

VIRGÍNIA GIANI CASAGRANDE

**Modelos de Otimização para o
Sequenciamento de Cirurgias no Médio
Prazo**

Belo Horizonte
28 de maio de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Modelos de Otimização para o Sequenciamento de Cirurgias no Médio Prazo

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza

VIRGÍNIA GIANI CASAGRANDE

Belo Horizonte
28 de maio de 2015

C334m

Casagrande, Virgínia Giani.
Modelos de otimização para o sequenciamento de cirurgias no médio
prazo [manuscrito] / Virgínia Giani Casagrande. - 2015.
75 f., enc.: il.

Orientador: Maurício Cardoso de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 71-75.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Cirurgia - modelos matemáticos
- Teses. I. Souza, Maurício Cardoso de . II. Universidade Federal de Minas
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 658.5(043)



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA VIRGINIA GIANI CASAGRANDE

Realizou-se, no dia 28 de maio de 2015, às 14:00 horas, Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 285ª defesa de dissertação, intitulada *Modelos de Otimização para o Sequenciamento de Cirurgias no Médio Prazo*, apresentada por VIRGINIA GIANI CASAGRANDE, número de registro 2013661767, graduada no curso de ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Mauricio Cardoso de Souza - Orientador (UFMG), Prof(a). Carlos Roberto Venancio de Carvalho (UFMG), Prof(a). Alexandre Xavier Martins (UFOP), Prof(a). Thiago Augusto de Oliveira Silva (UFOP).


A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 28 de maio de 2015.


Prof(a). Mauricio Cardoso de Souza (Doutor)


Prof(a). Carlos Roberto Venancio de Carvalho (Doutor)


Prof(a). Alexandre Xavier Martins (Doutor)


Prof(a). Thiago Augusto de Oliveira Silva (Doutor)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Modelos de Otimização para o Sequenciamento de Cirurgias no Médio
Prazo

VIRGÍNIA GIANI CASAGRANDE

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

Ph. D. Maurício Cardoso de Souza - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Ph. D. Alexandre Xavier Martins
Universidade Federal de Ouro Preto

Ph. D. Carlos Venâncio de Carvalho
Universidade Federal de Minas Gerais

Ph. D. Thiago Augusto de Oliveira Silva
Universidade Federal de Ouro Preto

Belo Horizonte, 28 de maio de 2015

Este trabalho é dedicado aos meus pais,
à minha irmã
e aos meus amigos que me apoiaram ao longo desta jornada.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me guiar ao longo desta caminhada.

Expresso meus agradecimentos ao professor Maurício de Souza pela oportunidade de aprendizado e pelas orientações. Ao professor Thiago Silva pelos ensinamentos ao longo do desenvolvimento deste projeto. Agradeço também ao professor Carlos Venâncio que sempre se mostrou disposto a me ajudar ao longo da minha trajetória acadêmica.

À minha mãe pelo apoio incondicional e ao meu pai pelo exemplo.

Aos meus colegas e amigos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais pelas diversas discussões sobre otimização.

Finalmente, à UFMG pelo ensino público de qualidade que viabilizou o desenvolvimento deste estudo.

Resumo

O problema de sequenciamento de cirurgias pode ser observado na área da saúde, onde a gestão de blocos cirúrgicos em um hospital envolve a utilização de recursos físicos, humanos e informacionais para o tratamento de pacientes de acordo com diferentes tipos de especialidades. Neste contexto, o processo de definição dos mapas cirúrgicos deve garantir a realização de procedimentos cirúrgicos conforme as especificações médicas, a janela de tempo de realização das cirurgias e o atendimento da demanda deste setor em hospitais. Este trabalho aborda o sequenciamento de cirurgias por meio de modelos matemáticos de programação inteira e da aplicação de métodos heurísticos com estes modelos. A modelagem do problema é realizada para o horizonte de tempo de médio prazo e tem como objetivo otimizar um critério de avaliação de desempenho, que pode ser a maximização da ocupação das salas de operação ou a minimização do atraso na realização das cirurgias, considerando a concorrência pelos recursos disponíveis no bloco cirúrgico de um hospital. Trata-se de um problema NP-difícil para o qual encontrar uma solução viável pode ser considerado NP-completo. A partir do modelo de programação inteira, são desenvolvidas as heurísticas em dois níveis. No primeiro nível, é feita uma pré-alocação de cirurgias aos dias do horizonte de tempo. No segundo nível, cada dia é resolvido como um subproblema independente para definição do sequenciamento. São apresentados experimentos computacionais em instâncias baseadas em caso real com o objetivo de realizar uma comparação entre a formulação matemática e as abordagens heurísticas. Cada abordagem executa o modelo relaxado com uma das funções objetivo, aproveitando assim informações extraídas da relaxação linear para gerar os resultados. Dentre as quatro abordagens propostas, as duas primeiras se destacam por apresentarem resultados promissores e oportunidades para a realização de trabalhos futuros.

Palavras-chave: Sequenciamento de Cirurgias, Métodos Heurísticos, Horizonte de tempo de médio prazo.

Abstract

The surgery schedule problem can be seen in the health area, in which the operating theatre management for the patients treatment in a hospital varies according to different specialties and involves physical, human and informational resources. In this context, the surgery schedule process must ensure the surgical realization procedures according to medical constraints, the time window of each surgery and the available demand in a hospital. This work addresses the surgery scheduling through integer programming mathematical models and the respective heuristic application methods with these models. The problem modeling is carried out for the medium-term time horizon and aims to optimize a performance evaluation criteria, maximizing occupancy or minimizing tardiness, considering the resources competition in a hospital operating theatre. The problem evaluated in this study is called NP-hard, whereas finding a valid solution can be considered as NP-complete. Heuristics based on the integer programming model are developed on two levels. On the first level, a pre-allocation of surgery is assigned to the days of the planning horizon. On the second level each day is settled as an independent sub-problem. Computational experiments are presented in a real case based instances to evaluate the modelling attempts and to compare the mathematical model with the heuristics approaches. Each approach executes the relaxed model for one of the objective functions, carrying on the data from linear relaxation to get the results. Among the four proposed approaches, the first two ones stand out by showing promising results and several opportunities for conducting future work.

Keywords: Surgery Schedule, Heuristic Methods, Medium-term time horizon.

Sumário

	Sumário	8
	Lista de ilustrações	10
	Lista de tabelas	11
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Objetivos Gerais	16
1.3	Objetivos Específicos	16
1.4	Metodologia	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	Sequenciamento de Cirurgias	19
2.2	Métodos Exatos	29
2.3	Heurísticas e Metaheurísticas	32
3	MODELAGEM MATEMÁTICA	36
3.1	Modelo para médio prazo	36
3.2	Notação	39
3.3	Restrições	40
3.4	Funções Objetivo	41
3.5	Experimentos Computacionais	44
4	ABORDAGENS HEURÍSTICAS	47
4.1	Procedimento de aplicação das abordagens heurísticas	47
4.2	Formulação H_x	51
4.3	Restrições	51
4.4	Abordagem $d_{yw}(d, x^d)$	53
4.5	Notação	53
4.6	Restrições para o dia $d \in D$	54
4.7	Abordagem $d_{zw}(d, y)$	55

4.8	Notação	56
4.9	Restrições	57
4.10	Função Objetivo	58
4.11	Abordagem $dl_{zw}(d, x^d, y^d)$	58
4.12	Notação	58
4.13	Restrições	59
4.14	Função Objetivo	60
4.15	Abordagem $dlc_{zw}(d, x^d, y^d)$	60
4.16	Notação	61
4.17	Restrições	61
4.18	Função Objetivo	61
4.19	Experimentos computacionais para a maximização da ocupação	62
4.20	Experimentos computacionais para minimizar o atraso ponderado	65
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	71

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de resposta do modelo para uma instância real.	38
Figura 2 – Níveis da análise para resolução do problema na aplicação da heurística.	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados maximizando utilização.	44
Tabela 2 – Resultados minimizando atraso ponderado.	45
Tabela 3 – Resultados maximizando a ocupação formulação dyw. . .	63
Tabela 4 – Resultados maximizando a ocupação formulação dzw. . .	64
Tabela 5 – Resultados maximizando a ocupação formulação dlzw. . .	64
Tabela 6 – Resultados maximizando a ocupação formulação dlczw. . .	65
Tabela 7 – Resultados minimizando atraso formulação dyw.	66
Tabela 8 – Resultados minimizando atraso formulação dzw.	67
Tabela 9 – Resultados minimizando o atraso formulação dlzw.	67
Tabela 10 – Resultados minimizando o atraso formulação dlczw. . .	68

1 Introdução

1.1 Contextualização

O planejamento consiste em um dos processos mais desafiadores para a gestão de empresas. Ele implica em uma tomada de decisão antecipada sobre um determinado estado futuro desejado representado por objetivos a serem atingidos. O direcionamento adequado de recursos viabiliza a execução das ações apropriadas e alinhadas à estratégia competitiva da organização.

Este processo deve ser encontrado em todas as organizações, independente do porte e origem de capital. Um hospital é uma empresa de prestação de serviços de finalidade social, dotada de grande complexidade operacional, uma vez que é caracterizado por uma diversidade de serviços prestados por meio de maternidades, centros de diagnósticos e clínicas especializadas. É indiscutível a relevância dos serviços de saúde e a necessidade em se oferecer serviços de qualidade garantindo o nível de satisfação dos pacientes. A aplicação do planejamento aos sistemas de saúde garante o tratamento adequado para gestão das atividades que compõe este contexto.

O aspecto gerencial de serviços nos hospitais está se tornando cada vez mais importante. A qualidade da prestação do atendimento deve ser entendida como uma necessidade intrínseca a este processo de forma a garantir elevado grau de satisfação dos pacientes. Aliado a isso, existe a necessidade em reduzir os custos por meio da gestão eficiente de recursos. Uma unidade que representa uma significativa parcela dos custos e das receitas hospitalares é o bloco hospitalar e ele tem um grande impacto no desempenho de um hospital como um todo, ver, por exemplo, Cardoen, Demeulemeester e Beliën (2010).

Entretanto, a gestão do bloco hospitalar é um desafio aos *stakeholders* devido ao conflito de prioridades e preferências entre eles diante da escassez de recursos e da necessidade em antecipar a crescente demanda por serviços cirúrgicos causado pelo envelhecimento da população (GLOU-

BERMAN; MINTZBERG, 2001) (ETZIONI et al., 2003). Estes fatores salientam claramente a necessidade por eficiência e desenvolvimento de um procedimento de planejamento e programação baseado na pesquisa de novas técnicas a serem aplicadas na otimização do processo cirúrgico.

A gestão envolve decisões de diferentes níveis, os quais são diferenciados por alguns pesquisadores em estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo). O primeiro consiste no mais alto nível de tomada de decisões, que estão relacionadas aos objetivos globais e às políticas mais adequadas para atingi-los. No contexto em análise consiste portanto na definição de prioridades entre as especialidades conforme um determinado critério de performance escolhido pelos gestores para nortear o processo decisório. O segundo trata da utilização eficiente de recursos com intuito de garantir o que foi definido no nível estratégico. Consiste por exemplo na divisão de tempo disponível para realização dos procedimentos cirúrgicos entre as salas de operação. O planejamento no nível operacional consiste na desagregação da informação para execução do plano no dia-a-dia. É neste estágio que se realiza a atividade de sequenciar as cirurgias.

O sequenciamento de cirurgias consiste em definir a realização de procedimentos para atender uma dada demanda otimizando uma determinada função objetivo. São realizados diferentes tipos de cirurgias, sendo assim, estas cirurgias estão agrupadas por especialidades. Os recursos humanos especializados são alocados a cada tipo de cirurgia em conformidade com certas características dos profissionais como a competência de atuação, a habilidade particular de cada um deles e a disponibilidade do profissional para execução da atividade, sendo que esta última característica consiste na janela de tempo. Como a sociedade demanda por mais qualidade dos serviços no setor da saúde, existe uma tendência em se discutir o processo de sequenciamento de cirurgias e suas respectivas restrições. A alocação de cirurgias nas salas de operação é um problema de otimização e esta ferramenta de otimização tem potencial para a solução de problemas de controle de custos na gestão hospitalar (RAIS; VIANA, 2011).

Existem estudos na literatura direcionados a oferecer soluções para o

problema e contribuir com a melhoria da gestão destas instituições. A maior parte dos problemas descritos na literatura é tratada em relação a um aspecto específico e delimitados por meio de pressupostos para reduzir a complexidade da análise.

Segundo Meskens, Duvivier e Hanset (2013), a metodologia para o planejamento e sequenciamento de cirurgias auxilia os gestores de hospitais na utilização eficiente das salas de operação, minimizando custos de operação, satisfazendo às necessidades dos pacientes e preferências dos cirurgiões, levando-se em conta restrições de recursos humanos e materiais.

De acordo com Guinet e Chaabane (2003), o bloco cirúrgico é um dos setores funcionais mais críticos e onerosos para um hospital. Ele representa um gargalo em muitos hospitais e consome uma significativa parcela do orçamento anual do hospital porque geralmente utiliza recursos muito dispendiosos. Assim como constatado em trabalhos de outros autores, ele é umas das principais fontes de recursos financeiros nos hospitais. Portanto, é importante melhorar a performance utilizando os recursos de maneira eficiente e efetiva.

A gestão das salas de operação é um processo que demanda o uso de modelos matemáticos e técnicas quantitativas muito aplicadas para resolver o problema, segundo Guerriero e Guido (2011). A gestão das salas desdobra-se em duas etapas. A primeira delas fornece a data da cirurgia para cada paciente, levando em conta as restrições de salas e de cirurgiões. A segunda, corresponde ao sequenciamento diário e resulta na sequência de operações a ser realizada em cada sala em um dado dia, levando em consideração a disponibilidade de recursos humanos e materiais.

