

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Rafael Calegari

**OTIMIZAÇÃO EM BLOCOS CIRÚRGICOS PARA REDUÇÃO DA
VARIABILIDADE DA DEMANDA POR RECURSOS
HOSPITALARES**

Porto Alegre, abril de 2021

Rafael Calegari

**OTIMIZAÇÃO EM BLOCOS CIRÚRGICOS PARA REDUÇÃO DA
VARIABILIDADE DA DEMANDA POR RECURSOS HOSPITALARES**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientadores:

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D.
Profa. Beatriz D'Agord Schaan, Ph.D.

Porto Alegre, abril de 2021

Rafael Calegari

**OTIMIZAÇÃO EM BLOCOS CIRÚRGICOS PARA REDUÇÃO DA
VARIABILIDADE DA DEMANDA POR RECURSOS HOSPITALARES**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Ph.D

Orientador, PPGE/UFGRS

Profa. Beatriz D'Agord Schaan, Ph.D

Orientadora, HCPA/UFGRS

Prof. Alejandro G. Frank, Ph.D

Coordenador do PPG, PPGE/UFGRS

Banca Examinadora:

Prof. Filipe R. Lucini (University of Calgary/DCCM)

Prof. Giovanni J.C. da Silveira (University of Calgary /Haskayne Business School)

Prof. Guilherme L. Tortorella, Dr. (UFSC/DEPS)

*Dedico este trabalho à minha esposa Fernanda,
à minha filha Anita, aos meus irmãos Renato e
Eduardo e aos meus pais Maria e Adelino.*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta tese. Especialmente, agradeço:

- Ao meu orientador, professor Flávio S. Fogliatto, por toda a orientação, incentivo e ótima convivência durante os anos de mestrado e doutorado;
- À minha coorientadora, professora Beatriz D. Schaan, pelos conhecimentos compartilhados e por estar sempre disposta a contribuir com a pesquisa;
- A todos os professores do PPGEP, em especial aos professores Francisco Kliemann Neto, Michel Anzanello e Fernando Gonçalves Amaral, pelos conhecimentos compartilhados e pela ótima convivência;
- Aos funcionários do PPGEP pela disponibilidade em ajudar sempre que precisei;
- Aos colegas de PPGEP, em especial ao Filipe Lucine e João Brito, pela convivência e troca de experiências;
- Ao CNPq pelo apoio financeiro durante todo o período de doutorado.

CALEGARI, R. *Otimização em blocos cirúrgicos para redução da variabilidade da demanda por recursos hospitalares*, 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO

A presente tese apresenta proposições para o desenvolvimento e aplicação de ferramentas que auxiliem a gestão de blocos cirúrgicos (BCs) hospitalares, de modo a reduzir a variabilidade na demanda por recursos hospitalares. Os objetivos desta tese são: (i) avaliar os impactos causados pelo *Master Surgical Scheduling* (MSS) na ocupação dos leitos pós-cirúrgicos e propor um método aplicável para solucionar o *Master Surgical Scheduling Problem* (MSSP), alocando as especialidades cirúrgicas de forma a minimizar a variabilidade na demanda por leitos pós-cirúrgicos; (ii) desenvolver e aplicar uma ferramenta de sequenciamento de cirurgias que maximize a utilização dos recursos, observando as restrições reais de um BC; (iii) propor e comparar modelos de classificação de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao tempo de permanência (TP) no hospital, minimizando incertezas relacionadas à utilização de recursos. Os métodos propostos utilizam diferentes técnicas de mineração de dados estruturados e não estruturados, sendo validados por estudos de caso e um teste piloto. Em relação a solução do MSSP, o método proposto reduziu a variabilidade de ocupação dos leitos pós-cirúrgicos, sem realizar mudanças significativas na atual estrutura do BC. Na sequência, foi proposto e implementado um modelo de sequenciamento de cirurgias, que considera os recursos necessários para realização dos procedimentos. O modelo aumentou a ocupação das salas de cirurgias e o número de cirurgias realizadas, ao mesmo tempo que suavizou a chegada de pacientes nos leitos pós-cirúrgicos. Já o classificador de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP de pacientes demonstrou que dados armazenados em formato de texto nos registros cirúrgicos, contêm informações importantes sobre a evolução dos pacientes no hospital.

Palavras-chave: blocos cirúrgicos, agenda de cirurgias, sequenciamento de cirurgias, tempo de permanência, classificação de pacientes, mineração de texto.

