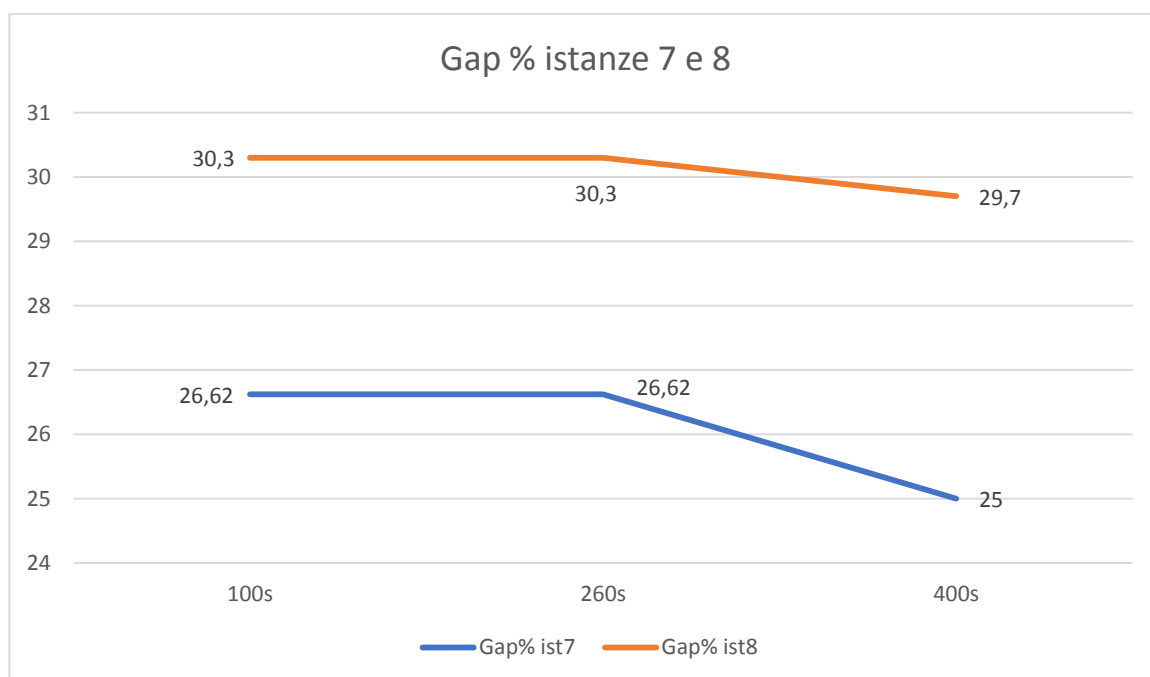


Figura 5.3: Andamento del gap tra la soluzione approssimata e l'upper bound migliore facendo lavorare il programma per periodi di tempo sempre maggiori (istanze 7 e 8)

<b>TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE</b>	<b>100S</b>	<b>250S</b>	<b>400S</b>
<b>SALA 1</b>	80,56%	80,56%	80,56%
<b>SALA 2</b>	88,89%	88,89%	88,89%
<b>SALA 3</b>	70,83%	70,83%	70,83%
<b>SALA 4</b>	84,72%	84,72%	84,72%
<b>SALA 5</b>	100,00%	100,00%	100,00%

*Tabella 5.15: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 7)*

<b>TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE</b>	<b>100S</b>	<b>250S</b>	<b>400S</b>
<b>SALA 1</b>	93,06%	93,06%	93,06%
<b>SALA 2</b>	84,72%	84,72%	84,72%
<b>SALA 3</b>	88,89%	88,89%	88,89%
<b>SALA 4</b>	91,67%	91,67%	91,67%
<b>SALA 5</b>	87,50%	87,50%	87,50%

*Tabella 5.16: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 8)*

Le prossime istanze considerano invece una probabilità di conflitti del 30.

Il problema inizia ad essere più complesso, infatti il primo valore della funzione obiettivo è fornito a 150s, non a 100 come nelle altre istanze. Vengono schedate la metà delle operazioni totali. Questo valore non aumenta nonostante i tempi di elaborazione elevati. I dati sono rilevabili dalle tabelle 5.17, 5.19 e dal grafico 5.4.

L'istanza 10 presenta uno sviluppo simile. Il primo valore per la funzione obiettivo è disponibile a 160s, per un valore di 104, molto inferiore a quello delle altre istanze. Nonostante ciò le sale sono più colme rispetto a quelle dell'istanza 9, ciò è sicuramente dovuto al tempo

richiesto da ogni operazione per essere eseguita. I dati sono rilevabili dalle tabelle 5.18, 5.20 e dal grafico 5.4.

Istanza 9			
Tempo limite	150s	350s	400s
Funzione obiettivo	113	113	111
Operazioni inserite	25	25	25

*Tabella 5.17: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 9)*

Istanza 10			
Tempo limite	160s	350s	400s
Funzione obiettivo	104	104	104
Operazioni inserite	24	24	24

*Tabella 5.18: valori della funzione obiettivo e numero di operazioni inserite con 5 sale operatorie in diversi tempi di elaborazione (istanza 10)*

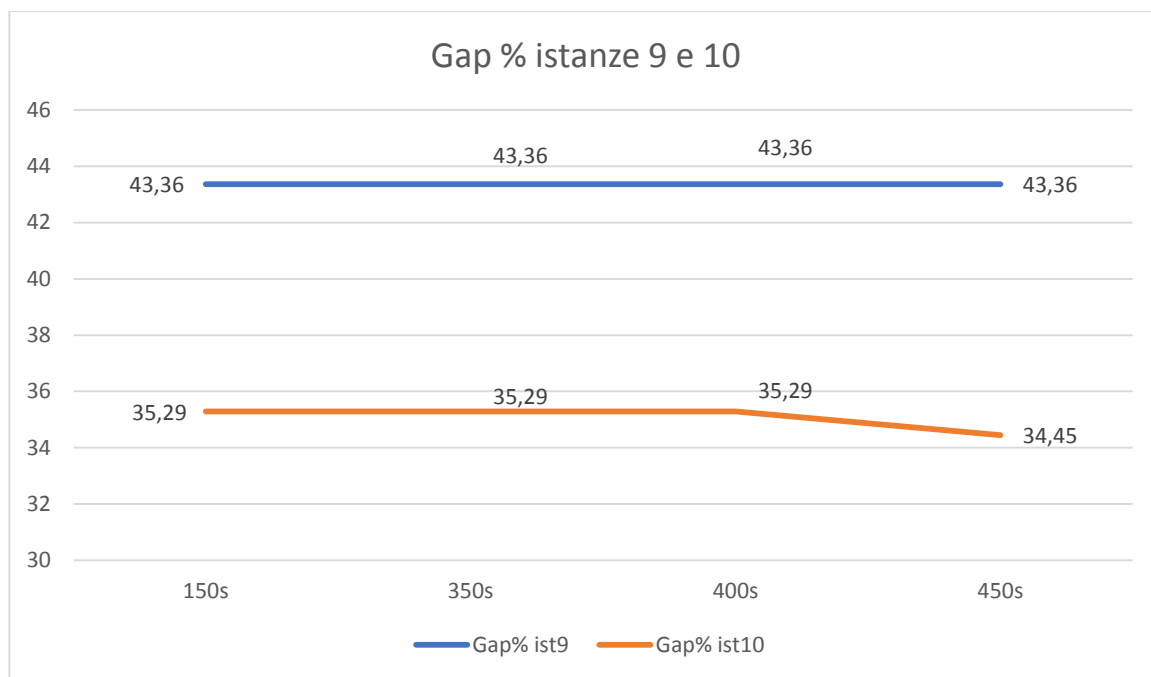


Figura 5.4: Andamento del gap tra la soluzione approssimata e l'upper bound migliore facendo lavorare il programma per periodi di tempo sempre maggiori (istanze 9 e 10)

TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE	150S	250S	400S
SALA 1	52,78%	52,78%	52,78%
SALA 2	70,83%	70,83%	70,83%
SALA 3	75,00%	75,00%	75,00%
SALA 4	76,39%	76,39%	76,39%
SALA 5	76,39%	76,39%	76,39%

Tabella 5.19: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 9)

TEMPI PERCENTUALI DI OCCUPAZIONE DI 5 SALE	150S	250S	400S
SALA 1	80,56%	80,56%	80,56%
SALA 2	87,50%	87,50%	87,50%
SALA 3	100,00%	100,00%	100,00%
SALA 4	97,22%	97,22%	97,22%
SALA 5	94,44%	94,44%	94,44%

Tabella 5.20: percentuale di sala occupata dalle operazioni schedate (istanza 10)

Risulta evidente che un maggior numero di conflitti all'interno della lista di operazioni porta ad una più difficile schedulazione delle operazioni nelle sale operatorie.

## Capitolo 6

# Conclusioni

### 6.1 Il lavoro svolto

Un primo approccio alla risoluzione del problema delle sale operatorie è stato senza dubbio l'implementazione di un modello di programmazione lineare che potesse fornire una soluzione esatta. Tuttavia, seguendo la letteratura<sup>27</sup> si è scelto di suddividere la risoluzione in due tempi, una vera e propria schedulazione e una simulazione. Ciò può portare ad uno svantaggio di soluzione non ammissibile, in quanto l'ordinamento degli stessi dipende dalla prima risoluzione e questa non è più modificabile. In questo modo però è possibile analizzare delle situazioni che comprendono un numero di sale sempre maggiori, infatti il primo step impiega meno tempo per assegnare le operazioni alle sale senza schedularle, mentre il secondo step impiega pochi istanti ad ordinarle.

L'implementazione di tale modello permette di poter scegliere delle operazioni da un pool generale composto da operazioni di ogni tipo. In questo caso è stato constatato che l'algoritmo che implementa il modello può girare per un certo periodo di tempo e fornire una soluzione sempre più ottimale in base alla durata del tempo di elaborazione. Essendo il modello di utilizzo giornaliero, si potrebbe pensare che vada bene farlo lavorare una volta dopo aver ottenuto il pool di operazioni da eseguire e, compatibilmente con il tempo in cui deve essere eseguita la schedulazione, si possa impostare un tempo più o meno ampio.

L'ottenimento di questi risultati ha una duplice importanza. Se è facile schedulare a mano una serie di operazioni che hanno pochi conflitti fra loro (supponiamo solo uno o due conflitti), diventa difficile schedulare autonomamente un piano operatorio adeguato quando i conflitti iniziano ad aumentare.

L'operatore che utilizza l'algoritmo può anche dare un input diretto, infatti imponendo, ad esempio, nel modello una scrittura del tipo:

$$\sum_{t \text{ in Slot}} x(i, t) = 1$$

questo schedulerà necessariamente l'operazione  $i$ .

Il risultato prodotto dall'algoritmo non è una soluzione definitiva del piano operatorio ma può essere visto come un supporto alla decisione per stilare un ottimale piano d'azione. Il primario di riferimento potrà sempre intervenire sulla schedulazione a patto che questa non sia molto vincolata dai conflitti nei vari interventi.



## 6.2 Miglioramenti implementabili

Oltre al doppio modello (ottimizzazione e ordinamento) sviluppato nel progetto, un migliore approccio che può essere utilizzato per realtà maggiori riguarda sempre il concetto di mateuristica<sup>35</sup>. La mateuristica è una combinazione di metodi esatti e di metodi metaeuristici, diventando di fatto un vero e proprio “ibrido”. Per spiegarla al meglio occorre introdurre i concetti di:

- *Local Branching*: un approccio di ricerca locale che esplora i dintorni di una certa soluzione;

È introdotto con lo scopo di integrare la ricerca locale e le idee metaeuristiche nella programmazione intera mista (MILP), in generale sono considerate MILP con variabili  $x_j$  binarie. L’idea è di risolvere iterativamente un sotto problema corrispondente ad un intorno ottimale k-esimo usando in solver MILP che ricerchi la migliore soluzione fra quelle ad una distanza non maggiore di k. Nel local branching si utilizza un processo maestro, che è un metodo esatto, come nel branch & bound, mentre l’algoritmo è un’esatta ricerca dell’intorno eseguita da un solver MILP sfruttando gli intorni generati ad una distanza fissa. Questo si ottiene introducendo un limite del branching locale basato su una soluzione  $\bar{x}$  dove  $x_j = \bar{x}_j \quad \forall j$ , che divide lo spazio di ricerca nell’intorno ottimale k-esimo e il resto dello spazio delle soluzioni. Questo meccanismo alla base è esteso introducendo i limiti di tempo, modificando automaticamente la distanza k e aggiungendo strategie di diversificazione per migliorare la sua performance.

- *Variable Partitioning Local Search*: un’altra ricerca locale che è basata su una parziale ri-ottimizzazione di una parte delle variabili.

Può essere vista come un approccio alla ricerca locale per MILP, adatta soprattutto a variabili binarie, usando una generalizzazione del cambio di intorno k-esimo. Considerando un MILP generico

$$\text{minimize } z = C^T X$$

$$\text{subject to } AX \leq B$$

$$X \in \{0, 1\}$$

dove  $X^T = (x_1, \dots, x_n)$  è un vettore di  $n$  variabili del problema e  $\bar{X}^T = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$  è una soluzione accettabile del MILP. Se questo è il caso è sempre possibile definire un sottoinsieme  $S$  di una dimensione definita di indici variabili  $\{1, 2, \dots, n\}$ . L'intorno  $N(\bar{X})$  consiste in tutte le soluzioni del MILP dove la variabile  $j$ -esima è uguale al valore della variabile  $j$ -esima in  $\bar{X}$  per tutte le  $j \notin S$ . L'intorno risultante può essere ispezionato per una soluzione migliore usando un solver MILP sia ottimamente che approssimativamente. L'idea proposta è descritta nella figura 3.6 che mostra un problema di permutazione dove le variabili che appartengono alla soluzione corrente appartengono a due insiemi. Il primo è poi ottimizzato nuovamente utilizzando un solver MILP generando un'assegnazione permutata mentre le variabili del secondo insieme rimangono nella stessa posizione della soluzione corrente. Nell'esempio considerato è stato indotto un intorno consistente di sette differenti possibili soluzioni, ottenute applicando il solver MILP sette volte su sottoproblemi differenti (in figura l'insieme da ottimizzare comprende 4 variabili consecutive: quest'insieme può quindi partire dalla prima posizione, o dalla seconda fino alla settima essendoci in tutto dieci variabili). Questo approccio è possibile solo grazie alla presenza di software di modello di programmazione lineare intera (MILP) che rendono possibile incorporare la soluzione di problemi matematici come un sotto-problema di soluzione di algoritmi. Quindici anni fa ciò non sarebbe stato possibile, allora un modello MILP era un oggetto "monolitico" da risolvere in una sola esecuzione o semplicemente studiato per poter capire al meglio la struttura del problema. La mateuristica diventa quindi il risultato della combinazione di sofisticate ricerche euristiche con solver MILP molto potenti.