O foco do trabalho é na programação detalhada do sequenciamento de cirurgias para agendamento de pacientes eletivos em um horizonte de tempo de médio prazo, por exemplo, de uma semana, utilizando um modelo de programação inteira. Para estes pacientes, a cirurgia não é inesperada e pode ser planejada com antecedência. Em termos gerais, o sequenciamento de cirurgias consiste na definição de procedimentos cirúrgicos de acordo com a disponibilidade da sala de operação em uma data definida

com a alocação dos recursos necessários à sua realização. Com intuito de resolver este problema, diferentes modelos de otimização foram propostos na literatura.

O cenário da saúde foi o escolhido para o desenvolvimento deste trabalho, o qual tem como motivação a prática em um hospital em Belo Horizonte, Minas Gerais. Com diferentes salas de operação dedicadas a intervenções eletivas, sendo que algumas são multifuncionais, algumas possuem equipamentos específicos que não podem ser removidos e outras apresentam restrições de tamanho. Cada cirurgião tem um conjunto de pacientes, devido a isso cada operação é realizada por um cirurgião específico. Porém, a atribuição das cirurgias às salas também faz parte do problema, assim como a determinação do tempo de início e o respeito à janela de tempo dos cirurgiões e anestesistas. As restrições do problema englobam o planejamento de recursos, como equipamentos médicos. O grande interesse por este tipo de problema revela por um lado sua importância para aplicações reais e, por outro, a complexidade de seu tratamento.

A dissertação está estruturada da seguinte forma: após a apresentação dos objetivos gerais, específicos e da metodologia, é realizada no Capítulo 2 a revisão da literatura com foco no tema sequenciamento cirúrgico. No Capítulo 3, é enunciada a modelagem matemática desenvolvida e implementada para o problema de sequenciamento de cirurgias. A análise é realizada de acordo com duas políticas que se diferenciam pela função objetivo. Para a primeira política, o objetivo consiste em maximizar o número de procedimentos cirúrgicos. Para a segunda, os custos de atraso são considerados de forma que sejam minimizados. No Capítulo 4, são apresentadas as abordagens heurísticas de formulação aplicadas à proposta inicial. Desta forma, os métodos heurísticos são avaliados de acordo com a aplicação a cada uma das funções objetivo enunciadas no capítulo anterior. Por meio da implementação, os resultados para cada uma das abordagens foram gerados e comparados para avaliação de desempenho. Finalmente, no capítulo 5, são realizadas as considerações finais do trabalho e destacadas as oportunidades promissoras para o desenvolvimento de trabalhos futuros

por meio do refinamento da estratégia utilizada no desenvolvimento dos métodos heurísticos.

1.2 Objetivos Gerais

Apresentar abordagens para a otimização da ocupação de blocos cirúrgicos, dada a capacidade instalada do contexto em análise. Serão enunciadas formulações matemáticas multiperiódicas desenvolvidas para o problema de sequenciamento de cirurgias. Para modelar e resolver o problema utilizou-se diferentes algoritmos baseados em métodos exatos e heurísticos, sempre tentando manter uma ligação com a aplicação real. Desta forma, será possível ao administrador do bloco cirúrgico uma visão global do ambiente para auxiliá-lo na tomada de decisão.

1.3 Objetivos Específicos

1. Compreender o contexto de programação de cirurgias numa aplicação real em um bloco hospitalar.

2. Propor uma modelagem de programação inteira utilizando duas funções objetivo, uma que maximiza a ocupação das salas cirúrgicas e outra que minimiza o atraso ponderado.

3. Verificar a qualidade da solução obtida pela proposta inicial por meio da realização de experimentos computacionais.

4. Desenvolver heurísticas de formulação baseadas no modelo de programação inteira proposto inicialmente.

5. Analisar a qualidade da solução obtida das abordagens heurísticas por meio da realização de experimentos computacionais.

1.4 Metodologia

A metodologia aplicada para a realização deste trabalho tem como objetivo compreender e definir o problema. Ela pode ser classificada em pesquisa de modelagem quantitativa.

Segundo Morabito e Pureza (2010), a utilização de modelos permite o tratamento do problema de sequenciamento como apoio à decisão de forma a contribuir para que o sistema hospitalar, com foco no bloco cirúrgico, opere da melhor forma possível, considerando as limitações inerentes ao processo e ao contexto em análise. A abordagem quantitativa corresponde a modelos descritos em linguagem matemática e computacional por meio da utilização de técnicas analíticas e experimentais para gerar resultados por meio da implementação da representação em modelos do sistema em análise. Os modelos quantitativos compreendem um conjunto de variáveis de controle que variam conforme um domínio específico.

Inicialmente, é proposto um modelo matemático determinístico para abordar o problema de programação de cirurgias de forma a otimizar a ocupação. Buscou-se o desenvolvimento de um modelo suficientemente detalhado para captar os principais elementos que representem o sistema real ao mesmo tempo em que houve um cuidado com a simplificação com o intuito de torná-lo tratável. A decisão a ser tomada envolve fazer ou não a cirurgia, o horário de início, local de realização e os recursos alocados a ela. Para isso é necessário o conhecimento do conjunto de cirurgias e de recursos, assim como suas especificidades. A modelagem deve ser indexada no tempo, sendo o horizonte de decisão, dia, repartido em pequenas unidades discretas. Este subconjunto permite determinar a janela de tempo em que um recurso está disponível ou que uma cirurgia pode ser realizada.

Após a definição do problema e a construção do modelo, métodos de solução e algoritmos são utilizados. Ele é então testado com dados baseados em instâncias com o padrão do contexto em análise. Como diretrizes para a busca da solução utilizou-se o solver CPLEX para testar o algoritmo a ser implementado em linguagem AMPL vislumbrando a aplicação de métodos e heurísticas para aprimoramento da solução, uma vez que o problema

é NP-difícil e encontrar uma solução para ele pode ser considerado um problema NP-completo.

Tendo sido validado com a realização dos testes iniciais, o desempenho do modelo de programação inteira é analisado considerando duas variantes da função objetivo. Na primeira delas, o uso das salas de operação é maximizado. Na segunda, o atraso ponderado é minimizado.

São realizadas também alterações na modelagem original do problema a ser resolvido para viabilizar a aplicação de técnicas de otimização combinatória baseada em abordagens heurísticas. Cada abordagem é então aplicada para as duas variantes da função objetivo, assim como para o modelo exato.

De acordo com a tipologia de metodologias quantitativas, esta pesquisa pode ser classificada por pesquisa axiomática normativa. Trata-se de encontrar uma solução ótima para um problema novo ou comparar o desempenho de estratégias que tratam um mesmo problema. Esta pesquisa permite portanto a prescrição de uma decisão para o problema por meio de modelos de programação matemática.

O processo de modelagem e abordagem em pesquisa operacional envolve a definição de um modelo conceitual e a abstração deste em um modelo matemático analítico. A aplicação de pesquisa operacional permite determinar como melhor planejar e operar sistemas viabilizando alocações eficientes de recursos escassos. É portanto uma ciência da tomada de decisão composta e fundamentada pela modelagem quantitativa.

A este trabalho buscou-se aplicar a metodologia de pesquisa baseada em modelagem quantitativa em gestão de produção e operações. Foi dada ênfase à metodologia em pesquisa operacional como uma abordagem científica para auxiliar o processo decisório no contexto de Engenharia de Produção.

2 Revisão da Literatura

2.1 Sequenciamento de Cirurgias

Esta seção trata da aplicação da pesquisa operacional ao sequenciamento de cirurgias por meio de estudos realizados com o referencial teórico selecionado. Por meio da revisão da literatura, foram compiladas e sintetizadas informações com objetivo de identificar as principais tendências de estudo na área.

A fim de manter um conjunto homogêneo de contribuições e obter uma visão atualizada sobre a programação das salas de operação, foram selecionados artigos que incorporam explicitamente considerações de planejamento e programação. A estruturação da informação obtida foi feita de tal forma que as contribuições das pesquisas possam ser relacionadas com as outras de acordo com aspectos semelhantes, o que deve facilitar a detecção de contribuições que estão enquadradas em uma área específica de interesse do tema em análise. Sintetizar a literatura permite a identificação de problemas que são atualmente examinados.

Uma variedade de estudos a respeito do tema assistência médica foi realizada desde os anos 60 e observou-se uma evolução nas publicações a respeito do assunto gestão de blocos cirúrgicos para tratar da melhoria do desempenho dos hospitais no atendimento aos pacientes. Estuda-se na literatura o desenvolvimento de sistemas hospitalares menos dispendiosos para a manutenção e melhoria da qualidade dos serviços prestados.

O número crescente de contribuições é acompanhado da proposição de diferentes abordagens para o problema. Segundo Cardoen e Demeulemeester (2010), o escopo para o tratamento deste problema é variado porque existe um *trade off* para o desenvolvimento da modelagem, que consiste em decidir entre o nível de detalhamento da informação e o nível de flexibilidade/simplicidade da notação.

De acordo com estudos realizados acerca de sistema de agendamento, existem dois grupos de procedimentos de sequenciamento para os pacien-

tes atendidos. São eles:

Agendamento eletivo: é caracterizado pelo agendamento antecipado de pacientes em relação às datas de realização, de acordo com as prioridades de atendimento. Em decorrência da programação antecipada, a realização da cirurgia não é inesperada, não apresenta caráter de urgência. O ponto de partida para uma intervenção eletiva é o laudo médico, que deve consubstanciar a solicitação da referida intervenção. De posse deste documento, o paciente deve entregá-lo à administração do hospital, que providenciará a autorização.

Agendamento de urgência-emergência: é definido pela marcação da cirurgia no dia em que a ela ocorre, ou seja, ao chegar no hospital o paciente necessita ser atendido. Neste caso, o agendamento prévio não ocorreu e considera-se que todos os pacientes estão no hospital aguardando o agendamento neste dia específico. São os casos em que o paciente procura um pronto atendimento, ou seja, atendimento médico sem prévio agendamento por necessitar de intervenção médica rapidamente ou mesmo imediatamente.

Como o estudo de caso do presente trabalho não contempla os serviços de maternidade e emergência ambulatorial, o foco do estudo é o primeiro processo, o sequenciamento cirúrgico de pacientes eletivos. Este processo é realizado em dois momentos: inicialmente o paciente é agendado para uma data específica e depois atribuído a uma determinada sala com um momento para início do procedimento, de acordo com a disponibilidade dos demais recursos.

Magerlein e Martin (1978) revisaram a literatura sobre agendamento cirúrgico. Os autores diferenciaram os tipos de agendamento em: agendamento antecipado e agendamento de alocação. Para aprimorar o detalhamento, o estudo foi aprofundado com foco no agendamento de alocação. Segundo eles, deve haver uma diferenciação neste tipo de agenda-

mento, para o qual foram definidas duas abordagens, uma delas se baseia no sistema aberto e a outra abordagem está relacionada ao sistema fechado. O sistema aberto apresenta uma configuração que permite considerar um maior número de fatores para análise, o que resulta em maior complexidade em relação à outra abordagem. Por possibilitar integração, o sistema aberto trata da resolução do problema nos níveis tático-operacional. Já o sistema fechado apresenta um tratamento independente por não considerar interferências de fatores externos e por ser resolvido no nível tático apenas. A definição conceitual do sistema é determinada pelas decisões a serem apoiadas pelo sistema que varia de acordo com as particularidades do ambiente em análise. Para caracterização da motivação em se estudar o problema, definiram também que o centro cirúrgico é uma das áreas mais importantes em um hospital por duas razões: em primeiro lugar por apresentar altos custos, uma vez que os recursos envolvidos são onerosos e em segundo lugar por gerar demanda em outros departamentos do hospital (tem impacto em outros setores) devido à interação com eles. Os principais benefícios decorrentes das políticas de melhoria de gestão irão resultar em uma melhor coordenação da demanda por serviços hospitalares e dos recursos envolvidos tais como salas, cirurgiões, anestesistas, enfermeiros, equipamentos. Com isto, é possível balancear/equilibrar a utilização de recursos. Estuda-se na literatura, portanto, o desenvolvimento de sistemas hospitalares menos dispendiosos para a manutenção e melhoria da qualidade dos serviços prestados.

Os autores Blake e Carter (1996) adicionaram o domínio de recursos externos ao trabalho de Magerlein e Martin (1978) e abordaram os níveis hierárquicos de decisão: estratégico, tático e operacional. O escopo de análise permite a identificação e garantia de cuidados adequados para um paciente antes e depois de uma cirurgia no longo, médio e curto prazo.

Houdenhoven et al. (2007) também utilizaram essa categorização baseada no horizonte de tempo. De acordo com os autores, o planejamento estratégico usa previsões e informações históricas, enquanto o tático e operacional lidam com dados reais de pacientes. Sendo que para o nível hierár-

quico operacional diferenciaram aquelas decisões tomadas com antecedência e aquelas relacionadas a acontecimentos imprevistos. Em contrapartida, Cardoen e Demeulemeester (2010) definem que apenas o nível operacional envolve os dados reais de pacientes, enquanto os outros níveis decisórios relacionam-se ao número de pacientes esperados.

As fronteiras de análise dos níveis hierárquicos de decisão apresentam redundância, conforme a literatura, sendo difíceis de serem padronizadas. Para o desenvolvimento deste estudo, considerou-se um problema com um conjunto de cirurgias conhecidas atribuídas aos dias de uma dada semana, nível operacional de análise, enquanto o cronograma que reserva o tempo de sala de operação aos cirurgiões a cada semana consiste no nível tático de análise.