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Chromosome encoding using data from the current timetable	29
2.2 - Network depicting a surgical center with 3 ORs working 3 shifts during 5 weekdays ..	32
2.3 - Variance in post-operative demand for bed hours as a function of NMS in the timetable	35
2.4 - Histogram of daily demand for post-operative bed hours in CT, T-I and T-II	38
3.1 - Flowchart with steps of the proposed heuristic	55
3.2 - Example of local sequencing	57
3.3 - Determination of BIIs for an ST with two ORs	59
3.4 - PACU bed occupancy	63
3.5 - Distribution of PACU arrivals in shift quartiles under AS and PS	63
4.1 - Etapas do modelo proposto.	81

LISTA DE TABELAS

2.1 - List of surgical specialties and associated relevant information	21
2.2 - Current surgical center's timetable	22
2.3 - Timetable I (T-I).....	34
2.4 - Timetable II (T-II).....	36
2.5 - Comparison between CT, T-I and T-II.....	37
3.1 - Five most frequently performed procedures at HCPA.....	53
3.2 - Average occupation, number of procedures and variance of BIIs	61
3.3 - Results of paired sample t-tests	62
3.4 - Results of the pilot test.....	64
4.1 - Variáveis estruturadas avaliadas nos níveis 1 e 2	83
4.2 - Métodos de aprendizado de máquina utilizados	88
4.3 - Melhores desempenhos de cada método nos níveis 1 e 2	90
4.1 - Random Forest aplicado nas quatro especialidades com mais registros.....	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	Actual Schedule
BC	Bloco Cirúrgico
BII	Break-in-interval
BIM	Break-in-moment
BS	Block Scheduling
CT	Current Timetable
DNN	Deep Neural Network
ES	Empirical Schedule
FT	Frequência de Termos
FT-ID	Frequência de Termos Inversa de Documentos
GA	Genetic Algorithms
GS	Global Sequencing
HCP	Hospital de Clínicas De Porto Alegre
HFS	Hybrid Flow Shop
LOS	Length of Stay
LS	Local Sequencing
MAM	Método de Aprendizado de Máquina
MSS	Master Surgical Scheduling
MSSP	Master Surgical Scheduling Problem
MT	Mineração de Texto
NMS	Number of Matched Slots
NUS	Number of Unmatched Slots
OR	Operating Room
PACU	Post Anesthesia Care Unit
PS	Proposed Schedule
RB	Representação Binária
RC	Registro Cirúrgico
RF	Random Forest
SC	Sala de Cirurgia
SCS	Surgical Case Sequencing
SCSP	Surgical Case Sequencing Problem
ST	Surgical Theater
SVM	Support Vector Machine
TP	Tempo de Permanência
TPC	Tempo de Permanência Curto
TPL	Tempo de Permanência Longo
VE	Variável Estruturada
VMT	Variável Mineração de Texto
XGBoost	Extreme Gradient Boost

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Tema e objetivos	4
1.3 Justificativa do tema e dos objetivos.....	4
1.4 Delineamento do estudo.....	6
1.4.1 Método de pesquisa	6
1.4.2 Método de trabalho.....	6
1.5 Limitações do estudo	7
1.6 Estrutura da tese	8
1.7 Referências.....	9
2. ARTIGO 1: ALLOCATING OR TIME SLOTS TO SPECIALTIES IN SURGICAL CENTERS AIMING AT DECREASING VARIABILITY IN POSTOPERATIVE WARD BED DEMAND.....	11
2.1 Introduction.....	13
2.2 Background	15
2.3 Problem description	20
2.4 Method	24
2.4.1 Step 1	24
2.4.2 Step 2.....	25
2.4.3 Step 3.....	30
2.5 Results.....	32
2.6 Discussion.....	38
2.7 Conclusion	40
2.8 References.....	41
3. ARTIGO 2: SURGERY SCHEDULING HEURISTIC CONSIDERING OR DOWNSTREAM AND UPSTREAM FACILITIES AND RESOURCES	46
3.1 Background.....	49
3.2 Methods.....	51
3.2.1 Database	52
3.2.2 Proposed heuristic	53
3.3 Results.....	60
3.3.1 Test	60
3.3.2 Pilot.....	63
3.4 Discussion	65
3.5 Conclusions.....	68
3.6 References.....	70

4. ARTIGO 3: UTILIZAÇÃO DE MINERAÇÃO DE TEXTO PARA CLASSIFICAÇÃO DE PACIENTES PÓS-CIRÚRGICOS QUANTO AO TEMPO DE PERMANÊNCIA NO HOSPITAL.....	73
4.1 Introdução	75
4.2 Métodos.....	77
4.2.1 Design, configuração e população.....	77
4.2.2 Critérios de inclusão e exclusão	78
4.2.3 Registros cirúrgicos	78
4.2.4 Definição dos níveis	79
4.2.5 Framework.....	80
4.2.6 Pré-processamento.....	81
4.2.7 Seleção e combinação das variáveis.....	85
4.2.8 Classificação dos pacientes	87
4.2.9 Avaliação de desempenho	89
4.3 Resultados	90
4.3.1 Classificação do nível 1	90
4.3.2 Classificação do nível 2.....	92
4.4 Discussão	92
4.5 Referências.....	96
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
5.1 Conclusões	100
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	101

1. Introdução

1.1 Considerações iniciais

Hospitais são estruturas complexas em que todos os processos e setores são fortemente interligados, sendo que o mau funcionamento de uma parte influencia negativamente toda a estrutura. O Bloco Cirúrgico (BC) desempenha um papel fundamental nesse sistema, pois demanda grande parte dos recursos do hospital e participa diretamente no fluxo dos pacientes (ZHU et al., 2018).