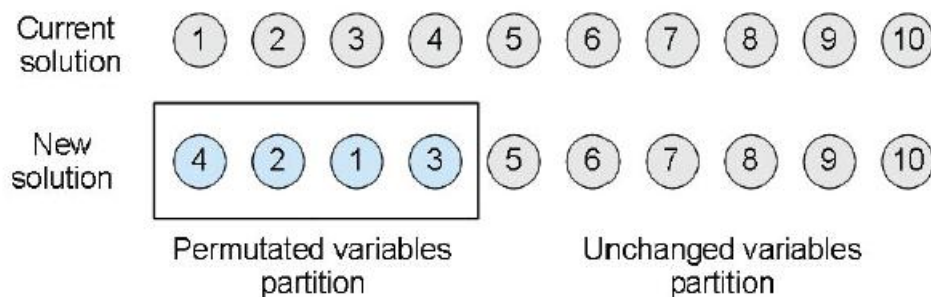


Figura 3.6: esempio di lavorazione VPLS

Un'applicazione della mateuristica è stata nella gestione del sistema energetico delle case<sup>36</sup>. In questa applicazione è stata eseguita solo la prima parte dell'algoritmo per tutto il tempo limite, tenendo in considerazione una soglia sul picco di consumo e cercando di minimizzare il costo totale relazionato al consumo medio di energia per ogni istanza in ogni istante di tempo. In questa applicazione sono stati utilizzati quattro differenti approcci, ma il migliore si è

dimostrato essere quello che implementa un algoritmo mateuristico. Relativamente a questa risoluzione si può fare riferimento alla figura 3.7, in cui è dimostrato un semplice esempio dove due applicazioni devono essere schedate in un orizzonte temporale di 12 slot temporali in due fasi.

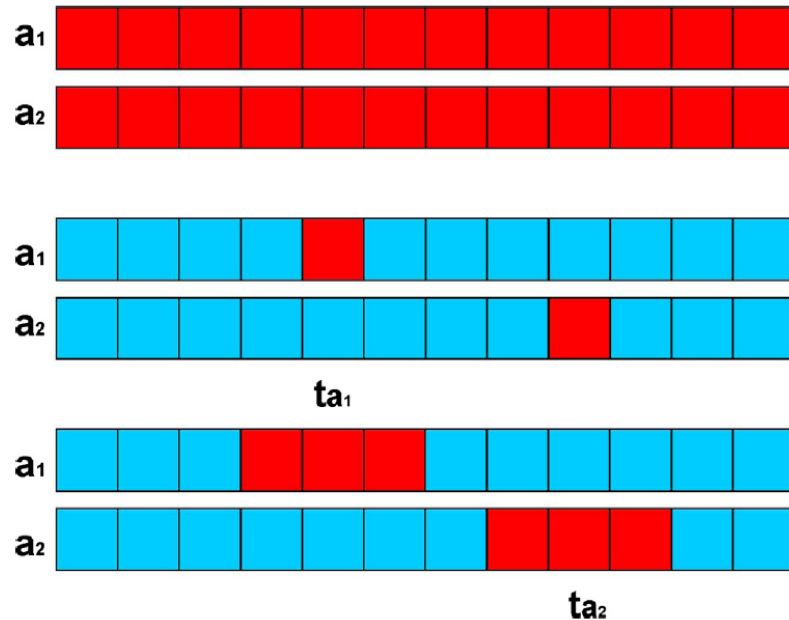


Figura 3.7: dall'alto si possono osservare le variabili attive nel modello completo, la soluzione trovata nella prima fase, le variabili attive nella seconda fase

La mateuristica ha un approccio simile a quello che è stato mantenuto nel modello. Si arriva ad una prima soluzione e poi si cerca di migliorarla analizzando un intorno della soluzione cercando di portarlo all'ottimo e tenendo fisso il resto, passando poi ad un altro intorno che si cerca di portare all'ottimo tenendo il resto come dato fisso e così via. Il problema descritto da Della Croce et al.<sup>36</sup> è molto simile a quello che si presenta nelle sale operatorie. Si vuole evitare di superare un certo picco (l'uso della sala operatoria) e massimizzare il numero di operazioni inserite nelle sale. Nelle sale operatorie si potrebbe applicare questo ragionamento ragionando di volta in volta su una sola sala, cercando di ottimizzarla al meglio e trascurando le altre sale, poi si passa alla sala successiva e si itera fino a quando non si trova la miglior soluzione possibile. Un altro metodo di applicazione potrebbe invece coinvolgere due sale alla volta, tenendo le altre bloccate, e portandole all'ottimo, iterando la soluzione fra coppie di sale diverse fino al raggiungimento dell'ottimo globale. Questo tipo di operazione potrebbe essere utile nel momento in cui si volesse portare le schedulazioni il più possibile vicino all'ottimo.

È altrettanto vero che l'applicazione del modello in oggetto è applicata ad un tempo normalizzato di slot di 5 minuti, nel momento in cui si vuole applicare il concetto di mateuristica, tuttavia, occorrerebbe che i tempi siano quelli reali delle operazioni. Fare ciò può comportare uno sforamento dell'attività nella sala operatoria. Nel caso in cui questo sia comunque sotto il 5% dell'apertura totale della sala rimane comunque poco rilevante nella chiusura in ritardo e si può comunque accettare come risultato.

# Appendice

# Appendice A

## Modello in Mosel

Nella seguente sezione viene proposto il modello in linguaggio mosel per intero, comprensivo di ogni passaggio elencato nel Capitolo 3.

*model Progetto*

*uses "mmxprs", "mmsystem"*

*declarations*

*N=50*

*N2=72*

*N2V=250*

*S=5*

*Operazioni = 1..N !numero massimo di operazioni in una giornata di tutte le sale*

*Sale = 1..S !Sale disponibili*

*Slot = 0..N2*

*Slot2 = 0..N2V*

*Durata, DurataE: array (Operazioni) of integer !Durata delle operazioni arrotondate e durata delle operazioni reale*

*Setup: array (Operazioni) of integer !Tempo di Setup tra un'operazione e l'altra*

*Sala: array (Operazioni) of integer !Sala delle operazioni*

*Scopia: array (Operazioni) of integer !L'operazione richiede l'apparecchio di scopia? Nel caso valore 1*

*Urgenza: array (Operazioni) of string !Urgenza dell'operazione (lista A,B,C)*

*x: array (Operazioni, Slot) of mpvar !Vettore binario che segna 1 se l'operazione i inizia nello slot t*

*A, B, C: array (Operazioni) of integer !Vettori che indicano l'urgenza dell'operazione i*