De acordo com o trabalho de Macario (2006), as despesas do setor cirúrgico são responsáveis por quase 33% do orçamento previsto do hospital porque esta especialidade envolve altos custos trabalhistas (cirurgiões, anestesistas, enfermeiros) e custos de material, tais como leitos e equipamentos cirúrgicos. Neste contexto, os gestores estão interessados em melhorias na operacionalização do sequenciamento cirúrgico. Essas melhorias terão um impacto no desempenho do hospital como um todo. O autor propõe indicadores com o objetivo de mensurar o desempenho hospitalar, identificar áreas que necessitam de melhorias e monitorar o processo. A descrição de cada um dos indicadores é dada a seguir:

1. Despesa excessiva com pessoal: relacionada com a alocação do tempo de cada serviço a cada sala de operação por dia da semana em decorrência da ociosidade ou sobrecarga de trabalho dos profissionais. Esta alocação deve se basear na maximização da eficiência das salas.

2. Data de início com atraso: reduzir o tempo que os pacientes devem aguardar para realização do procedimento é outro objetivo vislumbrado. Ter as fichas prontas e a documentação dos pacientes disponível contribuem para que o atendimento ocorra no horário agendado.

3. Cancelamento de cirurgia no dia: pode ocorrer, por exemplo, por parte dos pacientes ou devido à indisponibilidade do cirurgião.

4. Unidade de internação pós-anestésica (PACU): o atraso nessas unidades pode ser definido pela porcentagem de dias trabalhados em que pelo menos um atraso de no mínimo 10 minutos aconteceu devido à lotação da unidade de internação pós-anestésica.

5. Margem de contribuição por hora das salas de operação: consiste na receita gerada pelos casos cirúrgicos menos os custos e despesas variáveis. Pesquisas realizadas em hospitais americanos indicam que a margem de contribuição por hora nas salas de operação é em média de 1000 dólares a 2000 dólares (DEXTER; LEDOLTER; WACHTEL, 2005). Outros estudos revelam que a margem de contribuição por hora do tempo da sala cirúrgica variou mais de 100% entre os cirurgiões, o que indica a necessidade de alteração da alocação de tempo às salas para hospitais com altas taxas de utilização das salas (DEXTER et al., 2002).

6. Tempo de giro: é o intervalo de tempo entre a saída do paciente da sala de operações até a entrada do próximo paciente nesta mesma sala. O tempo de limpeza das salas é portanto contabilizado neste caso.

7. Tempo de giro prolongado: casos em que o tempo entre a saída do paciente da sala até a chegada do próximo é superior ao intervalo previsto devem ser considerados atrasos. Eles são denominados tempos de giro prolongados.

8. Previsão de tendências: definido pela estimativa de duração do procedimento. O erro da previsão consiste na diferença entre a duração real e a planejada. Esta análise permite avaliar se a estimativa está superestimada ou subestimada.

A modelagem para utilização de salas cirúrgicas eficientemente é mo-

tivada por Guinet e Chaabane (2003), que propuseram um modelo para atribuir cirurgias às salas de operação no médio prazo. Neste caso foram considerados N pacientes, cada um demandando um procedimento cirúrgico específico, a serem agendados em um bloco cirúrgico ao longo de um horizonte de médio prazo (uma ou duas semanas). Este bloco é composto por várias salas de cirurgias e salas de recuperação, onde existem leitos para os pacientes. Cada paciente necessita de um procedimento cirúrgico especial, o que define os recursos humanos e materiais necessários durante a intervenção cirúrgica. Os critérios satisfação e eficiência analisados pelos pacientes para avaliar a qualidade do serviço são modelados, respectivamente, pelo custo de internação, mensurado, por exemplo, pelo tempo de internação, e pelo custo de horas extras, o que está relacionado por exemplo à sobrecarga de recursos. Os autores propõe a resolução do problema em duas etapas. Primeiro é realizado o planejamento do bloco cirúrgico por meio da atribuição de pacientes no horizonte de tempo considerado, o que resulta no plano das salas. Segundo, cada sala cirúrgica é considerada individualmente para atribuição dos recursos humanos e materiais necessários resultando no sequenciamento de cada sala para sincronização de recursos. O trabalho tem como foco a primeira etapa, um problema NP-difícil de atribuição geral. O modelo de atribuição que considera a capacidade de recursos e a janela de tempo dos profissionais é proposto e resolvido de forma heurística por meio da adição de restrições.

Jebali, Alouane e Ladet (2006) abordaram o sequenciamento diário de um centro cirúrgico por meio de um modelo de atribuição de cirurgias às salas, considerando restrições de capacidade como início e fim das operações nas salas, o tempo de trabalho dos cirurgiões e o número de leitos nas unidades intensivas de tratamento. Estes autores também utilizaram a abordagem em duas fases: atribuição das cirurgias às salas e sequenciamento de cada sala. Na primeira fase, as cirurgias a serem realizadas em um dado dia são fixadas, a atribuição de operação é feita sem especificar a sequência de operações a serem realizadas. Na segunda fase, a ordem em que as cirurgias irão ocorrer é estabelecida. Para este segundo momento, foram

propostas e adotadas duas estratégias de sequenciamento. Desenvolveu-se portanto um estudo comparativo das duas estratégias de sequenciamento, com base na performance de cada uma delas, o que permitiu tratar o problema como *flow shop* híbrido. O objetivo consiste em minimizar custos associados ao tempo de espera do paciente. O trabalho foi motivado pelo fato de muitas instituições de saúde necessitarem de ferramentas para reduzir os custos e garantir uma utilização eficiente das instalações hospitalares. Como as salas de cirurgias estão entre as instalações mais onerosas de um hospital este foi o foco do trabalho dos autores.

Marques, Captivo e Pato (2012) definiram uma modelagem para sequenciamento de cirurgias eletivas em um horizonte de tempo de uma semana com o objetivo de maximizar a ocupação das salas de operação. O estudo foi aplicado em um hospital de Lisboa para utilizar de forma mais eficiente os recursos instalados no centro cirúrgico deste hospital. O planejamento foi feito para cirurgias eletivas de uma lista de espera para agendamento, o que permite maximizar a utilização do centro. Foi desenvolvido então um modelo de programação linear inteira, o mesmo foi testado com dados reais de registros da instituição. A melhoria da solução ocorreu pela aplicação de uma abordagem heurística.

Blake e Carter (2002) definiram dois modelos de programação linear utilizando a metodologia hospital *case mix selection problem*, que permite priorizar os tipos de cirurgias realizadas no hospital. A metodologia se baseia na utilização de dois modelos, um deles define o volume de atendimento para cada especialidade enquanto mantém os custos fixos; o outro permite mudanças para investigação de *trade-offs*.

Ozkarahan (1995) propôs um modelo matemático similar ao job shop com otimização multiobjetivo. As cirurgias são sequenciadas nas salas de operação de forma a maximizar a utilização e minimizar horas extras.

Przasnyski (1986) estruturou o exame da literatura acerca das salas de operação com o objetivo de levantar informações a respeito de ações adotadas para redução de custos e de agendamento de recursos específicos. De acordo com o estudo dele, o custo para realizar obras na área das salas

de operação, em pés-quadrados, é mais oneroso do que nas demais dependências do bloco cirúrgico. Outro aspecto que merece destaque no estudo do autor é a forma de tratamento dado ao problema. Tratá-lo como um sistema fechado permite o benefício da redução da competitividade por recursos entre os médicos. A disputa acontece devido às preferências de cada especialistas. Já o tratamento como um sistema aberto resulta em taxas elevadas de cancelamento de procedimentos, segundo o autor. O principal motivo destas altas taxas é o elevado número de agendamentos que é viabilizado por meio de horas extras, o que acaba por gerar disparidade de utilização do bloco cirúrgico. Outro aspecto negativo do sistema aberto está relacionado à dificuldade em abordar o problema computacionalmente por ser maior, uma vez que ele é resolvido de maneira integrada, sendo portanto mais flexível para atender as solicitações. Os estudos direcionam portanto à abordagem fechada, que por sua vez também apresenta dificuldades como o fato de ocasionar subutilização em decorrência da sazonalidade da demanda e da dificuldade de agendamento no momento em que a cirurgia irá ocorrer.

Meskens, Duvivier e Hanset (2013) realizaram estudos de caso em hospitais e avaliaram que os problemas são específicos a cada instituição. Cada hospital caracteriza-se por uma prática própria estabelecida, por hábitos compartilhados entre os envolvidos e pelo *know-how* dos profissionais que o compõem. Para que a organização tenha expansão e acompanhe a evolução do ambiente no qual está inserida, há necessidade de mudanças e transformações internas. As especificidades das restrições encontradas em cada hospital levam à necessidade em criar modelos de sequenciamento. Para auxiliar o trabalho dos gestores das salas de operação, muitos autores forneceram soluções parciais. Verifica-se que os trabalhos focam em aspectos específicos do problema e certos pressupostos são definidos para reduzir a complexidade do problema. As restrições consideradas estão relacionadas a alguns aspectos, com destaque para a disponibilidade de recursos humanos, as preferências dos cirurgiões, as prioridades dos pacientes, a disponibilidade de salas e de materiais médicos. A conclusão dos autores é

de que poucos trabalhos consideram ambas as as restrições de recursos humanos e materiais. No caso dos recursos humanos, as principais limitações consideradas são a disponibilidade de cirurgiões e anestesistas. Em relação aos materiais médicos, é frequente a consideração do número de salas e de leitos de recuperação cirúrgica.

Alguns campos tratados nos estudos levantados descrevem seis pontos distintos de análise do problema de acordo com as medidas de desempenho que podem ser utilizadas e as características dos pacientes. Cada um destes pontos é tratado a seguir para caracterizar a terminologia utilizada ao modelar o problema de acordo com a bibliografia levantada. Para cada um deles foram ressaltadas as tendências mais relevantes.

1. Característica dos pacientes: podem ser eletivos, representados pelos indivíduos para os quais as cirurgias são planejadas com antecedência, ou não eletivos (casos não previstos e de urgência). De acordo com Cardoen, Demeulemeester e Beliën (2010), a literatura para o planejamento de pacientes eletivos é mais vasta, o que pode ser verificada nos trabalhos de Adan e Vissers (2002), Beliën e Demeulemeester (2007), Beliën, Demeulemeester e Cardoen (2009), Bowers e Mould (2005), Cardoen e Demeulemeester (2008) e Dexter e Macario (2002). Adan e Vissers (2002) formularam um programa inteiro misto para identificar o *mix* de pacientes que precisam ser internados no hospital para o direcionamento de recursos, como alocação às salas. Infelizmente, a definição clara do tipo de agendamento para o sequenciamento da sala de operações ainda é uma lacuna em alguns estudos. O tratamento de forma explícita faz-se necessário uma vez que permite levantar informações que reduzem a incerteza, por exemplo a respeito da chegada ao hospital, duração do procedimento, a demanda por recursos médicos durante a estadia no contexto, dentre outros.

2. Medida de desempenho: vários critérios de performance são utilizados para avaliar os procedimentos de sequenciamento, configurando-se como o objetivo de otimalidade das formulações. Os critérios considerados

podem ser tempo de espera, adiamento de paciente, utilização, *makespan*, valor financeiro, preferências. Longo tempo de espera está entre os mais preocupantes de acordo com autores como Arenas et al. (2002), Cardoen e Demeulemeester (2008) e Denton e Gupta (2003). Em contrapartida, a utilização das salas é um ponto de discussão bastante relevante de acordo com Adan e Vissers (2002), Dexter (2003), Dexter e Macario (2004), Dexter e Traub (2002), Dexter, Traub e Macario (2003), Fei et al. (2008), Fei, Meskens e Chu (2010) e Jebali, Alouane e Ladet (2006). Em alguns estudos, como em Dexter (2003) e Dexter e Macario (2004), verifica-se a análise da utilização sob ambos os aspectos da superutilização e da subutilização, verifica-se portanto que existe um *trade-off*: se por um lado a utilização das salas deve ser maximizada, uma vez que a capacidade ociosa de salas representa custos desnecessários, por outro lado, a sobrecarga de utilização das salas gera instabilidade e grandes custos de incerteza.

3. Tomada de decisão: indica o tipo de decisão que deve ser tomada e a quem se aplica. Pode estar relacionada à data, ao tempo, à sala de operação ou à capacidade. Sendo que, no nível estratégico encontra-se o problema de definição do tipo de cirurgia a ser realizada. No nível tático é realizada a divisão entre as especialidades médicas do tempo de sala de operação disponível resultando no plano mestre de produção. No nível operacional resolve-se o seqüenciamento de cirurgias que define em um primeiro momento o agendamento de paciente e em um segundo momento define a sequência de cirurgias em um dia específico, assim como a alocação de recursos de acordo com o agendamento.

4. Metodologia da pesquisa: a literatura de planejamento e sequenciamento de salas de operações prevê informação sobre o tipo de análise realizada e a solução aplicada. Dentre as técnicas utilizadas, estão a programação linear, programação quadrática, programação inteira mista, programação dinâmica, geração de colunas, branch and price, simulação de eventos discretos e procedimentos analíticos construídos para cada caso.

Com relação às análises realizadas, pode-se citar a análise de cenários (opções são comparadas no que diz respeito aos critérios de desempenho).

5. Incerteza: a incerteza é uma característica inerente ao processo cuja análise indica o que os pesquisadores incorporaram ao tratar o problema de acordo com o tipo de abordagem, se determinística ou estocástica. No segundo caso predomina o tratamento dado a incertezas, que em geral, estão relacionadas ao momento de chegada para atendimento e à duração do atendimento.

6. Aplicabilidade da pesquisa: de acordo com os pesquisadores que direcionaram os estudos com foco em salas cirúrgicas e que foram mencionados neste trabalho, informações coletadas no contexto prático em estudo baseiam a maioria das pesquisas. A implementação dos algoritmos e processos relacionada a ganhos financeiros significativos a curto prazo favorece a adesão da gestão hospitalar à proposta, segundo os autores. Em particular, Hans e Nieberg (2007) introduziram os princípios de gerenciamento de operações aplicadas à saúde por meio de uma ferramenta aplicada ao projeto educacional na área em discussão.