Vários impactos negativos podem resultar de uma má gestão do BC: grandes filas de pacientes aguardando procedimentos, atrasos ou cancelamentos de cirurgias, jornadas excessivas de trabalho, entre outros (KADDOUM et al., 2016). Para evitá-los, os gestores têm o desafio diário de sincronizar o uso de salas de cirurgia (SCs), equipes cirúrgicas, equipamentos cirúrgicos e leitos de recuperação. Além disso, devem considerar as diversas incertezas presentes nos processos que envolvem o BC, como o intervalo entre chegadas de pacientes na emergência e a duração das cirurgias. Todos esses fatores afetam a qualidade do atendimento prestado aos pacientes, assim como prejudicam o planejamento dos outros setores do hospital. Pelo fato do BC ser fundamental no fluxo dos pacientes, os gestores devem sempre avaliar o impacto gerado pelas tomadas de decisões nos demais setores do hospital (BELIËN; DEMEULEMEESTER, 2007). Nesse contexto, impactos gerados pelo BC na variabilidade da demanda por recursos hospitalares vêm sendo abordados na literatura da área (VAN DEN BROEK D'OBRENAN et al., 2020).

A variabilidade na demanda pelos recursos hospitalares impacta diretamente o funcionamento de um hospital. Essa variabilidade pode ser gerada de duas formas: (i) artificialmente; ou (ii) naturalmente (LITVAK; LONG, 2000). A variabilidade artificial origina-se de planejamentos inadequados. Por exemplo, em muitos hospitais o agendamento das cirurgias é realizado por solicitação dos cirurgiões, que possuem privilégios no agendamento (PENN; POTTS; HARPER, 2017). Essa prática implica que muitas cirurgias sejam agendadas para o mesmo dia, o que cria um pico artificial na demanda por recursos, como: SCs, equipamentos cirúrgicos, insumos e leitos pós-operatórios, entre outros. Estudos anteriores demonstraram que picos e vales artificiais podem ser suavizados utilizando algoritmos exatos ou heurísticos no planejamento de realização das cirurgias, levando a melhorias no uso de recursos e reduzindo desperdícios (GUIDO; CONFORTI, 2017; LIN;

CHOU, 2019; SAMUDRA et al. 2016; VAN DEN BROEK D'OBRENAN et al., 2020). Reduzir essa variabilidade deve ser um dos focos dos gestores dos blocos cirúrgicos (BELLIËN; DEMEULEMEESTER, 2007).

Já a variabilidade natural é inerente ao ambiente hospitalar e surge das diversas incertezas nos processos, tais como: intervalos entre a chegada de pacientes à procura por atendimento na emergência, duração das cirurgias e o tempo de permanência (TP) dos pacientes no hospital, entre outras. Em muitos casos essa variabilidade não pode ser evitada, mas minimizar as incertezas relacionadas a ela pode contribuir na gestão dos recursos disponíveis (VAN RIET; DEMEULEMEESTER, 2015). Por exemplo, identificar pacientes pós-cirúrgicos com alto risco de TP longo (TPL), pode auxiliar na gestão da disponibilidade de leitos. Além disso, possibilita que os médicos escolham os tratamentos mais efetivos para cada perfil de paciente, o que pode acarretar em uma redução no TP (ROWAN et al., 2007; TSAI et al., 2016). Com base nisso, classificar os pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP no hospital é fundamental para o planejamento e alocação dos recursos hospitalares, podendo auxiliar na suavização de picos na demanda por recursos (WALCZAK; POFAHL; SCORPIO, 2002).

A literatura apresenta diversas formas de planejar o funcionamento de um BC. Uma das mais utilizadas é a que divide o planejamento em três níveis: estratégico, tático e operacional (ZHU et al., 2018). O nível estratégico diz respeito a divisão da capacidade entre as especialidades no BC. Nesse nível é definido o tempo que cada especialidade cirúrgica terá na agenda para realização das cirurgias eletivas. Esse planejamento depende das demandas de cada especialidade e na maioria dos casos não pode ser alterado. Já o nível tático diz respeito ao desenvolvimento de um cronograma que define as salas e os turnos disponibilizados para cada especialidade cirúrgica. Esse cronograma é denominado *Master Surgical Scheduling* (MSS) e busca solucionar o problema conhecido como *Master Surgical Scheduling Problem* (MSSP). O MSS é dividido em intervalos de tempo que representam a disponibilidade das SCs nos dias da semana e turnos do dia. Ele é construído para horizontes semanais ou mensais, com base na disponibilidade de cirurgiões e padrões históricos de demanda. Nos últimos anos, diversos autores têm proposto modelos matemáticos para construção de MSSs que reduzam a variabilidade na utilização dos recursos do hospital (SAMUDRA et al., 2016; VAN RIET; DEMEULEMEESTER, 2015; ZHU et al., 2018). De uma forma geral, esses artigos buscam minimizar os custos envolvidos e suavizar a chegada de pacientes nos leitos pós-cirúrgicos. Pelo fato do MSSP se tornar facilmente um problema NP-hard, heurísticas e meta-heurísticas vêm sendo amplamente utilizadas nesses tipos de estudos (GUIDO; CONFORTI, 2017).