*sala\_o,sala\_o1: array (1..S) of integer*

*ordinef: array(Operazioni, Slot) of integer;*

*sorted\_op,growth: array (1..N) of integer;*

*end-declarations*

*!vincolo di tempo per completamento del programma*

*setparam("XPRS\_MAXTIME",-200)*

*setparam("XPRS\_HEURSTRATEGY",3)*

*setparam("XPRS\_MIPRELSTOP", 0.0);*

*initializations from "listaOp.dat"*

*DurataE Sala Scopia Urgenza Setup*

*end-initializations*

*initializations from "Conflict7.dat"*

*conflitto*

*end-initializations*

*numsale:=5;*

*forall (i in Operazioni, j in Slot) x(i,j) is\_binary*

*!Arrotondamento delle Durate*

*forall (i in Operazioni) Durata(i) := round (DurataE(i)/5)*

*!Dato il vettore Urgenza, i vettori A,B,C si incrementano per ogni operazione della categoria*

*forall (i in Operazioni) do*

*if (Urgenza(i)="A") then*

*A(i):=5;*

*end-if*

*if (Urgenza(i)="B") then*

*B(i):=3;*

*end-if*

*if (Urgenza(i)="C") then*

*C(i):=1;*

*end-if*

*end-do*

*!Per ogni operazione questa non può finire dopo N2, ossia  $x(i, N2-Durata(i)+k)=0$  per ogni  $k \geq 1$*

*forall (i in Operazioni) sum (k in 1..Durata(i))  $x(i, N2-Durata(i)+k)=0$*

*forall (k in 1..numsale) do*

*sala\_o1(k):=0*

*end-do*

*!non sovrapposizioni fra operazioni che usano stessa sala*

*forall (i in Operazioni, j in i+1..N, t in Slot) do*

*if (Sala(i)=Sala(j)) then*

*!Condizione per la quale l'operazione j non può iniziare durante l'operazione i*

*if ((t>=Durata(j)) and (t<=N2-Durata(i))) then*

*if(t-Durata(j)<Setup(j)) then*

*r:=t-Durata(j)*

*!Se t-*

*durata è =0 k non può assumere valori inferiori*

*x(i,t)+(sum (k in t-Durata(j)-r..t+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k)) <=1*

*end-if*

*if (t-Durata(j)>=Setup(j)) then*

*if (t+Durata(i)+Setup(i)<=N2) then*

*x(i,t)+sum(k in t-Durata(j)-Setup(j)+1..t+Durata(i)+Setup(i))x(j,k)<=1*

*else*

*x(i,t)+sum(k in t-Durata(j)-Setup(j)+1..t+Durata(i))x(j,k)<=1*

*end-if*

*end-if*

*end-if*

*!Condizione per la quale l'operazione j non può iniziare in un istante prima dell'operazione i tale per cui j finisce durante i*

*if (t<=Durata(j)-1) then*

*if(t+Durata(i)+Setup(i)>N2)then*

*d:=N2-Durata(i)-Setup(i)*

*x(i,t)+sum (k in 0..d+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k) <=1*

*else*

*x(i,t)+sum (k in 0..t+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k) <=1*

*end-if*

*end-if*

*end-if*

*end-do*

*!non sovrapposizioni fra operazioni che usano lo stesso macchinario*

*forall (i in Operazioni, j in i+1..N, t in Slot) do*

*if (Scopia(i)+Scopia(j)=2 and Sala(i)<>Sala(j)) then*

*!Condizione per la quale l'operazione j non può iniziare durante l'operazione i*

*if ((t>=Durata(j)) and (t<=N2-Durata(i))) then*

*if(t-Durata(j)<Setup(j)) then*



```

        r:=t-Durata(j)
durata è =0 k non può assumere valori inferiori
        x(i,t)+(sum (k in t-Durata(j)-r..t+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k)) <=I
    end-if

    if (t-Durata(j)>=Setup(j)) then
        if (t+Durata(i)+Setup(i)<=N2) then
            x(i,t)+sum(k in t-Durata(j)-
Setup(j)+1..t+Durata(i)+Setup(i))x(j,k)<=I
        else
            x(i,t)+sum(k in t-Durata(j)-
Setup(j)+1..t+Durata(i))x(j,k)<=I
        end-if
    end-if
end-if

!Operazioni in conflitto casuali
forall (i in Operazioni) do
forall(j in i+1..N, t in Slot) do
    if ((conflitto(i,j)<=conf) and Sala(i)<>Sala(j)) then
        if ((t>=Durata(j)) and (t<=N2-Durata(i))) then !Condizione per la quale l'operazione j non
        può iniziare durante l'operazione i
            if(t-Durata(j)<Setup(j)) then
                r:=t-Durata(j) !Se t-durata è =0 k non può assumere valori inferiori
                if(t+Durata(i)+Setup(i)>N2)then
                    d:=N2-Durata(i)-Setup(i)
                    x(i,t)+(sum (k in t-Durata(j)-r..N2) x(j,k)) <=I
                else
                    x(i,t)+(sum (k in t-Durata(j)-r..t+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k)) <=I
                end-if
            end-if
            if (t-Durata(j)>=Setup(j)) then
                if (t+Durata(i)+Setup(i)<=N2) then
                    x(i,t)+sum(k in t-Durata(j)-Setup(j)+1..t+Durata(i)+Setup(i))x(j,k)<=I
                else
                    x(i,t)+sum(k in t-Durata(j)-Setup(j)+1..t+Durata(i))x(j,k)<=I
                end-if
            end-if
        end-if
    end-if
end-if

```

```

end-if

if (t<=Durata(j)-1) then
    !Condizione per la quale l'operazione j non può iniziare in un istante
    prima dell'operazione i tale per cui j finisce durante i
    if(t+Durata(i)+Setup(i)>N2)then
        d:=N2-Durata(i)-Setup(i)
        x(i,t)+sum (k in 0..d+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k) <=1
    else
        x(i,t)+sum (k in 0..t+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k) <=1
    end-if
end-if

end-if

end-do

end-do

!Condizione per la quale l'operazione j non può iniziare in un istante prima dell'operazione i tale per cui j finisce
durante i
if (t<=Durata(j)-1) then
    if(t+Durata(i)+Setup(i)>N2)then
        d:=N2-Durata(i)-Setup(i)
        x(i,t)+sum (k in 0..d+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k) <=1
    else
        x(i,t)+sum (k in 0..t+Durata(i)+Setup(i)) x(j,k) <=1
    end-if
end-if

end-if

end-do

!Vincolo per cui per tutte le operazioni la somma di t deve essere 1 perché venga svolta sempre un'operazione
non in conflitto
forall (i in Operazioni) sum (t in Slot) x(i,t)<=1

!La funzione obiettivo è definita come la somma dei vettori d'urgenza moltiplicati per la variabile x(i,t)
obj := sum (i in Operazioni, t in Slot) x(i,t)*A(i) + sum (i in Operazioni, t in Slot)x(i,t)*B(i) + sum (i in
Operazioni, t in Slot) x(i,t)*C(i)

!Questa scrittura aiutava a compattare il più possibile le operazione ma non era ottimale per raggiungere la
miglior soluzione
!- sum (i in Operazioni,t in Slot) t*x(i,t)

!Voglio massimizzare la funzione obiettivo
maximize(obj)