2.2 Métodos Exatos

De acordo com Cardoen, Demeulemeester e Beliën (2010), a maior parte dos trabalhos resolvem o problema de sequenciamento de cirurgias de maneira determinística. Autores como Cardoen, Demeulemeester e Beliën (2009) e Fei et al. (2008) desenvolveram e aplicaram uma abordagem *branch and price*. Em ambos casos, a estrutura básica dos problema é formada por modelos de sequenciamento já existentes na literatura. No entanto, a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos modelam situações específicas que se ajustam a estudos de casos reais. Por este motivo, não há uniformidade em termos de modelagem na literatura, o que dificulta a comparação de modelos e técnicas de solução.

Beliën e Demeulemeester (2008) desenvolveram um trabalho no qual é

apresentado o modelo que integra o sequenciamento com a janela de tempo do pessoal de enfermagem, que enfrenta enorme variação diária de pressão de carga de trabalho. Aplica-se a geração de colunas para resolver o problema e os benefícios da implementação são evidenciados pela redução do custo hospitalar.

Cardoen, Demeulemeester e Beliën (2009) aplicaram o método ao investigarem o sequenciamento de cirurgias por meio de uma análise multicritério, de forma a minimizar a superutilização de leitos de recuperação, a ocorrência de horas extras e a violação das preferências dos cirurgiões e pacientes. A restrição para a disponibilidade de recursos, como equipamentos médicos, e a realização de precauções médicas, como limpeza das salas de operação, foram considerados. Aplicou-se a geração de colunas para resolver o problema de otimização combinatória. A coluna representa todas as cirurgias realizadas por um cirurgião específico e o problema *pricing* é resolvido por programação dinâmica. Estratégias foram elaboradas para analisar o impacto sobre a qualidade da solução. A resposta da implementação é a identificação de qual cirurgia realizar em cada horário de acordo com a disponibilidade da sala. Desta forma, os autores desenvolveram uma abordagem exata baseada no *branch and price* para resolver o problema multi-objetivo e posteriormente apresentaram duas estratégias para resolver o subproblema de *pricing*. Os casos de teste para os experimentos computacionais foram gerados com base em dados reais de um hospital acadêmico na Bélgica.

Fei et al. (2008) estudaram o problema de atribuição de cirurgias eletivas com foco na atribuição de casos cirúrgicos às salas de operação. O modelo proposto pelos autores leva em consideração a disponibilidade das salas, a duração das cirurgias e os prazos de realização para o planejamento de uma semana com o objetivo de minimizar custos de atrasos. O problema mestre divide as cirurgias em dias, enquanto o subproblema corresponde às restrições relacionadas ao tempo de realização do processo cirúrgico para encontrar uma coluna melhor. Inicialmente formulam o problema como inteiro e, em seguida, reformulam o programa inteiro usando decomposição

de *Dantzig-Wolf* para o particionamento de conjuntos. Com base nessa formulação de particionamento de conjuntos, um algoritmo *branch-and-price*, é projetado para o problema proposto, onde cada nó é o problema relaxado de um problema de particionamento de conjuntos. Os resultados computacionais indicam que o método de decomposição é promissor e capaz de resolver problemas grandes. Em Fei, Meskens e Chu (2010), o estudo é aprofundado de forma a considerar o sequenciamento diário por algoritmo genético híbrido.

Jebali, Alouane e Ladet (2006) abordaram o problema de sequenciamento de cirurgias em duas etapas: primeiramente as cirurgias eram alocadas em salas de operação e em um segundo momento, a ordenação é realizada com o objetivo de maximizar a utilização das salas considerando as restrições de alocação de recursos. De acordo com o método desenvolvido, os autores compararam duas abordagens relacionadas à possibilidade ou não de troca de sala na segunda etapa. Os algoritmos foram testados em instâncias geradas aleatoriamente.

Ghazalbash et al. (2012) incluíram a possibilidade de distribuição de cirurgias para residentes com o objetivo de contribuir com a formação do profissional no hospital-escola. Vijayakumar et al. (2013) objetivaram maximizar a soma ponderada do número de cirurgias a serem realizadas nos períodos de dias da semana. As restrições estão relacionadas à disponibilidade de recursos, prioridades de pacientes, tempo de cirurgias e especialidades dos cirurgiões.

Meskens, Duvivier e Hanset (2013) consideraram restrições relacionadas à disponibilidade de recursos, preferências e afinidade dos profissionais. A modelagem é multi-objetivo minimizando o makespan e maximizando as afinidades entre os membros da equipe cirúrgica.

Pham e Klinkert (2008) trataram o problema como *Multi Mode Blocking Job Shop* e resolveram por programação inteira mista. Neste caso, a cirurgia é considerada um *job* que apresenta três fases: pré-operação, operação e pós-operação. Para cada uma delas são alocados recursos, o que é entendido como um modo de processamento. O objetivo é minimizar o

makespan.

Lamiri, Xie e Zhang (2008) trataram do problema de planejamento de cirurgias para pacientes eletivos e não eletivos. Um modelo de programação matemática estocástica e uma abordagem de geração de colunas são propostas. Cada coluna representa um possível paciente eletivo em um determinado período. A abordagem proposta obteve soluções a 2% do ótimo são obtidos em um curto tempo de computação para problemas de tamanhos práticos, com 12 salas de cirurgia e cerca de 210 pacientes eletivos.

2.3 Heurísticas e Metaheurísticas

A programação matemática envolve o estudo de técnicas que podem gerar melhores soluções para otimização de problemas. Dependendo da aplicação, os algoritmos podem ser rápidos para encontrar uma solução ótima, mas em certos casos podem ser proibitivos em relação ao tempo que consomem de um computador. Por exemplo, para grandes instâncias, o tempo para encontrar o ótimo pode explodir exponencialmente e a programação matemática envolve o estudo de técnicas que podem gerar melhores soluções para a otimização de problemas. Quando não for prático determinar uma solução ótima, considera-se uma boa solução. Tais procedimentos são chamados de Métodos Heurísticos de Solução, ou simplesmente, Heurísticas. Uma heurística frequentemente tem uma justificativa intuitiva, e ela não garante produzir uma solução ótima, nem mesmo uma boa solução, em muitos casos.

Marques, Captivo e Pato (2014) trataram do estudo com objetivo de melhorar a eficiência dos recursos disponíveis e de reduzir a lista de espera por cirurgias. Com foco no sequenciamento de cirurgias eletivas, utiliza dois critérios de otimização: maximiza a ocupação cirúrgica e maximiza o número de procedimentos sequenciados. Devido à complexidade do problema e às dimensões das instâncias consideradas, o problema foi decomposto em duas fases hierárquicas de acordo com a natureza das cirurgias. Foi desenvolvida uma heurística baseada em algoritmos genéticos e o número de casos considerados para agendamento é maior do que a maioria dos resultados

publicados enquanto o tempo para obter um plano cirúrgico é reduzido.

Denton, Viapiano e Vogl (2007) formularam um programa estocástico misto de dois estágios e propuseram estratégias heurísticas. A análise para a modelagem levou em consideração o tempo de espera do paciente, tempo de espera do cirurgião e superutilização da sala de operação. Blake e Carter (2002) apresentaram um modelo de programação inteira e uma melhoria heurística para construir um calendário cíclico de acordo com o tempo estipulado de cirurgias em cada sala. O modelo determina para cada especialidade qual tipo de dependência deve ser atribuída a qual dia da semana (uma decisão que considera a data e a sala).

Beliën e Demeulemeester (2007) enunciam um modelo que envolve dois tipos de restrições. Restrições de demanda para garantir que cada cirurgião atue em determinadas salas de operação e restrições de capacidades para limitar a disponibilidade das salas ao longo do dia. Outro aspecto considerado na modelagem é o número de pacientes operados e o tempo de permanência, ambos estão relacionados com o tipo de cirurgia. É aplicada programação inteira mista baseada em heurísticas e metaheurísticas para minimizar a carência de leitos pós-operatórios.

Roland et al. (2010) propuseram um modelo para a gestão de diferentes recursos humanos e materiais. Segundo eles uma organização menos onerosa das salas de operação é obtida pela utilização mais racional dos recursos, pelo planejamento refinado das unidades cirúrgicas e pelo bem-estar da equipe médica. Os recursos são agrupados em renováveis, como o corpo médico, e em não renováveis como produtos farmacêuticos. Há também a verificação da disponibilidade dos profissionais envolvidos como cirurgiões, enfermeiros e anestesistas, sendo que estes últimos não participam de todo o processo cirúrgico. Consideram as salas de operação como uma atividade crítica nos sistemas de saúde em virtude da grande utilização e do valor de recursos humanos e materiais. Os autores propuseram um procedimento de solução heurística baseada em algoritmos genéticos para combater os grandes tempos de execução inerentes a este tipo de problema de otimização difícil. Este processo de planejamento é normalmente decomposto em

duas fases sequenciais: a fase de planejamento seguido por uma fase de agendamento.

Riise e Burke (2011) abordaram tanto a intervenção da atribuição (as salas e dias) quanto a intervenção do sequenciamento (sequencia de intervenções nas salas em cada dia). A função objetivo compreende três pontos: tempo de espera do paciente, hora extra do cirurgião e tempo de espera para crianças. O modelo pode incorporar um plano mestre de cirurgias em que as horas das salas de operação são divididas em blocos e alocadas às especialidades. A modelagem baseia-se na indexação temporal de variáveis binárias e um algoritmo de metaheurística é utilizado para resolver o problema. O problema envolve a atribuição de salas de cirurgia e datas para um conjunto de cirurgias eletivas, bem como o agendamento das cirurgias de cada dia e ambiente. Simultaneamente, uma programação é criada para cada cirurgião para evitar reservas duplas. O algoritmo apresentado usa vizinhanças de re-alocação e de trocas e é regido por um esquema de busca local iterada. O tempo de espera do paciente e as horas extras dos cirurgiões foram considerados. O problema envolve atribuição de salas e datas a um conjunto de cirurgias eletivas, assim como o sequenciamento das cirurgias em cada dia do horizonte de tempo considerado para cada sala de operação. Concomitantemente, um cronograma é gerado para cada cirurgião para evitar duplicidade.

Augusto, Xie e Perdomo (2010) investigaram o problema de forma que um número fixo de pacientes deva ser planejado em um horizonte de prazo, geralmente uma ou duas semanas. O processo de cirurgia é modelado como se segue: cada paciente é transportado a partir da divisão para a sala de operações. Em seguida, o paciente visita uma sala de operação para a operação de cirurgia e é transferido para sala de recuperação. Se nenhum leito de recuperação está disponível, o paciente acorda na sala de cirurgia até a cama torna-se disponível. A sala de operações precisa ser limpa após a partida do paciente, antes de iniciar uma outra operação. Finalmente, o paciente é transportado de volta para a enfermaria após sua recuperação. Foi proposto um método baseado em relaxação Lagrangiana para resolver

este problema de programação de sala de operação.

Perdomo, Augusto e Xie (2006) abordam o problema considerando três tipos de recursos: transportadores, salas de cirurgias e leitos de recuperação. O paciente se desloca da ala para a sala e após a realização do procedimento é transferido para os leitos de recuperação. É proposta a relaxação lagrangeana para determinar o mapa de cirurgias de acordo com a atribuição do paciente aos recursos considerados.

3 Modelagem Matemática

3.1 Modelo para médio prazo

Esta seção descreve o modelo para o problema de sequenciamento de cirurgias eletivas baseada no bloco cirúrgico do Hospital em análise. Atualmente são realizados cerca de 30 procedimentos cirúrgicos diariamente neste hospital. O planejamento é realizado para um dia e definido com 48 horas de antecedência para evitar qualquer preparação pré-operatória desnecessária. As demandas pelo uso das salas são enviadas com 72 horas de antecedência. A gerência da unidade decide sobre o local e horário para ocorrência do procedimento cirúrgico, podendo inclusive decidir pelo não atendimento à demanda.

Conforme tratado na seção anterior, existem diferentes abordagens propostas na literatura para tratamento do problema de acordo com as particularidades do hospital em análise. Por meio deste trabalho, foi desenvolvida uma formulação de programação inteira com duas funções objetivo, uma delas visa a maximização da ocupação das salas de cirurgia e a outra, a minimização dos atrasos ponderados. Foram desenvolvidos também modelos reduzidos para a formulação proposta por meio da aplicação de heurísticas construtivas. As restrições e características que compõem a utilização das salas de operações envolvem a identificação dos recursos a seguir para a modelagem:

1. Operações: a prática médica em diversas especialidades aumenta a complexidade do processo de programação cirúrgica.
2. Recursos humanos: preceptores médicos, especialistas em anestesia, instrumentadores e residentes.

3. Recursos materiais: microscópio, para as cirurgias neurológicas por exemplo, intensificador de imagens e leitos.
4. Salas: a demanda pela sala é informada com um indicativo de hora para início da cirurgia.

Ressalta-se que casos de emergência não são considerados no tratamento dado ao problema porque pacientes não-eletivos não são conhecidos a priori e apenas cirurgias agendadas com antecedência estão sendo sequenciadas.

É considerado um horizonte formado por um conjunto D de dias. Cada dia $d \in D$ é dividido em períodos, e T^d é o conjunto de períodos em d . O conjunto de cirurgiões é caracterizado por C , e $T_c^d \subseteq T^d$ é o subconjunto de períodos em que um cirurgião c pode iniciar uma cirurgia no dia d , o conjunto T_c^d representa a janela de tempo do cirurgião c . O conjunto de cirurgias é representado por S , e $S_c \subseteq S$ é o subconjunto de cirurgias a serem realizadas pelo cirurgião c . Dada uma cirurgia $s \in S$, $T_s^d \subseteq T_c^d$ é um subconjunto de períodos que a cirurgia pode iniciar, a janela de tempo da cirurgia s . O conjunto de salas de operação é denotado por R , e $R_s \subseteq R$ é o subconjunto de salas de operação em que uma cirurgia s pode ocorrer. As salas de operação não são idênticas, por este motivo é necessário identificar em quais delas os procedimentos podem ocorrer. Uma sala está em utilização durante a realização de s por d_s períodos, incluindo o tempo de limpeza. Entretanto, cirurgiões e outras pessoas do corpo médico podem iniciar outro procedimento assim que tiverem concluído o anterior. O parâmetro \bar{d}_s inclui apenas o tempo da intervenção cirúrgica.