O plano operacional tenta solucionar um problema conhecido como *Surgical Case Sequencing Problem* (SCSP) e se refere ao sequenciamento das cirurgias nos turnos de trabalho das especialidades cirúrgicas indicadas na solução do MSSP (ZHU et al., 2018). Com o MSS proposto no nível tático, as especialidades cirúrgicas já estão distribuídas nos intervalos de tempos disponíveis no BC. A etapa seguinte consiste em identificar a melhor sequência de cirurgias dentro desses intervalos de tempo. Dessa forma, o nível operacional tem como objetivo principal sequenciar as cirurgias de forma a minimizar os custos envolvidos, os cancelamentos ou atrasos de cirurgias, o tempo de espera dos pacientes e equipes médicas, maximizar a ocupação das salas de cirurgia e suavizar as chegadas de pacientes nos leitos pós-cirúrgicos (SAMUDRA et al., 2016). Assim como no nível tático, o planejamento correto permite uma redução na variabilidade da demanda por recursos hospitalares, evitando picos de demanda.

Variabilidades artificiais e naturais na demanda por recursos, afetam negativamente o planejamento hospitalar (LITVAK; LONG, 2000). Sabe-se que um planejamento adequado da agenda de cirurgias pode suavizar os picos artificiais na demanda por recursos (GUIDO; CONFORTI, 2017; LIN; CHOU, 2019; SAMUDRA et al., 2016; VAN DEN BROEK D'OBRENAN et al., 2020). Da mesma forma, impactos negativos causados por picos naturais podem ser minimizados através da redução das incertezas nos processos. Embora a literatura reporte vasto repertório de estudos que propõem ferramentas para redução dessas variabilidades, ainda existem lacunas a serem preenchidas. Em relação a variabilidades artificiais, o planejamento agregado do BC, observando simultaneamente os recursos necessários para realização das cirurgias e os impactos gerados nas outras áreas do hospital, ainda é uma lacuna a ser preenchida (LATORRE-NÚÑEZ et al., 2016; VAN RIET; DEMEULEMEESTER, 2015). Além disso, propor modelos realmente aplicáveis em situações reais, que não afetem drasticamente a atual estrutura do hospital, pode contribuir fortemente não só para a literatura da área, mas também nas tomadas de decisões diárias dos gestores dos BCs (FÜGENER et al., 2014).

Já em relação a redução da variabilidade natural, métodos que minimizem as incertezas relacionadas ao TP de pacientes pós-cirúrgicos ainda devem ser explorados (CHUANG; HU; LO, 2018). Classificar os pacientes quanto ao TP pode auxiliar no planejamento de distribuição de recursos, direcionando-os a pacientes que mais precisem (WALCZAK; POFAHL; SCORPIO, 2002). Desta forma, esta tese propõe ferramentas de otimização que auxiliam os gestores dos BCs nas tomadas de decisão. São propostos métodos de alocação de especialidades

e cirurgias que minimizam a variância na demanda por recursos hospitalares. As ferramentas propostas observam a atual estrutura do hospital e consideram restrições reais para propor ferramentas aplicáveis na prática. São abordados os níveis táticos e operacionais de planejamento, além de incertezas relacionadas ao TP de pacientes pós-cirúrgicos.

1.2 Tema e objetivos

O tema desta de tese é o planejamento de recursos de um BC hospitalar, propondo ferramentas para reduzir a variabilidade na demanda por recursos hospitalares.

Como objetivos específicos lista-se:

- (i) Avaliar os impactos causados pelo MSS na ocupação dos leitos pós-cirúrgicos e propor um método aplicável para solucionar o MSSP, alocando as especialidades cirúrgicas de forma a minimizar a variabilidade na demanda por leitos pós-cirúrgicos;
- (ii) Desenvolver e aplicar uma ferramenta de sequenciamento de cirurgias que maximize a utilização dos recursos, observando as restrições reais de um BC;
- (iii) Propor e comparar modelos de classificação de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP no hospital, minimizando incertezas relacionadas a utilização de recursos.

1.3 Justificativa do tema e dos objetivos

Hospitais são organizações complexas, cuja função é proporcionar à população atenção médica completa, tanto preventiva quanto curativa, além de servir como centro de preparação e treinamento para profissionais em saúde. O BC está inserido nesse cenário como o principal responsável por fazer todos os setores do hospital funcionarem de forma sincronizada (BELIËN; DEMEULEMEESTER, 2007). Pelo fato da maioria dos pacientes internados no hospital serem submetidos a algum procedimento cirúrgico, o BC facilmente se torna o gargalo do fluxo desses pacientes (LIN; CHOU, 2019). Além disso, ele demanda grande parte dos recursos financeiros do hospital (LIN; CHOU, 2019). Melhorias no planejamento do BC podem trazer benefícios para o funcionamento do hospital e, conseqüentemente, para o atendimento aos pacientes.