```

*!Voglio creare, dopo la massimizzazione, un vettore che contenga al suo interno tutte le operazioni programmate in ordine temporale crescente.*

*dummy\_count:=0;*

*forall(t in Slot) do*

*forall (k in 1..numsale) do*

*forall (i in Operazioni) do*

*if(getsol(x(i,t))>=0.5 and Sala(i)=k) then*

*!Bisogna*

*lavorare su come vengono riportati gli istanti*

*dummy\_count+=1;*

*sorted\_op(dummy\_count):=i;*

*end-if*

*end-do*

*end-do*

*end-do*

*forall (k in 1..numsale) do*

*sala\_o(k):=0*

*end-do*

*!Simulazione operazioni ospedale di Ivrea*

*Brill:=0*

*forall (o in 1..dummy\_count, t in Slot, k in 1..numsale) do*

*if (sala\_o(k)=0 and Sala(sorted\_op(o))=k)then*

*ordinef(sorted\_op(o),t):=1*

*sala\_o(k):=sala\_o(k)+Durata(sorted\_op(o))+Setup(sorted\_op(o))*

*if (Scopia(sorted\_op(o))=1)then*

*Brill:=t+Durata(sorted\_op(o))+Setup(sorted\_op(o))*

*end-if*

*end-if*

*if(sum (l in Slot) ordinef(sorted\_op(o),l)=0) then*

*if(Scopia(sorted\_op(o))=0)then*

*if(t=sala\_o(k) and Sala(sorted\_op(o))=k)then*

*ordinef(sorted\_op(o),t):=1*

*sala\_o(k):=sala\_o(k)+Durata(sorted\_op(o))+Setup(sorted\_op(o))*

*if(sala\_o(k)>N2)then*

*ordinef(sorted\_op(o),t):=0*

*end-if*

*end-if*

```

end-if
if(Scopia(sorted_op(o))=1)then
    if(t>=Brill)then
        if(t>=sala_o(k) and Sala(sorted_op(o))=k)then
            ordinef(sorted_op(o),t):=1

sala_o(k):=sala_o(k)+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
Brill:=t+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
        end-if
    end-if
end-if
end-if
end-do

```

*!Simulazione operazioni conflitti casuali*

```

forall(i in Operazioni, j in Operazioni) do
    c_op(i,j):=0
end-do

forall (o in 1..dummy_count, t in Slot, k in 1..numsale) do
    if (sala_o(k)=0 and Sala(sorted_op(o))=k)then
        ordinef(sorted_op(o),t):=1
        sala_o(k):=sala_o(k)+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
        forall (q in o+1..dummy_count) do
            if (conflitto(sorted_op(o),sorted_op(q))<= conf)then
                c_op(sorted_op(o),sorted_op(q)):=t+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
                c_op1(sorted_op(o),sorted_op(q)):=1
            end-if
        end-do
    end-if

    if(sum (l in Slot) ordinef(sorted_op(o),l)=0) then
        forall(q in 1..o) do
            if(c_op1(sorted_op(q),sorted_op(o))=1)then
                if(t>=c_op(sorted_op(q),sorted_op(o)))then
                    if(t>=sala_o(k) and Sala(sorted_op(o))=k)then
                        ordinef(sorted_op(o),t):=1
                        sala_o(k):=sala_o(k)+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))

```

```

    forall (h in o+1..dummy_count) do
        if (conflitto(sorted_op(o),sorted_op(h))<= conf)then
            c_op(sorted_op(o),sorted_op(h)):=t+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
            c_op1(sorted_op(o),sorted_op(h)):=1
        end-if
    end-do
end-if

else

    if(t=sala_o(k) and Sala(sorted_op(o))=k)then
        ordinef(sorted_op(o),t):=1
        sala_o(k):=sala_o(k)+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
        forall (h in o+1..dummy_count) do
            if (conflitto(sorted_op(o),sorted_op(h))<= conf)then
                c_op(sorted_op(o),sorted_op(h)):=t+Durata(sorted_op(o))+Setup(sorted_op(o))
                c_op1(sorted_op(o),sorted_op(h)):=1
            end-if
        end-do
        if(sala_o(k)>N2)then
            ordinef(sorted_op(o),t):=0
        end-if
    end-if
end-if

end-do

forall(k in 1..numsale, t in Slot, o in 1..dummy_count) do
    if(ordinef(sorted_op(o),t)>=0.5 and Sala(sorted_op(o))=k) then
        writeln(sorted_op(o)," ",Sala(sorted_op(o))," ",t," ",Durata(sorted_op(o)),"
        ",Setup(sorted_op(o)));
    end-if
end-do

!Creazione del file .lp per controllare il comportamento dei vincoli
exportprob("aaa.lp");

end-model

```

# Appendice B

## Dati delle istanze

Di seguito vengono riportati i dati utilizzati per generare le istanze che sono state prese in esame per l'implementazione del modello tramite l'algoritmo.

- ListaOp.dat

DurataE: [108 43 43 30 68 86 86 70 55 55 20 25 58 60 240 55 13 25 26 56 334 65 59 62  
33 32 32 33 59 62 10 78 67 75 19 8 8 19 10 78 108 43 43 30 68 86 86 70 55 55]

Sala: [1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5  
5 5 5 5 5]

Scopia: [0 1 1 0 0 1 1 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0  
0 1 1 1 0 0]

Urgenza: [A B C A C A B A C A B C B A A A B B C C B C B A B A C A C B A C A B  
B C C A A A A B C A C A B A C A]

Setup: [2  
2 2 2 2 2]

- ListaOp2.dat

DurataE: [37 69 43 57 67 85 29 72 62 52 28 55 71 66 270 51 5 12 26 247 300 69 55 62 44 36  
21 39 63 60 16 83 62 70 19 16 17 25 5 92 118 36 43 30 44 69 95 77 59 44]

Sala: [1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5 5  
5 5 5]

Scopia: [0 1 1 0 1 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1  
1 1 0 0]

Urgenza: [A B C A C A B A C A B C B A A A B B C C B C B A B A C A C B A C A B B C  
C A A A A B C A C A B A C A]









- Conflict5.dat

Conflitti=[1 13, 1 26, 1 32, 1 35, 2 26, 2 27, 2 29, 2 32, 2 36, 2 37, 2 42, 2 44, 2 45, 2 46, 3 21, 3 23, 3 47, 4 18, 4 25, 5 29, 5 38, 5 40, 5 43, 6 19, 6 26, 6 39, 6 42, 6 45, 6 47, 7 16, 7 22, 7 26, 8 20, 8 28, 8 30, 9 13, 9 21, 9 35, 10 22, 10 24, 10 50, 11 26, 11 39, 12 22, 12 41, 13 23, 13 47, 14 22, 14 28, 14 35, 14 36, 15 40, 15 48, 15 50, 16 29, 17 24, 17 27, 17 36, 19 26, 19 27, 19 32, 19 36, 19 40, 20 24, 20 31, 20 35, 20 38, 21 37, 21 50, 22 4, 22 12, 22 17, 22 32, 22 33, 22 43, 23 35, 23 37, 23 43, 24 39, 24 40, 25 36, 25 50, 26 33, 26 36, 27 22, 27 31, 27 37, 28 37, 28 48, 29 48, 30 39, 30 50, 31 48, 33 44, 33 50, 34 45, 34 46, 34 48, 35 42, 35 45, 36 47, 36 50, 38 40, 38 46]