O conjunto de recursos é representado por K , e g_{sk} é a quantidade do recurso k necessária para realizar a cirurgia s . Um recurso $k \in K$ tem um número q_k de unidades móveis. Nós consideramos um conjunto E de tipos de recursos humanos especializados, e $E_s \subseteq E$ é o subconjunto necessário para realizar a cirurgia s em S . Suponha que $E = \{ \alpha, \beta \}$ seja o conjunto de recursos especializados do hospital dos tipos α e β , sendo $E_{s1} = \{ \alpha \}$ e $E_{s2} = \{ \alpha, \beta \}$ para as cirurgias $s1$ e $s2$, respectivamente. Dado $e \in E$, A^e

S	R	Ti	Tf	D	C	rr1	esp1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S2	R1	19	20	1	C2	0	e1r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
S10	R3	13	16	1	C2	1	e1r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
S12	R4	10	11	1	C4	0	e1r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
S22	R4	16	19	1	C6	1	e1r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	
S94	R2	22	23	1	C2	0	e1r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	
S100	R4	1	3	1	C6	0	e1r1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 1 – Exemplo de resposta do modelo para uma instância real.

é o conjunto de indivíduos tratados de acordo com recursos especializados do tipo e . Por exemplo, $A_\alpha = \{ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \}$ e $A_\beta = \{ \beta_1, \beta_2, \beta_3 \}$.

O subconjunto de períodos em que o recurso especializado $a \in A^e$, $e \in E$, está disponível no dia $d \in D$ corresponde à janela de tempo do indivíduo pertencente ao conjunto de recurso humano especializado e é representado por T_{ea}^d .

Pode acontecer que, dado $s \in S$ e $e \in E_s$, nem todos indivíduos que pertencem a A^e estão disponíveis para realizar a cirurgia s . Então, $A_s^e \subseteq A^e$ é o subconjunto de indivíduos do recurso especializado do tipo e disponíveis para realizar a cirurgia s .

São definidas duas variáveis binárias. A primeira, y_{srt}^d é igual a 1 se a cirurgia $s \in S$ é realizada no dia d , atribuída à sala $r \in R_s$ e é iniciada no tempo $t \in T_s^d$, e 0 caso contrário. A segunda, w_{ast}^d , tem o valor 1 se a cirurgia $s \in S$ é atribuída ao indivíduo $a \in A_s^e$ do recurso especializado do tipo $e \in E_s$ e inicia no período $t \in T_{ea}^d \cap T_s^d$ (o recurso especializado e a sala devem estar disponíveis simultaneamente para realização do procedimento cirúrgico), caso contrário o valor dela é 0. A Figura 1 demonstra um exemplo de resposta do modelo e por meio dele verifica-se que para um mesmo dia, não há sobreposição de cirurgias para uma dada sala e os outros recursos considerados.

3.2 Notação

Os conjuntos definidos para a modelagem e caracterização do problema são evidenciados por meio da notação a seguir:

Conjuntos:

D - Conjunto de dias;

T^d - Conjunto de períodos no dia $d \in D$;

S - Conjuntos de cirurgias;

C - Conjunto de preceptores médicos;

$S_c \subseteq S$ - Conjunto de cirurgias associadas ao preceptor $c \in C$;

$T_c^d \subseteq T^d$ - Conjunto de períodos em que o preceptor $c \in C$ está disponível no dia $d \in D$;

$T_s^d \subseteq T_c^d$ - Conjunto de períodos em que a cirurgia $s \in S_c$, $c \in C$, pode começar no dia $d \in D$;

R - Conjunto de salas;

$R_s \subseteq R$ - Conjunto de salas disponíveis para a cirurgia $s \in S$;

K - Conjunto de recursos renováveis;

E - Conjunto de tipos de recursos especializados;

A^e - Conjunto de recursos especializados do tipo $e \in E$;

$T_{ea}^d \subseteq T^d$ - Conjunto de períodos em que o recurso especializado $a \in A^e$, $e \in E$, está disponível no dia $d \in D$;

$E_s \subseteq E$ - Conjunto de tipos de recursos especializados necessários para a cirurgia $s \in S$;

$A_s^e \subseteq A^e (e \in E_s)$ - Conjunto de recursos especializados que podem realizar a cirurgia $s \in S$;

Parâmetros:

g_{sk} - Quantidade do recurso $k \in K$ utilizada na cirurgia $s \in S$;

q_k - Quantidade de recurso do tipo $k \in K$ disponível;

d_s - Duração da cirurgia $s \in S$ incluindo o tempo de limpeza da sala;

\bar{d}_s - Duração da cirurgia $s \in S$ sem o tempo de limpeza da sala (apenas o procedimento cirúrgico);

Variáveis

$$y_{srt}^d = \begin{cases} 1, & \text{se a cirurgia } s \in S \text{ se inicia na sala } r \in R_s \text{ no tempo } t \in T_s^d, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$w_{ast}^d = \begin{cases} 1, & \text{se aloca o recurso especializado } a \in A^e, e \in E_s, \text{ à cirurgia } s \in S \\ & \text{que se inicia em } t \in T_s^d \cap T_{ea}^d, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

3.3 Restrições

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T_s^d} \sum_{r \in R_s} y_{srt}^d \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (3.1)$$

$$\sum_{s \in S_c} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1|l \in T_s^d}^t \sum_{r \in R_s} y_{srl}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall c \in C, \forall t \in T_c^d \quad (3.2)$$

$$\sum_{s \in S|r \in R_s} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1|l \in T_s^d}^t y_{srl}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall r \in R_s, \forall t \in T^d \quad (3.3)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1|l \in T_s^d}^t \sum_{r \in R_s} g_{sk} y_{srl}^d \leq q_k \quad \forall d \in D, \forall k \in K \quad (3.4)$$

$$\sum_{s \in S|e \in E_s} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1|l \in T_s^d \cap T_{ea}^d}^t w_{asl}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall e \in E, \forall a \in A^e, \forall t \in T_{ea}^d \quad (3.5)$$

$$\sum_{r \in R_s} y_{srt}^d - \sum_{a \in A_s^e|t \in T_{ea}^d} w_{ast}^d \leq 0 \quad \forall d \in D, \forall s \in S, \forall e \in E_s, \forall t \in T_s^d \quad (3.6)$$

$$y_{srt}^d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall s \in S, \forall r \in R_s, \forall t \in T_s^d \quad (3.7)$$

$$w_{ast}^d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall s \in S, \forall e \in E_s, \\ \forall a \in A_s^e, \forall t \in T_s^d \cap T_{ea}^d \quad (3.8)$$

A restrição (3.1) garante que uma cirurgia não seja realizada mais de uma vez. A sobreposição de cirurgias é evitada pelas restrições (3.2) e (3.3): a primeira evita que um cirurgião inicie uma cirurgia sem ter concluído a anterior; a segunda impede que uma sala seja utilizada por duas cirurgias

ao mesmo tempo, ou seja, uma sala só pode ser alocada para outra cirurgia assim que estiver desocupada, considerando o tempo de ocupação como o somatório dos tempo de execução do processo cirúrgico e o tempo de limpeza da sala. Note que um cirurgião está liberado para iniciar outra cirurgia após a duração \bar{d}_s , enquanto uma sala é ocupada por um período d_s . A Restrição (3.4) é de capacidade associada aos recursos físicos, aquele recurso $k \in K$ utilizado durante \bar{d}_s possui sua disponibilidade limitada por q_k . Restrições (3.5) e (3.6) associam os recursos humanos especializados às cirurgias. A primeira garante que dada uma cirurgia s planejada para iniciar no período $\in T_s^d$, um indivíduo $a \in A_s^e$ de cada tipo de recurso especializado $e \in E_s$ deve ser atribuído de acordo com a janela de tempo T_{ea}^d , de forma que ele seja alocado a no máximo uma cirurgia ao longo da duração do procedimento, sem considerar o tempo de limpeza. A segunda garante a alocação da sala para realização de uma dada cirurgia em um determinado período caso o recurso especializado esteja alocado a ela e vice versa. Tem a função de acoplar as duas variáveis de decisão do modelo, que estão relacionada aos recurso físicos (salas) e humanos durante a realização das cirurgias. Finalmente, restrições (3.7) e (3.8) definem o domínio das variáveis. A primeira está relacionada à realização das cirurgias nas salas e a segunda, à alocação do recurso humano à cirurgia simultaneamente com a disponibilidade da sala.

São consideradas duas funções objetivo para o tratamento do problema, descritas a seguir.

3.4 Funções Objetivo

A modelagem do problema é realizada para otimizar um critério de avaliação de desempenho considerando a escassez de recursos em um bloco cirúrgico. São definidas duas políticas, uma de maximizar a ocupação do centro cirúrgico e outra de minimizar o atraso ponderado na realização de procedimentos cirúrgicos. Cada uma destas políticas é descrita a seguir.

Maximizando utilização

Uma das medidas da performance em hospitais é o nível de ocupação. Neste caso, as cirurgias são sequenciadas com o objetivo de maximizar o uso das salas de operação, de forma que seja realizado o maior número de procedimentos possível no atendimento às diversas especialidades de um hospital.

A duração de cada cirurgia d_s é um dado de entrada. A variável y_{srt}^d indica se uma dada cirurgia s irá ou não ocorrer em determinada sala de operação r em um determinado período de tempo t do dia d . O objetivo maximiza então o somatório da duração dos procedimentos cirúrgicos s programados para o horizonte de tempo considerado. A função objetivo para este caso é evidenciada a seguir:

$$\max \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{t \in T_s^d} \sum_{r \in R_s} d_s y_{srt}^d \quad (3.9)$$

sujeito a (3.1) - (3.8)

Minimizando atraso ponderado

A outra medida de performance aplicada na modelagem do problema é a realização do procedimento no horário agendado. O objetivo neste caso consiste em minimizar o atraso na realização de cirurgias.

São definidos dois tipos de atraso e para cada um deles é aplicada uma penalidade específica. Dado o horizonte de planejamento considerado, a cirurgia pode ocorrer com atraso neste horizonte ou pode não ocorrer neste período de tempo considerado, havendo portanto a necessidade de reprogramação para o próximo período. No primeiro caso, é considerado custo o_s^v da cirurgia s ser realizada v dias após uma determinada data θ_s . No segundo caso, é atribuído o custo p_s de não realização da cirurgia s dentro do horizonte de planejamento.

Algumas cirurgias devem ser realizadas antes do último dia da semana. Por isso é necessário atribuir pesos de acordo com níveis de atraso para avaliar o desempenho do modelo. Seja o conjunto $S_u \subseteq S$ de cirurgias

com prazos de realização, o que garante tratar o problema de forma a possibilitar o balanceamento de *mix* dos procedimentos. O prazo θ_s é o último dia (antes do último dia do horizonte) em que a cirurgia $s \in S_u$ pode ser realizada sem que haja penalidade. Se a cirurgia $s \in S_u$ é realizada v dias após θ_s , então implicará em uma penalidade do tipo o_s^v . Se alguma cirurgia $s \in S$ não é sequenciada, então a penalidade é do tipo p_s .

A primeira parcela da função objetivo está relacionada ao custo de não realização. Dados todos os custos de não realização das cirurgias, parâmetro de entrada, será contabilizado apenas o somatório daquelas que serão reprogramadas para o próximo período.

A segunda parcela da função objetivo é afetada pelo custo de atraso referente a cirurgias reprogramadas dentro do horizonte de tempo considerado. É o caso de realização da cirurgia v dias após à data limite θ_s . As cirurgias com esta data limite compõem o conjunto S_u , considerado no somatório da segunda parcela da função objetivo de minimizar o atraso.

A função objetivo para este caso é dada pela minimização do somatório dos custos de atraso ponderado. A função objetivo para este caso e os parâmetros aplicados a ela estão definidos como se segue:

Parâmetros:

$S_u \subseteq S$ - Conjunto de cirurgias com data para realização (*due-date*);

$\theta_s \in D$ - Data (dia) máxima preferencial para realização da cirurgia $s \in S_u$;

p_s - Custo de não realização da cirurgia $s \in S$ dentro do horizonte de planejamento;

o_s^v - Custo da cirurgia $s \in S$ ser realizada v dias após a data θ_s ;

$$\min \sum_{s \in S} p_s \left(1 - \sum_{d \in D} \sum_{r \in R_s} \sum_{t \in T_s^d} y_{srt}^d \right) + \sum_{s \in S_u} \sum_{v=1}^{|T|-\theta_s} \sum_{r \in R_s} \sum_{t \in T_s^{v+\theta_s}} o_s^v y_{srt}^{v+\theta_s} \quad (3.10)$$

sujeito a (3.1) - (3.8)

3.5 Experimentos Computacionais

Foram gerados resultados computacionais para as duas funções objetivo do modelo enunciado na seção anterior. A análise foi realizada para dois grupos de cinco instâncias. O horizonte considerado é de 7 dias, dividido em 24 períodos de meia hora cada. Há um único tipo de recurso humano especializado, os anestesiistas, com 10 indivíduos. Um conjunto de instâncias é formado por 240 cirurgias e 5 salas de operação. O segundo conjunto é composto por 360 cirurgias e 10 salas de operações. Os cenários considerados baseiam-se em características do contexto em estudo.

Os modelos foram implementados na linguagem AMPL e resolvidos utilizando o pacote CPLEX versão 12.4. A máquina utilizada para gerar os experimentos é uma estação Intel Xeon X5690 com 24 processadores de 3.4Ghz e 132GB de memória RAM, cujo sistema operacional é o Linux Ubuntu 64 bits. O tempo limite considerado corresponde a 21600s e a opção de execução do pré-solver foi habilitada por meio do parâmetro "pre-solve = 1".