Planejar o MSS é um desafio diário para os gestores. Em função das filas de pacientes esperando para realizar cirurgias, os gestores focam na maximização da utilização das SCs.

Porém, o MSS tem impacto em diversas áreas do hospital, o que exige uma visão mais ampla dos processos. Isso inclui avaliar os impactos causados pelo MSS na ocupação dos leitos pós-cirúrgicos e identificar formas de maximizar essa ocupação. Na maioria dos casos esse impacto não é observado (VAN DEN BROEK D'OBRENAN et al., 2020). Além disso, os modelos matemáticos propostos na literatura são muito complexos, muitas vezes não ponderando a aplicabilidade real desses modelos (FÜGENER et al., 2014). Neste sentido, o objetivo específico proposto em (i) é avaliar os impactos causados pelo MSS na ocupação dos leitos pós-cirúrgicos e propor um método aplicável para solucionar o MSSP, alocando as especialidades cirúrgicas de forma a minimizar a variabilidade na demanda por leitos pós-cirúrgicos.

Além de observar as etapas pós-cirúrgicas no planejamento dos BCs, os gestores devem considerar a disponibilidade de recursos para a realização das cirurgias. Sequenciar adequadamente os procedimentos, que faz parte do nível operacional, possibilita maximizar a utilização dos recursos disponíveis. Raramente os estudos que propõem modelos de sequenciamento de cirurgias consideram todos os recursos necessários para a realização das cirurgias (LATORRE-NÚÑEZ et al., 2016). Além disso, assim como nos métodos de solução do MSSP, utilizam modelos complexos e de difícil aplicação em situações reais. Considerando isso, com o objetivo proposto em (ii) pretende-se desenvolver e aplicar uma ferramenta de sequenciamento de cirurgias que maximize a utilização dos recursos, observando as restrições reais de um BC.

Outro fator importante no planejamento de um BC é como minimizar as incertezas inerentes aos processos. Dentre elas, se destaca a incerteza quanto ao TP dos pacientes no hospital após a realização das cirurgias (NEYSHABOURI; BERG, 2017; VAN DEN BROEK D'OBRENAN et al., 2020). Isso afeta diretamente o BC, pois restringe o fluxo dos pacientes que saem das cirurgias para os leitos de internação. Classificar os pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP possibilita redistribuir os recursos, considerando o TP esperado para um determinado paciente. Por essa razão, o objetivo (iii) consiste em propor e comparar modelos de classificação de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP no hospital, minimizando incertezas relacionadas a utilização de recursos do BC.

1.4 Delineamento do estudo

Esta seção apresenta o enquadramento da pesquisa do ponto de vista metodológico e os métodos utilizados para alcançar os objetivos propostos. Na sequência é apresentada uma breve descrição das contribuições de cada artigo na construção desta tese.

1.4.1 Método de pesquisa

Os procedimentos metodológicos da presente tese são classificados sob o ponto de vista de sua natureza, abordagem do problema, objetivos e procedimentos (SILVA; MENEZES, 2001). A pesquisa é de natureza aplicada, tendo em vista que é direcionada para uma aplicação prática que busca solucionar um problema específico. A abordagem do problema é quantitativa, pois faz uso de análises numéricas com ênfase no uso de métodos matemáticos e estatísticos. Quanto aos objetivos, essa pesquisa é classificada como pesquisa exploratória, visto que permite conhecer e ter uma visão geral dos problemas, possibilitando a construção de ferramentas para solucioná-los.

1.4.2 Método de trabalho

Esta tese é composta por três etapas interligadas, cada uma correspondendo a um artigo. Os artigos seguem uma sequência que considera o nível de planejamento das ferramentas propostas. O primeiro artigo aborda um nível mais amplo de planejamento, considerando o BC como um todo, o segundo artigo aborda um nível mais específico, focando nas SCs, e o terceiro artigo foca na realização dos procedimentos. Todas as etapas foram desenvolvidas utilizando dados do Hospital de Clínicas de Porto Alegre (HCPA), que é um hospital escola localizado na região sul do Brasil, integrante da rede de hospitais universitários do Ministério da Educação e vinculado academicamente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente possui 843 leitos e aproximadamente 32.000 admissões/ano. Recebe pacientes da cidade de Porto Alegre e da região metropolitana, totalizando uma população de aproximadamente 4 milhões.

O primeiro artigo aborda o nível tático do planejamento de BCs, sendo proposto um método para solução do MSSP. O método aloca as especialidades cirúrgicas nos intervalos de tempo do MSS, de forma a minimizar a variância na demanda por leitos pós-cirúrgicos, potencialmente levando a menos cancelamentos e interrupções no fluxo dos pacientes. O

método também considera o MSS atualmente em uso no BC, de modo que o MSS resultante minimize o número de mudanças necessárias. Um estudo de caso foi realizado no HCPA, ilustrando como o método pode ser utilizado para auxiliar na construção de melhores MSSs, além de otimizar o uso de leitos hospitalares.