- Conflict6.dat

Conflitti=[1 15, 1 16, 1 30, 1 42, 1 44, 1 47, 2 11, 2 40, 2 50, 3 18, 3 23, 3 27, 3 28, 3 32, 3 35, 3 49, 4 12, 4 15, 4 16, 4 18, 4 21, 4 22, 4 23, 4 35, 4 41, 5 12, 5 19, 5 29, 5 45, 5 46, 6 19, 6 28, 7 29, 7 31, 7 34, 7 37, 8 30, 8 31, 8 36, 8 39, 8 49, 9 38, 10 15, 10 29, 10 30, 11 32, 12 43, 12 44, 12 45, 13 32, 13 41, 13 42, 13 46, 14 23, 14 28, 14 36, 14 43, 14 50, 15 25, 15 31, 15 36, 16 32, 16 37, 16 38, 17 34, 18 35, 19 22, 19 28, 19 31, 20 23, 20 29, 20 40, 21 38, 22 39, 22 44, 23 33, 23 37, 24 30, 24 39, 25 35, 25 45, 26 32, 26 36, 26 39, 26 40, 27 32, 27 35, 27 39, 27 43, 28 38, 28 40, 29 36, 30 47, 31 41, 31 43, 31 47, 32 49, 33 42, 33 44, 34 41, 34 47, 35 43, 37 45, 38 46, 39 41, 39 45]

- Conflict7.dat

Conflitti=[ 1 13, 1 19, 1 24, 1 26, 1 27, 1 32, 2 13, 2 16, 2 21, 2 23, 2 24, 2 26, 2 28, 2 34, 2 44, 3 17, 3 20, 3 25, 3 28, 3 30, 3 36, 3 40, 3 44, 3 45, 3 49, 4 12, 4 14, 4 16, 4 21, 4 29, 4 30, 4 37, 4 42, 4 49, 4 50, 5 19, 5 29, 5 30, 5 31, 5 45, 6 13, 6 23, 6 30, 6 46, 6 48, 7 24, 7 33, 7 35, 7 38, 7 40, 7 41, 7 43, 8 11, 8 16, 8 21, 8 22, 8 31, 8 32, 8 35, 8 46, 9 11, 9 23, 9 25, 9 29, 9 32, 9 49, 10 23, 10 26, 11 21, 11 42, 11 49, 12 26, 12 27, 12 33, 12 40, 12 41, 13 22, 13 24, 13 25, 13 27, 13 29, 13 35, 13 36, 13 40, 13 41, 13 42, 13 48, 13 50, 14 23, 14 27, 14 40, 14 49, 15 22, 15 27, 15 28, 15 41, 16 25, 16 37, 16 40, 16 48, 17 21, 17 25, 17 26, 17 27, 17 28, 17 29, 17 30, 17 31, 17 33, 17 34, 17 40, 18 23, 18 24, 18 27, 18 29, 18 38, 18 46, 19 21, 19 22, 19 26, 19 31, 19 39, 19 41, 19 42, 19 49, 20 32, 20 44, 20 45, 20 50, 21 33, 21 35, 21 36, 21 38, 21 39, 21 46, 22 32, 22 44, 23 34, 23 42, 24 33, 24 34, 24 35, 24 43, 24 47, 25 33, 25 34, 25 39, 25 41, 25 43, 25 44, 26 36, 26 40, 26 41, 26 48, 26 49, 26 50, 27 31, 27 35, 27 39, 27 44, 27 46, 27 48, 27 49, 28 33, 28 35, 28 46, 29 43, 29 50, 30 33, 30 34, 30 46, 30 47, 32 43, 32 44,

33 45, 33 50, 34 42, 35 45, 35 48, 35 49, 36 44, 36 50, 37 47, 38 43, 38 44, 38 50, 39 44, 39 45, 39 47, 40 41, 40 48, 40 50]

- Conflict8.dat

Conflitti=[ 1 22, 1 32, 1 33, 1 42, 1 43, 1 45, 2 29, 2 30, 2 33, 2 36, 2 39, 2 45, 2 50, 3 14, 3 18, 3 19, 3 20, 3 24, 3 27, 3 28, 3 38, 3 50, 4 11, 4 13, 5 11, 5 14, 5 15, 5 17, 5 26, 5 30, 5 31, 5 44, 6 11, 6 13, 6 17, 6 19, 6 24, 6 25, 6 31, 6 32, 6 34, 6 39, 6 46, 7 18, 7 21, 7 22, 7 24, 7 27, 7 29, 7 30, 7 45, 8 4, 8 12, 8 16, 8 20, 8 25, 8 36, 8 42, 8 45, 8 47, 9 25, 9 26, 9 27, 9 31, 9 34, 9 41, 9 42, 9 49, 10 14, 10 17, 10 19, 10 27, 10 35, 10 42, 10 46, 10 49, 10 50, 11 43, 11 45, 12 24, 12 25, 12 26, 12 29, 12 37, 12 41, 12 49, 12 50, 13 23, 13 29, 13 33, 13 39, 13 48, 14 21, 14 24, 14 25, 14 28, 14 32, 14 42, 14 48, 14 49, 14 50, 15 27, 15 29, 15 41, 15 45, 16 22, 16 29, 16 30, 16 33, 16 40, 16 43, 16 45, 16 46, 16 47, 17 21, 17 22, 17 31, 17 37, 17 44, 18 25, 18 29, 18 36, 18 43, 18 44, 19 22, 19 23, 19 25, 19 29, 19 42, 19 44, 19 47, 20 23, 20 27, 20 29, 20 30, 20 43, 21 31, 21 34, 21 37, 21 43, 21 45, 21 48, 21 49, 22 41, 22 42, 23 47, 24 31, 24 33, 24 38, 24 39, 24 42, 25 31, 25 32, 25 34, 26 31, 26 36, 26 40, 26 45, 26 48, 27 33, 27 36, 27 38, 27 40, 27 47, 28 38, 28 43, 28 47, 28 50, 29 33, 29 39, 29 40, 29 41, 29 48, 30 32, 30 33, 30 35, 30 38, 30 47, 33 44, 33 47, 34 46, 35 43, 35 47, 35 48, 36 41, 36 43, 36 48, 37 43, 37 48, 38 45, 39 45, 40 41, 40 44, 40 47]