I	S	R	$\sum_{s \in S} d_s$	IP Model			Linear Relaxation			
				LB	gap(%)	t(s)	UB	t(s)	$w, y > 0$	$w, y = 1$
s240r5i0	240	5	1268	779	0.00	1364	779	172	2400	106
s240r5i1	240	5	1106	676	0.00	834	676	141	2115	172
s240r5i2	240	5	1078	780	0.00	1094	780	197	2552	141
s240r5i3	240	5	1107	765	0.00	494	765	107	2463	99
s240r5i4	240	5	1045	759	0.00	500	759	171	2667	181
s360r10i0	360	10	1330	0	100.00	21602	1330	974	4194	15
s360r10i1	360	10	1763	1307	0.00	17426	1307	761	3856	7
s360r10i2	360	10	1493	1161	20.97	21601	1469	1178	4388	2
s360r10i3	360	10	1688	1456	0.27	21607	1460	992	4123	19
s360r10i4	360	10	1503	1151	21.49	21601	1466	835	4035	9

Tabela 1 – Resultados maximizando utilização.

A Tabela 1 contém os resultados para o caso de maximizar a ocupação. As primeiras 3 colunas são, respectivamente, a identificação da instância, o número de cirurgias e o número de salas de operação. Na quarta coluna, há o registro do limite superior trivial, obtido pelo somatório da duração de todas as cirurgias. As próximas três colunas são o limite inferior, o gap percentual de otimalidade e o tempo em segundos para obtenção dos

I	S	R	IP Model			Linear Relaxation			
			UB	gap(%)	t(s)	LB	t(s)	$w, y > 0$	$w, y = 1$
s240r5i0	240	5	157.31	0.10	21917	157.15	70	2614	101
s240r5i1	240	5	143.07	0.10	21878	142.93	76	2479	157
s240r5i2	240	5	85.21	0.21	22013	85.03	63	2716	159
s240r5i3	240	5	94.94	0.02	22150	94.92	67	2727	140
s240r5i4	240	5	93.92	0.53	21992	93.42	71	2665	140
s360r10i0	360	10	2011.69	100.00	21920	0.00	371	4282	24
s360r10i1	360	10	384.23	72.45	22072	105.86	250	3713	9
s360r10i2	360	10	2152.08	99.89	22579	2.29	530	4366	11
s360r10i3	360	10	2206.28	98.33	22053	36.81	324	3759	23
s360r10i4	360	10	2140.29	99.83	22275	3.7	329	3989	9

Tabela 2 – Resultados minimizando atraso ponderado.

resultados do modelo de programação inteira implementado. O gap é calculado em relação ao limite obtido pela relaxação linear. As variáveis do modelo foram relaxadas e obteve-se o seguinte resultado: limite superior, o tempo em segundos, o número de variáveis maiores que zero e o número de variáveis iguais a um na solução ótima para o modelo relaxado. Utilizando o CPLEX, obteve-se a otimalidade para as instâncias com 240 cirurgias, o mesmo não ocorre para as instâncias de 360 cirurgias. Para as instâncias de 360 cirurgias, os limites inferiores foram obtidos durante a fase pré-solver, e obteve-se a solução ótima dentro dos limites computacionais apenas para a instância s360r10i1. O modelo fornece limites de relaxação linear apertados, como pode ser verificado comparando-se a coluna de UB da relaxação linear ao LB.

A Tabela 2 evidencia os resultados para a minimização dos atrasos ponderados. As colunas apresentam estrutura semelhante à da Tabela 1.

Para a função objetivo de minimizar, os custos das penalidades foram estabelecidos de acordo com uma função convexa com os dias ultrapassando os prazos, uma vez que quanto mais distante da data definida para realização da cirurgia, maior o nível de atraso e maior a penalidade atribuída por meio da função objetivo. Dado um valor de referência c_s , a penalidade por realizar a cirurgia com atraso mas dentro do horizonte de tempo considerado é dada por $o_s^v = c_s v(1+i)^{(v-1)}$, a penalidade por não realizar a cirurgia $s \in S_u$ é $p_s = c_s(v_{max} + 1)(1+i)^{(v_{max})}$, sendo que $p_s = c_s$ para a cirurgia $s \in S \setminus S_u$.

Para este modelo, utilizando o pacote CPLEX não obteve-se otimalidade

para as instâncias consideradas, mas para o primeiro cenário verifica-se limites apertados. Já para o segundo cenário (360 cirurgias) a distância entre o valor do UB e os limites da relaxação linear são bem grandes. Assim como para a outra função objetivo, verifica-se que neste caso há necessidade em nova abordagem para resolver instâncias de 360 cirurgias.

Os resultados permitem uma avaliação do modelo matemático proposto. De acordo com eles verifica-se que a relaxação é forte para a primeira formulação e é possível utilizar uma heurística de arredondamento. Já para a segunda formulação, a relaxação é forte apenas para o primeiro cenário considerado, que corresponde a 240 cirurgias e 5 salas de operação. Pelos resultados conclui-se que o modelo é útil para apoiar as decisões envolvidas no planejamento do processo cirúrgico e pode embasar o desenvolvimento de novas abordagens que contemplem o contexto em análise.

4 Abordagens heurísticas

O objetivo deste Capítulo é introduzir os procedimentos heurísticos para o desenvolvimento de algoritmos e aplicação. A utilização de técnicas heurísticas faz-se necessária para a obtenção de boas soluções ao problema com fins de rapidez de processamento, principalmente para instâncias com maior número de cirurgias. O mapa cirúrgico do hospital é atualizado frequentemente e a execução com o método exato, conforme Capítulo 3, ultrapassou o tempo definido para algumas instâncias, o que leva à necessidade de um novo tratamento ao problema para reduzir o tempo de resposta do sistema.

O presente Capítulo está organizado da seguinte forma: primeiramente é enunciada uma nova formulação para modelar o problema de sequenciamento de cirurgias. Algumas mudanças na formulação inicial foram realizadas para permitir o desdobramento do problema e a aplicação de quatro abordagens heurísticas. Em um segundo momento, cada abordagem, que pode ser executada para uma das duas funções objetivo (3.9) ou (3.10), é enunciada.

4.1 Procedimento de aplicação das abordagens heurísticas

Uma nova modelagem para o problema, denominada Formulação H_x , é enunciada doravante neste capítulo. Comparativamente com o modelo proposto no Capítulo 3, foi inserida a variável x binária com o propósito de fixar somente as cirurgias que devem ser executadas em cada dia no horizonte de tempo considerado. A partir deste ponto, quatro procedimentos heurísticos foram desenvolvidos relaxando as variáveis y e w da Formulação H_x . Cada uma das quatro abordagens utiliza o resultado do novo modelo para resolver o problema relaxado de sequenciamento de cirurgias como uma forma de obter uma solução inicial. O procedimento de aplicação destas abordagens na resolução do problema em partes menores, ou seja para

cada dia do horizonte de tempo considerado, é descrita a seguir.

A primeira Abordagem é denominada d_{yw} e apresenta as duas variáveis de decisão, y e w , binárias. Por meio da execução da formulação H_x , ela obtém o conjunto de cirurgias pré-selecionadas em cada subperíodo. O problema é então dividido em partes menores para definição do sequenciamento no horizonte de tempo considerado. Após a alocação de cirurgias aos dias, é realizada a alocação dos recursos físicos e humanos necessários ao longo da abordagem para viabilizar o procedimento cirúrgico.

A segunda, identificada por Abordagem d_{zw} , apresenta também duas variáveis de decisão, w e z , sendo a primeira binária e a segunda contínua para cirurgias com salas e períodos pré-agendados no dia $d \in D$ resolvendo a abordagem d_{yw} com a restrição 4.18, referente ao domínio da variável w , relaxada. Após a atribuição das cirurgias aos dias viabilizada pela formulação H_x e a execução da Abordagem d_{yw} para realizar o pré-agendamento cirúrgico ao fixar o conjunto de variáveis y , o sequenciamento da segunda abordagem é seguido pela atribuição de recursos especializados.

A terceira, denominada Abordagem dl_{zw} , apresenta as variáveis de decisão w e z . A primeira é binária e a segunda é contínua para cirurgias com salas e períodos pré-agendados no dia $d \in D$ a partir do valor da variável y^d resolvendo a formulação H_x . Desta forma, a formulação H_x é executada e as variáveis x e y são fixadas para cada dia $d \in D$ definindo o pré-agendamento cirúrgico. Após a atribuição das cirurgias aos dias e a realização do pré-agendamento viabilizados pela execução da formulação H_x , a terceira abordagem é executada de forma a determinar o sequenciamento promovendo a atribuição de recursos especializados.

A quarta é enunciada por Abordagem dlc_{zw} . Ela apresenta as variáveis de decisão w e z , sendo a primeira binária e a segunda contínua para cirurgias com salas e períodos pré-agendados no dia $d \in D$ a partir de um critério de seleção do valor da variável y^d resolvendo a formulação H_x . Desta forma, a formulação H_x é executada e as variáveis x e y são fixadas para cada dia $d \in D$ definindo as cópias do pré-agendamento cirúrgico. Após a atribuição das cirurgias aos dias e a realização das cópias de

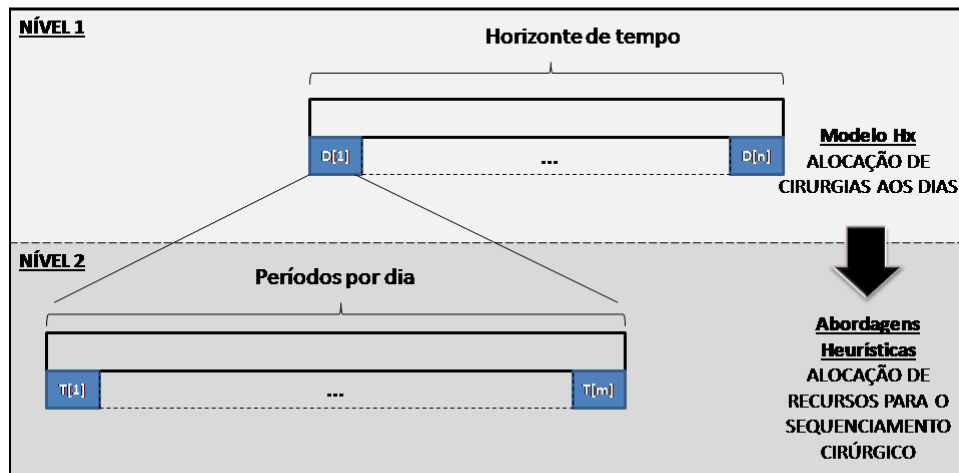


Figura 2 – Níveis da análise para resolução do problema na aplicação da heurística.

pré-agendamento viabilizadas pela execução da formulação H_x conforme o critério de seleção para fixação de y , a quarta abordagem é executada para que a atribuição de recursos especializados ocorra aos casos de confirmação do agendamento.

O método de otimização empregado trata-se de uma heurística construtiva com a utilização de modelos matemáticos. Para cada uma das funções objetivo (3.9) ou (3.10), o modelo relaxado é resolvido dentro de cada abordagem heurística para se obter uma alocação de cirurgias aos dias em nível agregado e posteriormente conduzir à desagregação da informação para obtenção de uma solução viável.

A proposta consiste na resolução do problema em dois níveis de análise, conforme Figura 2. No nível 1 ocorre a alocação de cirurgias aos dias, dado de entrada para o próximo nível. O nível 2 define a alocação tanto de recursos humanos como de recursos físicos em cada subproblema do nível anterior, o que resulta no sequenciamento de cirurgias para o horizonte de tempo considerado.

A política de sequenciamento definida neste Capítulo tem como obje-

tivo a maximização ponderada em cada dia fixado no horizonte de tempo, observando as restrições operacionais. O procedimento para a definição da função objetivo que compõe as abordagens é detalhado conforme se segue.

Função objetivo de maximização ponderada no dia $d \in D$

Considerando as funções objetivo da modelagem enunciada no Capítulo 3, a saber (3.9) e (3.10), a função objetivo de maximização ponderada no dia $d \in D$ pode ser definida para a execução das abordagens heurísticas.

Dado que as abordagens são executadas após a escolha das cirurgias no dia, existe uma definição a respeito daqueles procedimentos cirúrgicos que ocorrem no horizonte de tempo considerado e daquelas que devem ser reprogramadas para o próximo período.

Portanto, minimizar a não realização, que corresponde à primeira parcela de (3.10), significa maximizar a ocupação, que corresponde a (3.9). Este raciocínio é representado pela equação abaixo:

$$\min \sum_{s \in X^d} p_s (1 - \sum_{r \in R_s} \sum_{t \in T_s^d} y_{srt}) = \max \sum_{s \in X^d} \sum_{r \in R_s} \sum_{t \in T_s^d} p_s y_{srt}$$

Observa-se pela equação que o somatório de p_s tende a zero uma vez que a perda, ou custo de não realização, está sendo minimizada. Portanto p_s é equivalente a d_s . Tem-se ainda que para a maximização da utilização no dia $d \in D$, ρ_s assume o valor de d_s . E minimizando o cancelamento ponderado no dia $d \in D$, tem-se que ρ_s assume o valor de p_s . Diante da correspondência verificada, sendo que ρ_s assume d_s ou p_s , a função objetivo da abordagem por maximização ponderada no dia $d \in D$ pode ser definida da seguinte forma:

$$\max \sum_{s \in X^d} \sum_{t \in T_s^d} \sum_{r \in R_s} \rho_s y_{srt} \quad (4.1)$$

sujeito a (4.12) - (4.18)

4.2 Formulação H_x

Com intuito de realizar a análise do problema para cada dia, a formulação H_x é definida. Uma nova variável é inserida, a variável x , e adaptações nas restrições foram estabelecidas para permitir a formação de subproblemas. A formulação H_x é válida para o problema se as variáveis y e w são mantidas binárias. Porém, o intuito é relaxar as variáveis y e w mantendo apenas a variável x como binária. Assim, o novo modelo aloca as cirurgias aos dias para que as abordagens sejam aplicadas na resolução de cada subproblema e objetivem no melhor sequenciamento em cada dia do horizonte de tempo considerado. Cada subproblema é então resolvido em etapas. Trata-se portanto de um modelo de atribuição executado no primeiro nível para fornecer informações ao próximo nível resultando no sequenciamento ao longo do período considerado.