O segundo artigo foca no nível operacional de planejamento de BCs. Nele é proposto uma heurística para alocação de cirurgias, que considera a disponibilidade de SCs, materiais necessários para a realização do procedimento e leitos pós-cirúrgicos. A heurística é baseada no conceito de *Break-in-Moments* (BIMs), que são os momentos de tempo em que as cirurgias são concluídas (VAN ESSEN et al., 2012), para maximizar o número de cirurgias realizadas e minimizar a variância dos intervalos entre as conclusões das cirurgias. A validação da heurística proposta é realizada em duas etapas: (i) comparação da sequência de cirurgias resultantes da heurística com o sequenciamento atualmente utilizado no HCPA; e (ii) realização de um teste piloto de 10 dias, em que os aspectos relevantes da implementação real da heurística são discutidos.

O terceiro artigo utiliza informações estruturadas e não estruturadas dos registros cirúrgicos (RCs) do HCPA para classificar os pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP. Propõe-se um modelo de classificação hierárquico de dois níveis, que identifica os pacientes com TPL no primeiro nível e estratifica esses pacientes em duas categorias no segundo nível. São avaliados quatro métodos de aprendizado de máquinas (MAMs), com diversos parâmetros e dois métodos de seleção de variáveis. Para mensurar o possível benefício da inclusão dos RCs não estruturados na previsão, os modelos são avaliados com e sem a utilização de mineração de texto (MT). Foram utilizados RCs de 13 especialidades cirúrgicas.

1.5 Delimitações do estudo

O estudo busca desenvolver ferramentas para auxiliar a gestão do BC do HCPA. As ferramentas propostas são direcionadas aos níveis tático e operacional de planejamento, não considerando o nível estratégico. O nível estratégico de planejamento do BC do HCPA já é consolidado em função da demanda por especialidades, o que dificulta qualquer tipo de alteração no atual cenário. Por essa razão, optou-se por não abordar este nível de planejamento na tese. Além disso, pela indisponibilidade do acesso às informações, os recursos financeiros envolvidos no planejamento do BC não foram considerados.

Pelo fato do estudo ter utilizado dados de somente um hospital, alguns tópicos relacionados à replicabilidade das ferramentas propostas precisam ser observados. Os BCs podem atender cirurgias de emergência de duas formas: em salas dedicadas ou em salas compartilhadas com as cirurgias eletivas. A forma com que as cirurgias de emergência são atendidas altera significativamente o planejamento do BC. As ferramentas desenvolvidas neste estudo foram direcionadas ao BC do HCPA, que possui salas dedicadas ao atendimento de cirurgias de emergência. Dessa forma, a replicação do estudo em hospitais com BCs com salas compartilhadas, precisaria de adaptações significativas nas ferramentas, principalmente no sequenciador desenvolvido no Artigo 2. Outro aspecto que deve ser observado é que os dados não estruturados utilizado no estudo estão em língua portuguesa, o que também limita a replicação direta das ferramentas.

1.6 Estrutura da tese

Esta tese está organizada em cinco capítulos. O primeiro introduz o trabalho, apresentando o tema, objetivos e justificativas, método de pesquisa adotado, delimitação e estrutura da tese. Os capítulos 2, 3 e 4 apresentam os artigos 1, 2 e 3, que compõem a tese, respectivamente. O quinto e último capítulo traz as considerações finais, no qual são avaliados os principais resultados obtidos.