- Conflite9.dat

Conflitti=[ 1 12, 1 13, 1 14, 1 15, 1 16, 1 31, 1 34, 1 36, 1 37, 1 45, 1 46, 1 49, 2 13, 2 14, 2 15, 2 24, 2 31, 2 32, 2 34, 2 37, 2 38, 2 41, 2 44, 2 45, 2 50, 3 12, 3 15, 3 17, 3 18, 3 19, 3 25, 3 26, 3 31, 3 32, 3 33, 3 35, 3 37, 4 11, 4 12, 4 14, 4 16, 4 18, 4 21, 4 23, 4 24, 4 31, 4 32, 4 33, 4 34, 4 38, 4 39, 4 48, 4 49, 4 50, 5 11, 5 12, 5 15, 5 18, 5 22, 5 23, 5 25, 5 29, 5 34, 5 41, 5 42, 5 45, 5 47, 5 48, 6 11, 6 12, 6 14, 6 22, 6 23, 6 24, 6 25, 6 29, 6 35, 6 37, 6 38, 6 44, 6 45, 6 46, 6 48, 6 49, 7 12, 7 13, 7 18, 7 22, 7 23, 7 26, 7 28, 7 30, 7 31, 7 32, 7 33, 7 40, 7 41, 7 43, 7 47, 8 13, 8 14, 8 21, 8 28, 8 31, 8 32, 8 35, 8 40, 8 42, 8 43, 8 44, 8 49, 9 11, 9 12, 9 13, 9 23, 9 26, 9 29, 9 31, 9 32, 9 35, 9 40, 9 41, 9 46, 9 49, 10 12, 10 16, 10 19, 10 21, 10 24, 10 26, 10 32, 10 33, 10 37, 10 43, 10 48, 10 49, 11 24, 11 29, 11 30, 11 33, 11 35, 11 36, 11 38, 11 40, 11 44, 11 48, 12 21, 12 27, 12 33, 12 34, 12 35, 12 39, 12 40, 12 43, 12 44, 12 45, 12 50, 13 21, 13 22, 13 24, 13 29, 13 30, 13 33, 13 36, 13 40, 13 41, 13 42, 13 49, 13 50, 14 26, 14 30, 14 41, 14 43, 14 46, 14 49, 14 50, 15 26, 15 27, 15 30, 15 33, 15 36, 15 37, 15 41, 15 47, 15 48, 15 49, 15 50, 16 22, 16 26, 16 31, 16 39, 16 41, 16 42, 16 44, 16 49, 17 24, 17 25, 17 29, 17 31, 17 39, 17 40, 17 42, 17 43, 17 46, 18 23, 18 29, 18 30, 18 31, 18 32, 18 33, 18 34, 18 40, 18 48,

18 49, 19 21, 19 22, 19 26, 19 27, 19 30, 19 32, 19 33, 19 34, 19 38, 19 42, 19 46, 20 27, 20 28, 20 30, 20 34, 20 41, 20 48, 20 50, 21 33, 21 34, 21 39, 21 45, 21 47, 21 49, 22 31, 22 34, 22 36, 22 40, 22 42, 22 43, 22 44, 22 47, 22 50, 23 31, 23 35, 23 36, 23 37, 23 38, 23 40, 23 44, 23 48, 23 50, 24 33, 24 34, 24 36, 24 38, 24 45, 25 33, 25 37, 25 39, 25 40, 25 41, 25 42, 25 43, 26 31, 26 34, 26 38, 26 43, 26 50, 27 33, 27 36, 27 39, 27 41, 27 44, 27 46, 27 48, 27 49, 27 50, 28 33, 28 37, 28 41, 28 43, 28 44, 28 45, 28 46, 28 47, 29 31, 29 32, 29 33, 29 35, 29 41, 29 43, 29 45, 29 48, 29 49, 30 32, 30 33, 30 37, 30 41, 30 44, 31 45, 31 48, 32 40, 32 45, 32 46, 32 48, 33 42, 33 46, 34 43, 34 46, 34 49, 36 41, 36 46, 36 47, 36 50, 37 42, 37 46, 37 50, 38 47, 39 46, 40 41, 40 43, 40 44]

- Conflict10.dat

Conflitti=[ 1 15, 1 16, 1 27, 1 29, 1 30, 1 37, 1 39, 1 43, 1 45, 1 46, 1 49, 1 50, 2 12, 2 14, 2 17, 2 18, 2 20, 2 23, 2 27, 2 30, 2 31, 2 35, 2 36, 2 40, 2 45, 2 47, 2 48, 3 11, 3 12, 3 20, 3 30, 3 31, 3 40, 3 46, 3 49, 4 11, 4 14, 4 19, 4 20, 4 27, 4 38, 4 39, 4 40, 5 14, 5 17, 5 20, 5 21, 5 34, 5 35, 5 37, 5 38, 5 42, 5 44, 5 45, 5 50, 6 11, 6 14, 6 20, 6 21, 6 28, 6 30, 6 33, 6 35, 6 36, 6 37, 6 48, 6 49, 7 15, 7 17, 7 18, 7 23, 7 24, 7 29, 7 30, 7 38, 7 39, 7 50, 8 12, 8 16, 8 17, 8 20, 8 23, 8 25, 8 37, 8 39, 8 44, 8 46, 8 50, 9 13, 9 14, 9 18, 9 25, 9 26, 9 30, 9 38, 9 44, 9 45, 9 46, 9 49, 10 17, 10 22, 10 27, 10 28, 10 30, 10 42, 10 44, 11 21, 11 23, 11 25, 11 26, 11 28, 11 29, 11 32, 11 34, 11 35, 11 40, 11 41, 11 42, 11 44, 11 48, 12 23, 12 26, 12 28, 12 36, 12 39, 12 41, 12 49, 12 50, 13 24, 13 26, 13 27, 13 29, 13 35, 13 37, 13 46, 13 48, 14 22, 14 23, 14 32, 14 35, 14 37, 14 38, 14 39, 14 40, 14 48, 14 49, 15 28, 15 29, 15 30, 15 32, 15 33, 15 35, 15 37, 15 49, 16 28, 16 29, 16 31, 16 32, 16 35, 16 37, 16 39, 16 40, 16 42, 17 21, 17 23, 17 25, 17 27, 17 29, 17 30, 17 34, 17 38, 17 46, 17 47, 18 21, 18 22, 18 26, 18 28, 18 31, 18 36, 18 40, 18 41, 18 45, 18 46, 18 49, 19 21, 19 25, 19 26, 19 28, 19 30, 19 33, 19 34, 19 36, 19 38, 19 43, 19 46, 19 47, 20 22, 20 25, 20 32, 20 33, 20 37, 20 41, 20 43, 20 45, 20 50, 21 33, 21 37, 21 39, 21 42, 21 45, 21 50, 22 34, 22 36, 22 37, 22 40, 22 47, 22 49, 23 31, 23 36, 23 37, 23 39, 23 43, 23 45, 23 47, 24 35, 24 43, 24 46, 24 49, 25 31, 25 32, 25 35, 25 40, 25 41, 25 42, 25 43, 25 44, 25 46, 25 47, 25 50, 26 31, 26 32, 26 40, 26 41, 26 46, 26 50, 27 33, 27 34, 27 36, 27 38, 27 40, 27 42, 27 47, 27 49, 27 50, 28 34, 28 38, 28 42, 28 43, 28 45, 29 31, 29 47, 30 31, 30 34, 30 37, 30 44, 30 45, 30 50, 32 43, 32 45, 32 49, 33 41, 33 49, 34 43, 34 46, 34 48, 35 43, 35 45, 35 46, 35 48, 35 49, 36 42, 36 43, 36 46, 36 48, 37 42, 37 50, 38 42, 38 43, 39 40, 39 44, 39 46, 39 48, 40 41, 40 43, 40 45, 40 48, 40 50]