A notação da formulação é evidenciada a seguir.

Variáveis:

$$y_{srt}^d = \begin{cases} 1, & \text{se a cirurgia } s \in S \text{ se inicia na sala } r \in R_s \text{ no tempo } t \in T_s^d, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$w_{ast}^d = \begin{cases} 1, & \text{se aloca o recurso especializado } a \in A^e, e \in E_s, \text{ à cirurgia} \\ & s \in S \text{ que se inicia em } t \in T_s^d \cap T_{ea}^d, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$x_s^d = \begin{cases} 1, & \text{se a cirurgia } s \in S \text{ se inicia no dia } d \in D \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

4.3 Restrições

$$\sum_{d \in D} x_s^d \leq 1 \quad \forall s \in S \quad (4.2)$$

$$x_s^d - \sum_{t \in T_s^d} \sum_{r \in R_s} y_{srt}^d = 0 \quad \forall s \in S, \forall d \in D \quad (4.3)$$

$$\sum_{s \in S_c} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1}^t \sum_{r \in R_s} y_{srl}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall c \in C, \forall t \in T_c^d \quad (4.4)$$

$$\sum_{s \in S | r \in R_s} \sum_{l=t-d_s+1}^t y_{srl}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall r \in R, \forall t \in T^d \quad (4.5)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1}^t \sum_{r \in R_s} g_{sk} y_{srl}^d \leq q_k \quad \forall d \in D, \forall t \in T^d, \forall k \in K \quad (4.6)$$

$$\sum_{s \in S | a \in A_s^e} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1}^t w_{asl}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall e \in E, \forall a \in A^e, \forall t \in T_{ea}^d \quad (4.7)$$

$$\sum_{r \in R_s} y_{srt}^d - \sum_{a \in A_s^e | t \in T_{ea}^d} w_{ast}^d \leq 0 \quad \forall d \in D, \forall s \in S, \forall e \in E_s, \forall t \in T_s^d \quad (4.8)$$

$$0 \leq y_{srt}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall s \in S, \forall r \in R_s, \forall t \in T_s^d \quad (4.9)$$

$$0 \leq w_{ast}^d \leq 1 \quad \forall d \in D, \forall s \in S, \forall e \in E_s, \forall a \in A_s^e, \forall t \in T_s^d \cap T_{ea}^d \quad (4.10)$$

$$x_s^d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, \forall s \in S \quad (4.11)$$

A formulação H_x possui uma restrição a mais em relação ao modelo enunciado na seção 3, a restrição (4.2) que permite fixar as cirurgias em um dos dias do horizonte de tempo considerado, ou seja, dado que a cirurgia seja realizada, ela deve ocorrer em apenas um dos dias deste horizonte. A restrição (4.3), que foi adaptada em relação à restrição (3.1) do modelo original, garante que dada uma cirurgia a ocorrer em um dado dia, deve haver sala disponível no momento em que ela for realizada. A restrição faz o acoplamento entre as variáveis x que determinam a realização da cirurgia no dia e as variáveis y que indicam a disponibilidade da sala para realização da cirurgia no momento em que o procedimento cirúrgico for ocorrer. As restrições (4.4) a (4.8) correspondem às restrições (3.2) a (3.6) respectivamente. As restrições (4.9), (4.10) e (4.11) definem o domínio das variáveis de decisão do modelo. Neste modelo, as variáveis de decisão relacionadas à alocação de salas, y , e de recursos especializados, w , são relaxadas. Já as variáveis relacionadas à alocação de cirurgias aos dias, x , são binárias, elas permitem a formação de subproblemas, um para cada dia, e a aplicação das abordagens a serem detalhadas nas próximas subseções. São consideradas as funções objetivo (3.9) e (3.10), que assim como os conjuntos e parâmetros da formulação, já foram exploradas no Capítulo 3.

4.4 Abordagem $d_{yw}(d, x^d)$

A Abordagem d_{yw} possui as variáveis y e w binárias para cirurgias pré-selecionadas no dia $d \in D$. Em um primeiro estágio, a formulação H_x é executada com uma das funções objetivo (3.9) ou (3.10). Posteriormente a abordagem viabiliza a definição do sequenciamento em cada dia fixado.

A formulação H_x é executada e resulta na definição do conjunto de cirurgias X^d pré-selecionadas para um dado dia do horizonte de tempo. A atribuição de cirurgias aos dias (primeiro nível de análise para a aplicação da heurística), informação proveniente do primeiro passo do pseudocódigo referente à abordagem d_{yw} , é então utilizada como entrada pela abordagem, de maneira a determinar o segundo nível de análise, que corresponde à alocação dos recursos em cada dia $d = 1, \dots, |D|$. Desta forma, o conjunto X^d é definido por dia e a abordagem resolve o problema decomposto para cada dia promovendo a atribuição das salas e recursos humanos às cirurgias pré-alocadas.

O pseudocódigo para esta abordagem é evidenciado a seguir:

1 Abordagem d_{yw} :

Passo 1 - Executar o modelo H_x , c.f., (4.2)-(4.11);

Passo 2 - Definir os conjuntos $X^d, \forall d \in D$, a partir do resultado;

Passo 3 - Para $d = 1, \dots, |D|$;

Passo 3.1 - Executar o modelo $d_{yw}(d, x^d)$, c.f., (4.12)-(4.18)

4.5 Notação

O problema é decomposto para cada dia, portanto é definido o conjunto X^d de cirurgias que são pré-selecionadas, determinadas pela Formulação H_x . As cirurgias pré-selecionadas associadas ao preceptor $c \in C$ são agrupadas pelo subconjunto $X_c^d \subseteq X^d$. Assim, X_c^d é um subconjunto de X^d que indica a correspondência do preceptor à cirurgia. Como existe um conjunto de cirurgias $s \in X^d$ pré-selecionadas para o dia $d \in D$ e o modelo é

executado para cada subproblema, as variáveis estão indexadas em s , r e t conforme verifica-se a seguir na definição dos conjuntos.

Conjuntos:

X^d - Conjunto de cirurgias pré-selecionadas para o dia $d \in D$, i.e.,
 $X^d = \{s \in S \mid x_s^d = 1\}$;

X_c^d - Conjunto de cirurgias pré-selecionadas para o dia $d \in D$ associadas ao preceptor $c \in C$, i.e., $X_c^d = S_c \cap X^d$;

Variáveis:

$y_{srt} = \begin{cases} 1, & \text{se a cirurgia } s \in X^d \text{ se inicia na sala } r \in R_s \text{ no tempo } t \in T_s^d, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

$w_{ast} = \begin{cases} 1, & \text{se aloca o recurso especializado } a \in A^e, e \in E_s, \text{ à cirurgia} \\ & s \in X^d \text{ que se inicia em } t \in T_s^d \cap T_{ea}^d, \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$

4.6 Restrições para o dia $d \in D$

$$\sum_{s \in X_c^d} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1}^t \sum_{r \in R_s} y_{srl} \leq 1 \quad \forall c \in C, \forall t \in T^d \quad (4.12)$$

$$\sum_{s \in X^d \mid r \in R_s} \sum_{l=t-d_s+1}^t y_{srl} \leq 1 \quad \forall r \in R, \forall t \in T^d \quad (4.13)$$

$$\sum_{s \in X^d} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1}^t \sum_{r \in R_s} g_{sk} y_{srl} \leq q_k \quad \forall t \in T^d, \forall k \in K \quad (4.14)$$

$$\sum_{s \in X^d \mid a \in A_s^e} \sum_{l=t-\bar{d}_s+1}^t w_{asl} \leq 1 \quad \forall e \in E, \forall a \in A^e, \forall t \in T_{ea}^d \quad (4.15)$$

$$\sum_{r \in R_s} y_{srt} - \sum_{a \in A_s^e \mid t \in T_{ea}^d} w_{ast} \leq 0 \quad \forall s \in X^d, \forall e \in E_s, \forall t \in T_s^d \quad (4.16)$$

$$y_{srt} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in X^d, \forall r \in R_s, \forall t \in T_s^d \quad (4.17)$$

$$w_{ast} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in X^d, \forall e \in E_s, \\ \forall a \in A_s^e, \forall t \in T_s^d \cap T_{ea}^d \quad (4.18)$$

A restrição (4.12) trata-se da janela de tempo do cirurgião, ou seja, em um determinado período de um dado dia, o profissional pode executar no máximo uma cirurgia por vez. O raciocínio análogo é utilizado para definir a janela de tempo da sala de operação, o que é determinado na restrição (4.13). A restrição de capacidade do recurso K para cada período do dia é dado pela restrição (4.14). As restrições (4.15) e (4.16) estão relacionadas à alocação de recursos especializados, sendo que esta permite haver recurso alocado a uma cirurgia que pode não ocorrer, mas não permite a realização de uma cirurgia sem a garantia de alocação de recursos. O domínio das variáveis é representado pelas restrições (4.17) e (4.18).

4.7 Abordagem $d_{zw}(d, y)$

A Abordagem d_{zw} apresenta dois conjuntos de variáveis, as variáveis w , que são binárias e definem a alocação do recurso humano especializado, e as variáveis z , que são contínuas e estão relacionadas à confirmação do pré-agendamento de cirurgias. Para esta abordagem, existe um conjunto de cirurgias pré-agendadas Υ que é definido pela Formulação H_x , por meio da atribuição das cirurgias aos dias, e pela Abordagem d_{yw} que permite fixar os valores de y , variável associada ao pré-agendamento de salas e períodos.

Portanto, no primeiro nível de resolução do problema ocorre a atribuição das cirurgias aos dias, viabilizada pela formulação H_x . Desta forma o conjunto $X^d, \forall d \in D$ é definido para prosseguimento das etapas de aplicação da heurística desta abordagem. Em um segundo momento, ocorre a definição do pré-agendamento de salas e períodos em d , parâmetro de d_{zw} , pela abordagem d_{yw} . Com base nestas informações originadas por meio da execução da Formulação H_x e da abordagem d_{yw} , a presente abordagem define a atribuição de recursos humanos para viabilizar o sequenciamento no horizonte de tempo considerado.

Ainda sobre a estratégia em se executar a abordagem d_{yw} , tem-se que os valores das variáveis y iguais a um são fixados como parâmetros de d_{zw} . Dados os valores \bar{y} numa solução ótima da formulação d_{yw} com a restrição (4.18) relaxada, uma cirurgia s é pré-agendada na sala η_s e no período τ_s

associados à variável \bar{y}_s inteira, i.e., $\bar{y}_s \eta_s \tau_s = 1$. O pré-agendamento de cirurgias é então verificado por meio da variável z , resultando na definição de quais recursos devem ser alocados para a cirurgia selecionada.

O pseudocódigo da abordagem d_{zw} pode ser verificado como se segue:

1 Abordagem d_{zw} :

Passo 1 - Executar o modelo H_x ;

Passo 2 - Definir os conjuntos $X^d, \forall d \in D$, a partir do resultado;

Passo 3 - Para $d = 1, \dots, |D|$;

Passo 3.1 - Executar o modelo $d_{yw}(d, x^d)$ com as variáveis w relaxadas;

Passo 3.2 - Definir os parâmetros η_s e $\tau_s, \forall s \in X^d$, a partir do resultado;

Passo 3.3 - Definir os conjuntos $\Upsilon, \bar{\Lambda}_s$, e \bar{A}_s^c ;

Passo 3.4 - Executar o modelo $d_{zw}(d, y)$, c.f., (4.19)-(4.22);

4.8 Notação

O conjunto Υ é definido após a atribuição das cirurgias aos dias pela formulação H_x e a partir dos valores \bar{y} da abordagem d_{yw} com a variável w , relacionada à alocação de recursos humanos, relaxada. Ele corresponde ao agrupamento de cirurgias pré-agendadas. Pelo fato de w estar relaxada, duas cirurgias podem ser pré-agendadas de forma a gerar sobreposição à ocorrência $s \in \Upsilon$, agrupamento representado pelo conjunto $\bar{\Lambda}_s$. Para definição dos recursos que de fato serão alocados, de forma a evitar a sobreposição, define-se o conjunto de recursos especializados que podem realizar a cirurgia $s \in \Upsilon$ no período $\tau_s \in T_{ea}^d$ e na sala η_s .

Conjuntos:

Υ - Conjunto de cirurgias pré-agendadas, i.e.,

$$\Upsilon = \{s \in X^d \mid \sum_{r \in R_s} \sum_{t \in T_s^d} y_{srt} = 1\};$$

$\bar{\Lambda}_s$ - Conjunto das cirurgias pré-agendadas ($s' \in \Upsilon, s \neq s'$) que ocorrem com sobreposição à ocorrência da cirurgia $s \in \Upsilon$;

\bar{A}_s^e - Conjunto de recursos especializados que podem realizar a cirurgia $s \in \Upsilon$ no período pré-agendado, i.e., $\bar{A}_s^e = \{a \in A_s^e | \tau_s \in T_{ea}^d\}$;

Parâmetros:

Dados os valores \bar{y} numa solução ótima da formulação d_{yw} com a restrição (4.18) relaxada, uma cirurgia s é pré-agendada na sala η_s e no período τ_s associados à variável \bar{y}_s inteira, i.e., $\bar{y}_{s\eta_s\tau_s} = 1$.