1.7 Referências

- BELIËN, J.; DEMEULEMEESTER, E. Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 2, p. 1185–1204, 2007.
- CHUANG, M. TE; HU, Y. H.; LO, C. L. Predicting the prolonged length of stay of general surgery patients: a supervised learning approach. **International Transactions in Operational Research**, v. 25, n. 1, p. 75–90, 2018.
- FÜGENER, A.; HANS, E. W.; KOLISCH, R.; KORTBEEK, N.; VANBERKEL, P. T. Master surgery scheduling with consideration of multiple downstream units. **European journal of operational research**, v. 239, n. 1, p. 227-236, 2014.
- GUIDO, R.; CONFORTI, D. A hybrid genetic approach for solving an integrated multi-objective operating room planning and scheduling problem. **Computers and Operations Research**, v. 87, p. 270–282, 2017.
- KADDOUM, R.; FADLALLAH, R.; HITTI, E.; FADI, E. J.; EL EID, G. Causes of cancellations on the day of surgery at a Tertiary Teaching Hospital. **BMC Health Services Research**, v. 16, n. 259, p. 1–8, 2016.
- LATORRE-NÚÑEZ, G.; LÜER-VILLAGRA, A.; MARIANOV, V.; OBREQUE, C.; RAMIS, F.; NERIZ, L. Scheduling operating rooms with consideration of all resources, post anesthesia beds and emergency surgeries. **Computers and Industrial Engineering**, v. 97, p. 248–257, 2016.
- LIN, Y. K.; CHOU, Y. Y. A hybrid genetic algorithm for operating room scheduling. **Health care management science**, p. 1-15, 2019.
- LITVAK, E.; LONG, M. C. Cost and quality under managed care: Irreconcilable differences? **American Journal of Managed Care**, v. 6, n. 3, p. 305–312, 2000.
- NEYSHABOURI, S.; BERG, B. P. Two-stage robust optimization approach to elective surgery and downstream capacity planning. **European Journal of Operational Research**, v. 260, p. 21–40, 2017.
- PENN, M. L.; POTTS, C. N.; HARPER, P. R. Multiple criteria mixed-integer programming for incorporating multiple factors into the development of master operating theatre timetables. **European Journal of Operational Research**, v. 262, n. 1, p. 194-206, 2017.
- ROWAN, M.; RYAN, T.; HEGARTY, F.; O’HARE, N. The use of artificial neural networks to stratify the length of stay of cardiac patients based on preoperative and initial postoperative factors. **Artificial Intelligence in Medicine**, v. 40, n. 3, p. 211–221, 2007.
- SAMUDRA, M.; VAN RIET, C.; DEMEULEMEESTER, E.; CARDOEN, B.; VANSTEENKISTE, N.; RADEMAKERS, F. E. Scheduling operating rooms: achievements, challenges and pitfalls. **Journal of Scheduling**, v. 19, n. 5, p. 493–525, 2016.
- SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3. ed., 2001.

TSAI, P. F. J.; CHEN, P. C.; CHEN, Y. Y.; SONG, H. Y.; LIN, H. M.; LIN, F. M.; HUANG, Q. P. Length of Hospital Stay Prediction at the Admission Stage for Cardiology Patients Using Artificial Neural Network. **Journal of Healthcare Engineering**, v. 2016, 2016.

VAN DEN BROEK D'OBRENAN, A.; RIDDER, A.; ROUBOS, D.; STOUGIE, L. Minimizing bed occupancy variance by scheduling patients under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 286, n. 1, p. 336-349, 2020.

VAN ESSEN, J. T.; HANS, E. W.; HURINK, J. L.; OVERSBERG, A. Minimizing the waiting time for emergency surgery. **Operations Research for Health Care**, v. 1, n. 2-3, p. 34-44, 2012.

VAN RIET, C.; DEMEULEMEESTER, E. Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies: A review. **Operations Research for Health Care**, v. 7, p. 52-69, 2015.

WALCZAK, S.; POFAHL, W. E.; SCORPIO, R. J. A decision support tool for allocating hospital bed resources and determining required acuity of care. **Decision Support Systems**, v. 34, n. 4, p. 445-456, 2002

ZHU, S.; FAN, W.; YANG, S.; PEI, J.; PARDALOS, P. M. Operating room planning and surgical case scheduling: a review of literature. **Journal of Combinatorial Optimization**, v. 37, p. 757-805, 2018.

- 2. Artigo 1:** Allocating OR time slots to specialties in surgical centers aiming at decreasing variability in postoperative ward bed demand

Submetido ao periódico Expert Systems with Applications

3. **Artigo 2:** Surgery scheduling heuristic considering OR downstream and upstream facilities and resources

Publicado no periódico BMC Health Services Research

4. **Artigo 3:** Utilização de mineração de texto para classificação de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao tempo de permanência no hospital

A ser submetido ao periódico PlosOne

5. Considerações Finais

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões da pesquisa realizada nesta tese, além das sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A presente tese teve como objetivo propor ferramentas para reduzir a variabilidade na demanda por recursos hospitalares, de modo a contribuir para a gestão de operações nas áreas médicas. O objetivo geral foi atingido em decorrência do encaminhamento de três objetivos específicos.

O primeiro objetivo específico (i) declarado, **avaliar os impactos causados pelo MSS na ocupação dos leitos pós-cirúrgicos e propor um método aplicável para solucionar o MSSP, alocando as especialidades cirúrgicas de forma a minimizar a variabilidade na demanda por leitos pós-cirúrgicos**, foi encaminhado através do primeiro artigo. O Artigo 1 apresentou um método para solução do MSSP. O método alocou as especialidades cirúrgicas nos intervalos de tempo do MSS, de forma a minimizar a variância na demanda por leitos pós-cirúrgicos. O modelo considerou o MSS atualmente em uso no BC do HCPA, minimizando o número de mudanças necessárias no MSS atualmente utilizado. O método proposto reduziu em 99,9% a variabilidade da demanda por leitos pós-cirúrgicos, mantendo 97% das especialidades em suas posições originais. Esse foi o primeiro estudo a propor um método para criação do MSS que minimiza a variabilidade da demanda, ao mesmo tempo que observa o atual cenário do hospital, aumentando a aplicabilidade do modelo em situações reais.