## Bibliografia

- [1] Piano Sanitario Nazionale. (s.d.). Tratto da Ministero della salute: [http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2\\_6.jsp?lingua=italiano&id=1298&area=programmazioneSanitariaLea&menu=vuoto](http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=1298&area=programmazioneSanitariaLea&menu=vuoto)
- [2] N. Cartabellotta et al. “Terzo Rapporto GIMBE sulla sostenibilità del Servizio Sanitario Nazionale”. In: Fondazione GIMBE (2018). url: <http://www.rapportogimbe.it>.
- [3] Desio. (s.d.). Tratto da Impresa Sanità: [https://www.impresasanita.it/it/articles/20180727/desio\\_gestione\\_delle\\_sale\\_operatorie\\_in\\_real\\_time](https://www.impresasanita.it/it/articles/20180727/desio_gestione_delle_sale_operatorie_in_real_time)
- [4] T. Ono e N. Bodek. “Toyota production system : beyond large-scale production”. CRC Press (1988).
- [5] S. Barbagallo et al. “Optimization and planning of operating theatre activities: an original definition of pathways and process modeling”. BMC Medical Informatics and Decision Making 15.1 (2015), p. 38.
- [6] S.E. Mason, C.R. Nicolay e A. Darzi. “The use of Lean and Six Sigma methodologies in surgery: A systematic review”. The Surgeon 13.2 (2015), pp. 91–100
- [7] F. Dexter, S. Coffin e J. H. Tinker. “Decreases in Anesthesia-Controlled Time Cannot Permit One Additional Surgical Operation to Be Reliably Scheduled During the Workday”. Anesth Analg. (1996), pp. 1263–8.
- [8] J. A. Girotto, P. F. Koltz e G. Drugas. “Optimizing your operating room: Or, why large, traditional hospitals don’t work”. International Journal of Surgery 8.5 (2010), pp. 359–367.
- [9] D. H. Rothstein e M. V. Raval. “Operating room efficiency”. Seminars in Pediatric Surgery 27.2 (2018). The Perioperative Experience, pp. 79–85.
- [10] I. Ajmi et al. “Mapping patient flow in the Jeanne de Flandres Hospital’s operating rooms”. In: Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), Barcelona, Spain. (2014), pp. 1–5.
- [11] C. R. Nicolay et al. “Systematic review of the application of quality improvement methodologies from the manufacturing industry to surgical healthcare”. BJS 99.3 (2012), pp. 324–335.
- [12] R. M. Collar et al. “Lean Management in Academic Surgery”. Journal of the American College of Surgeons 214.6 (2012), pp. 928–936.
- [13] R. R. Cima et al. “Use of Lean and Six Sigma Methodology to Improve Operating Room Efficiency in a High-Volume Tertiary-Care Academic Medical Center”. Journal of the American College of Surgeons 213.1 (2011), pp. 83–92.
- [14] J. Dellifraigne, J. Langabeer e I. M. Nembhard. “Assessing the Evidence of Six Sigma and Lean in the Health Care Industry”. Qual Manag Health Care (lug. 2010), pp. 211–25.

- [15] J. R. Vest e L. D. Gamm. "A critical review of the research literature on Six Sigma, Lean and StuderGroup's Hardwiring Excellence in the United States: the need to demonstrate and communicate the effectiveness of transformation strategies in healthcare". *Implementation Science* 4.1 (2009), p. 35.
- [16] J. E. Stahl et al. "Reorganizing patient care and workflow in the operating room: a cost-effectiveness study". *Surgery* 139.6 (2006), pp. 717–728.
- [17] W. S. Sandberg M.D. et al. "Deliberate Perioperative Systems Design Improves Operating Room Throughput". *Anesthesiology* 103.2 (2005), pp. 406–418.
- [18] S. Warren, S. Seim e A. M. Makr. "Does Parallel Workflow Impact Anesthesia Quality?" *AMIA Annual Symposium Proceedings* 2005, Washington, DC (2005).
- [19] V. Agnoletti et al. "Operating room data management: improving efficiency and safety in a surgical block". *BMC Surg.* (2013).
- [20] F. Dexter, S. Coffin e J. H. Tinker. "Decreases in Anesthesia-Controlled Time Cannot Permit One Additional Surgical Operation to Be Reliably Scheduled During the Workday". *Anesth Analg.* 1996), pp. 1263–8.
- [21] C. W. Kimbrough et al. "Improved Operating Room Efficiency via Constraint Management: Experience of a Tertiary-Care Academic Medical Center". *Journal of the American College of Surgeons* 221.1(2015), pp. 154–162.
- [22] N. Slack. "The Blackwell Encyclopedic Dictionary of Operations Management". Blackwell (1997).
- [23] P. Patterson "What makes a well-oiled scheduling system?" *OR Manager* 12.9 (1996), pp. 19–23.
- [24] T. J. Sieber e D. L. Leibundgut. "Operating room management and strategies in Switzerland: results of a survey". *European Journal of Anaesthesiology* 19.6 (2002), pp. 415–423.
- [25] F. Guerriero e G. Rosita "Operational research in the management of the operating theatre: a survey". *Health Care Management Science* 14.1 (2011), pp. 89–114.
- [26] P. T. VanBerkel e J. T. Blake. "A comprehensive simulation for wait time reduction and capacity planning applied in general surgery". *Health Care Management Science* 10.4 (2007), pp. 373–385.
- [27] B. Cardoen, E. Demeulemeester e J. Beliën. "Operating room planning and scheduling: A literature review". *European Journal of Operational Research* 201.3 (2010), pp. 921–932.
- [28] S. N. Ogulata e R. Erol. "A Hierarchical Multiple Criteria Mathematical Programming Approach for Scheduling General Surgery Operations in Large Hospitals". *Journal of Medical Systems* 27.3 (2003), pp. 259–270.
- [29] I. Ozkarahan. "Allocation of Surgeries to Operating Rooms by Goal Programing". *Journal of Medical Systems* 24.6 (2000), pp. 339–378.
- [30] H. Fei et al. "Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach". *International Journal of Production Economics* 112.1 (2008), pp. 96–108.
- [31] B. Cardoen, E. Demeulemeester e J. Beliën. "Optimizing a multiple objective surgical case sequencing problem". *International Journal of Production Economics* 119.2 (2009), pp. 354–366..
- [32] G. Schmidt. "Scheduling with limited machine availability." In: *European Journal of Operational Research* 121.1 (2000) pp: 1-15.

- [33] P. Brucker, A. Drexl, R. Möhring, K. Neumann, e E. Pesch. "Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods." In: European Journal of Operational Research, 112(1), (1999) pp:3-41.
- [34] R. Tadei, F. Della Croce. "Elementi di ricerca operativa". Esculapio (2010)
- [35] F. Della Croce, A. Grosso, e F. Salassa. "Matheuristics: Embedding milp solvers into heuristic algorithms for combinatorial optimization problems. In Heuristics: Theory and applications", P. Siarry ed. Nova Science Publishers,(2013) pp. 31-52
- [36] F. Della Croce, M. Garraffa, F. Salassa, C. Borean, G. Di Bella, e E. Grasso. "Heuristic approaches for a domestic energy management system." In: Computers & Industrial Engineering (2017) 109, pp: 169-178.
- [37] F. Della Croce. "Mixed Integer Linear Programming Models for Combinatorial Optimization Problems. Concepts of Combinatorial Optimization. In: Concepts of Combinatorial Optimization, 2nd Edition", ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc, (2013)