O segundo objetivo específico (ii) declarado, **desenvolver e aplicar uma ferramenta de sequenciamento de cirurgias que maximize a utilização dos recursos, observando as restrições reais de um BC**, foi encaminhado através do segundo artigo. No Artigo 2, foi proposta uma heurística de alocação de cirurgias em SCs, considerando as disponibilidades das SCs, materiais necessários para a realização do procedimento e leitos pós-cirúrgicos. A heurística é baseada no conceito de *Break-in-Moments* (BIMs) para maximizar o número de cirurgias realizadas e minimizar a variância dos intervalos entre as conclusões. A heurística foi validada no HCPA de duas formas: primeira, aplicando-a a dados históricos de cinco dias, comparando o desempenho das sequências propostas com as efetivamente realizadas; segunda, através de um teste piloto de dez dias. Os resultados mostraram um aumento médio de 37,2%

na ocupação das SCs, permitindo um aumento médio de 4,5 no número de cirurgias realizadas diariamente e reduzindo a variância dos intervalos entre as conclusões das cirurgias em 55,5%.

O terceiro objetivo específico (iii) declarado, **propor e comparar modelos de classificação de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP no hospital, minimizando incertezas relacionadas a utilização de recursos**, foi encaminhado através do terceiro artigo. O artigo 3 propõe um modelo de classificação de pacientes, que utiliza técnicas de mineração de dados estruturados e não estruturados para classificar pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP no hospital. A classificação é realizada por um modelo hierárquico de dois níveis, que classifica os pacientes em três categorias: $TP < 10$ dias; $10 \leq TP \leq 15$ dias; $TP > 15$ dias. São avaliados quatro métodos de aprendizado de máquinas (MAMs), utilizando os RCs de 9.215 pacientes submetidos a cirurgias de 13 especialidades em um hospital de grande porte. O modelo com melhor desempenho foi o Random Forest (RF) com F1-score médios de 96,64% no primeiro nível e 75,97% no segundo nível. A utilização dos dados não estruturados oriundos de RCs aumentou o F1-score médio em 25,36% no primeiro nível e 7,02% no segundo nível.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidas como extensões dos desenvolvimentos aqui propostos. No Artigo 1 foi proposto um modelo de construção do *timetable* de um bloco cirúrgico, composto por uma heurística para alocação primária e outra de refinamento. Existem algumas possíveis extensões deste trabalho, como a inclusão de outros tipos de restrições à formulação do problema. A inclusão de restrições que contextualizem o bloco cirúrgico estudado, pode aumentar a aplicabilidade dos modelos propostos. Nosso modelo considerou que as especialidades cirúrgicas alocadas na sala de cirurgia 2 não poderiam ser alteradas, mas outras restrições poderiam ser incluídas em estudos futuros, como: dias da semana, turnos ou especialidades que não poderiam ser alteradas no *timetable*. Outra restrição que poderia ser utilizada seria o número de possíveis destinos para cada especialidade. Nós consideramos que as especialidades poderiam ser realocadas em qualquer slot do *timetable*, mas é possível realizar uma avaliação das preferências das equipes restringindo o número de possíveis destinos. Isso aumentaria significativamente o potencial de aceitação do novo *timetable*, pois as equipes cirúrgicas participariam das alterações realizadas.

No Artigo 2 foi proposto um modelo de sequenciamento de cirurgias, que aumenta a ocupação das salas ao mesmo tempo que minimiza possíveis picos na demanda por leitos pós-cirúrgicos. Foi proposta uma heurística que reduz a complexidade matemática do problema, possibilitando realizar o sequenciamento das cirurgias através da enumeração completa das possíveis soluções. Caso o bloco cirúrgicos fosse composto por um número maior de salas de cirurgia, não seria possível realizar o sequenciamento desta forma, pois o problema se tornaria NP-hard. Dessa forma, sugere-se a utilização da heurística proposta em blocos cirúrgicos com maior número de salas de cirurgia, substituindo a enumeração completa por meta-heurísticas, como: Algoritmos Genéticos, Colônia de Formigas, *Simulated Annealing*, entre outras.

Já no Artigo 3 foi proposto um modelo de classificação de pacientes pós-cirúrgicos quanto ao TP no hospital, que utiliza dados estruturados e não estruturados dos RCs. O artigo demonstrou que os dados não estruturados dos RCs podem trazer informações importantes sobre a evolução dos pacientes pós cirúrgicos e isso ainda não foi profundamente estudado. Dessa forma, estudos envolvendo mineração de texto em blocos cirúrgicos, ainda podem ser mais explorados. Por essa razão, sugere-se que estudos abordem outros tipos de classificação de pacientes pós-cirúrgicos sejam realizados utilizando estes dados. O modelo de classificação proposto no Artigo 3 pode ser adaptado para identificar pacientes com maiores riscos de óbito, de necessitarem de ventilação mecânica, de permanecerem um tempo elevado em unidades de tratamento intensivo, de contraírem infecções, entre outros.