Variáveis:

$$w_s^a = \begin{cases} 1, & \text{se aloca o recurso especializado } a \in \bar{A}_s^e, e \in E_s, \text{ à cirurgia } s \in \Upsilon \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

$$z^s = \begin{cases} 1, & \text{se o pré-agendamento da cirurgia } s \in \Upsilon \text{ não for confirmado} \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases}$$

4.9 Restrições

$$w_s^a + \sum_{s' \in \bar{\Lambda}_s | a \in \bar{A}_s^e} w_{s'}^a \leq 1 \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s, \forall a \in \bar{A}_s^e \quad (4.19)$$

$$\sum_{a \in \bar{A}_s^e} w_s^a + z_s = 1 \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s \quad (4.20)$$

$$0 \leq z_s \leq 1 \quad \forall s \in \Upsilon \quad (4.21)$$

$$w_s^a \in \{0, 1\} \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s, \forall a \in \bar{A}_s^e \quad (4.22)$$

A restrição (4.19) evita a sobreposição de cirurgias e a restrição (4.20) associa a alocação de recurso humano especializado à confirmação de cirurgias pré-agendadas. As restrições (4.21) e (4.22) estão relacionadas às variáveis de decisão, sendo que z_s é relaxada.

Com a presença de uma nova variável nesta abordagem, a variável z_s relacionada à confirmação do pré-agendamento, a função objetivo das abordagens enunciada no início deste capítulo, passa a considerar o critério de minimização ponderada sendo representada da seguinte forma:

4.10 Função Objetivo

Função objetivo de minimização ponderada no dia $d \in D$

$$\begin{aligned} \min \sum_{s \in \Upsilon} \rho_s z_s & \quad (4.23) \\ \text{sujeito a (4.19) - (4.21)} \end{aligned}$$

A definição da função objetivo neste caso é análoga ao explicitado na seção 4.1.

4.11 Abordagem $dl_{zw}(d, x^d, y^d)$

A Abordagem dl_{zw} é uma formulação de programação inteira mista com variáveis w binárias e z contínuas para cirurgias com salas e períodos pré-agendados no dia $d \in D$ a partir do valor da variável y^d resolvendo a formulação H_x com uma das funções objetivo (3.9) ou (3.10). Os parâmetros η_s e τ_s são definidos de acordo com um critério de pré-agendamento. O pseudocódigo descrito pode ser verificado a seguir:

1 Abordagem dl_{zw} :

Passo 1 - Executar o modelo H_x ;

Passo 2 - Definir os conjuntos $X^d, \forall d \in D$, a partir do resultado;

Passo 3 - Para $d = 1, \dots, |D|$;

Passo 3.1 - Definir os parâmetros η_s e $\tau_s, \forall s \in X^d$, a partir do resultado;

Passo 3.2 - Definir os conjuntos $\Upsilon, \bar{\Lambda}_s, \Lambda_s, \Gamma_r$, e \bar{A}_s^e ;

Passo 3.3 - Executar o modelo $dl_{zw}(d, x^d, y^d)$, c.f., (4.24)-(4.30);

4.12 Notação

O pré-agendamento é definido no dia $d \in D$ a partir da variável y^d resultante da execução da Formulação H_x . Sendo que são selecionados aqueles y^d de acordo com o critério de seleção: dados os valores \bar{y}^d numa solução

ótima da formulação H_x , uma cirurgia s é pré-agendada no período e na sala associados ao maior valor de \bar{y}_s^d , i.e., $(\eta_s, \tau_s) = \arg \max_{(r,t) \in R_s \times T_s^d} \{\bar{y}_{srt}^d\}$. Como as variáveis da formulação H_x estão relaxadas, pode haver sobreposição de cirurgias para $s \in X^d$, define-se portanto o conjunto Λ_s de cirurgias pré-agendadas que ocorrem com sobreposição à ocorrência da cirurgia $s \in \Upsilon$ considerando o tempo de limpeza das salas. O conjunto de cirurgias $s \in \Upsilon$ pré-agendadas na sala $r \in R$, tal que $\eta_s = r$, é dado por Γ_r .

Conjuntos:

Υ - Conjunto de cirurgias pré-agendadas, i.e., $\Upsilon = \{s \in X^d \mid \bar{y}_{s\eta_s\tau_s}^d \geq \epsilon\}$;

Λ_s - Conjunto das cirurgias pré-agendadas que ocorrem com sobreposição à ocorrência da cirurgia $s \in \Upsilon$ acrescidas do tempo de limpeza;

Γ_r - Conjunto das cirurgias $s \in \Upsilon$ pré-agendadas na sala $r \in R$, i.e., $\eta_s = r$;

Parâmetros:

Dados os valores \bar{y}^d numa solução ótima da formulação H_x , uma cirurgia s é pré-agendada no período e na sala associados ao maior valor de \bar{y}_s^d , i.e., $(\eta_s, \tau_s) = \arg \max_{(r,t) \in R_s \times T_s^d} \{\bar{y}_{srt}^d\}$.

4.13 Restrições

$$w_s^a + \sum_{s' \in \bar{\Lambda}_s \mid a \in \bar{A}_s^e} w_{s'}^a \leq 1 \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s, \forall a \in \bar{A}_s^e \quad (4.24)$$

$$\sum_{a \in \bar{A}_s^e} w_s^a + z_s = 1 \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s \quad (4.25)$$

$$z_s + z_{s'} \geq 1 \quad \forall c \in C, \forall s \in S_c \cap \Upsilon, \forall s' \in S_c \cap \bar{\Lambda}_s \quad (4.26)$$

$$z_s + z_{s'} \geq 1 \quad \forall r \in R, \forall s \in \Gamma_r, \forall s' \in \Gamma_r \cap \Lambda_s \quad (4.27)$$

$$g_{sk}(1 - z_s) + \sum_{s' \in \bar{\Lambda}_s} g_{s'k}(1 - z_{s'}) \leq q_k \quad \forall k \in K, \forall s \in \Upsilon, \quad (4.28)$$

$$0 \leq z_s \leq 1 \quad \forall s \in \Upsilon \quad (4.29)$$

$$w_s^a \in \{0, 1\} \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s, \forall a \in \bar{A}_s^e \quad (4.30)$$

4.14 Função Objetivo

Função objetivo de minimização ponderada no dia $d \in D$

$$\begin{aligned} \min \sum_{s \in \Upsilon} \rho_s z_s & \quad (4.31) \\ \text{sujeito a (4.24) - (4.30)} \end{aligned}$$

Maximizando a utilização no dia $d \in D$, ρ_s assume o valor de d_s .

Minimizando o cancelamento ponderado no dia $d \in D$, ρ_s assume o valor de p_s .

4.15 Abordagem $\text{dlc}_{zw}(d, x^d, y^d)$

A abordagem dlc_{zw} é caracterizada por variáveis w binária e z contínua para cirurgias com salas e períodos pré-agendados no dia $d \in D$. Resolve-se a formulação H_x com uma das funções objetivo (3.9) ou (3.10) e a partir de todos os valores maiores que ϵ da variável y^d indica a sala mais adequada para realização do procedimento, além da alocação dos demais recursos, viabilizando o sequenciamento. Assim como para as abordagens anteriores, a solução é contruída por partes. O pseudocódigo é evidenciado por:

1 Abordagem dlc_{zw} :

Passo 1 - Executar o modelo H_x ;

Passo 2 - Definir os conjuntos X^d , $\forall d \in D$, a partir do resultado;

Passo 3 - Para $d = 1, \dots, |D|$;

Passo 3.1 - Montar o conjunto de cópias Y_s , $\forall s \in X^d$, a partir do resultado;

Passo 3.1 - Definir os parâmetros $\eta_{s'}$ e $\tau_{s'}$, $\forall s' \in Y_s$, $\forall s \in X^d$;

Passo 3.2 - Definir os conjuntos Υ , $\bar{\Lambda}_s$, Λ_s , Γ_r , e \bar{A}_s^e ;

Passo 3.4 - Executar o modelo $\text{dlc}_{zw}(d, x^d, y^d)$, c.f., (4.32)-(4.39);

4.16 Notação

Resolvendo-se a formulação H_x e a partir de todos os valores maiores que ϵ é possível realizar o agrupamento que define o conjunto de cópias Y_s de cirurgias. Define-se também o conjunto Υ de cópias pré-agendadas, devido à sobreposição de cirurgias nos períodos em decorrência do fato de a formulação H_x apresentar variáveis relaxadas.

Parâmetros:

Dados os valores \bar{y}^d numa solução ótima da formulação H_x , seja, para uma cirurgia s , b_s o número de pares $(r, t) \in R_s \times T_s^d$ para os quais $\bar{y}_{srt}^d \geq \epsilon$. São criadas s_1, s_2, \dots, s_{b_s} cópias da cirurgia s . Cada cópia $j = 1, \dots, b_s$ é pré-agendada na sala η_{sj} e no período τ_{sj} .

Conjuntos:

Y_s - Conjunto das cópias da cirurgia $s \in X^d$

Υ - Conjunto de todas as cópias pré-agendadas, i.e., $\Upsilon = \cup_{s \in X^d} Y_s$;

4.17 Restrições

$$\sum_{s' \in Y_s} z_{s'} \geq |Y_s| - 1 \quad \forall s \in X^d \quad (4.32)$$

$$w_s^a + \sum_{s' \in \bar{\Lambda}_s | a \in \bar{A}_s^e} w_{s'}^a \leq 1 \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s, \forall a \in \bar{A}_s^e \quad (4.33)$$

$$\sum_{a \in \bar{A}_s^e} w_s^a + z_s = 1 \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s \quad (4.34)$$

$$z_s + z_{s'} \geq 1 \quad \forall c \in C, \forall s \in S_c \cap \Upsilon, \forall s' \in S_c \cap \bar{\Lambda}_s \quad (4.35)$$

$$z_s + z_{s'} \geq 1 \quad \forall r \in R, \forall s \in \Gamma_r, \forall s' \in \Gamma_r \cap \Lambda_s \quad (4.36)$$

$$g_{sk}(1 - z_s) + \sum_{s' \in \bar{\Lambda}_s} g_{s'k}(1 - z_{s'}) \leq q_k \quad \forall k \in K, \forall s \in \Upsilon, \quad (4.37)$$

$$0 \leq z_s \leq 1 \quad \forall s \in \Upsilon \quad (4.38)$$

$$w_s^a \in \{0, 1\} \quad \forall s \in \Upsilon, \forall e \in E_s, \forall a \in \bar{A}_s^e \quad (4.39)$$

4.18 Função Objetivo

Função objetivo de minimização ponderada no dia $d \in D$

$$\begin{aligned} \min \sum_{s \in \Upsilon} \rho_s z_s & \quad (4.40) \\ \text{sujeito a (4.32) - (4.39)} \end{aligned}$$

Obs: Seja \bar{z} a solução ótima de dlc_{zw} . Se para uma cirurgia $s \in X^d$ existe um cópia j tal que $\bar{z}_{s_j} = 0$, i.e., $\sum_{s' \in Y_s} z_{s'} = |Y_s| - 1$, então a cirurgia s é agendada na sala η_{sj} no período τ_{sj} . Caso contrário, i.e., $\sum_{s' \in Y_s} z_{s'} = |Y_s|$, a cirurgia s não é agendada.

Maximizando a utilização no dia $d \in D$, ρ_s assume o valor de d_s

Minimizando o cancelamento ponderado no dia $d \in D$, ρ_s assume o valor de p_s

4.19 Experimentos computacionais para a maximização da ocupação

Os testes desta seção foram realizados pela implementação das abordagens d_{yw} , d_{zw} , dl_{zw} e dlc_{zw} executando a Formulação H_x com a função objetivo de maximizar a ocupação identificada por (3.9). Os respectivos resultados destes experimentos estão evidenciados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6.

As tabelas estão organizadas da seguinte forma: a primeira coluna representa a identificação das instâncias utilizadas e que foram avaliadas para o modelo inicial enunciado no Capítulo 3. As próximas duas colunas representam o número de cirurgias e o número de salas que estão sendo considerados para cada instância em análise. Na quarta coluna há o registro do limite superior para o modelo inicial relaxado, considerando a maximização da ocupação. As próximas três colunas representam a melhor solução viável encontrada pela execução do modelo de programação inteira enunciado inicialmente, o gap percentual de otimalidade, entre o modelo exato e o modelo relaxado, e o tempo, em segundos, necessário para obtenção dos resultados rodando modelo de programação inteira. As duas últimas colunas da tabela estão relacionadas aos resultados computacionais obtidos com a implementação de uma determinada abordagem heurística: limite (limite inferior para o caso de maximização) e tempo de execução, em segundos, da abordagem em análise.

I	S	R	UB	IP Model			DYW	
				LB	gap(%)	t(s)	LB	t(s)
s240r5i0	240	5	779	779	0.00	1364	779	42
s240r5i1	240	5	676	676	0.00	834	676	1018
s240r5i2	240	5	780	780	0.00	1094	780	453
s240r5i3	240	5	765	765	0.00	494	765	146
s240r5i4	240	5	759	759	0.00	500	759	793
s360r10i0	360	10	1330	0	100.00	21602	1330	309
s360r10i1	360	10	1307	1307	0.00	17426	1307	21685
s360r10i2	360	10	1469	1161	20.97	21601	1441	21693
s360r10i3	360	10	1460	1456	0.27	21607	1428	21748
s360r10i4	360	10	1466	1151	21.49	21601	1463	21816

Tabela 3 – Resultados maximizando a ocupação formulação dyw.

Conforme pode-se verificar na Tabela 3, considerando-se o modelo de maximizar a ocupação para a abordagem d_{yw} obteve-se a solução ótima em todas as instâncias do primeiro cenário, que é caracterizado por conter 240 cirurgias e 5 salas de operação. Sendo que para três destas instâncias, aquelas identificadas por s240r5i0, s240r5i2 e s240r5i3, o resultado com a aplicação da heurística foi obtido em menor tempo computacional. Considerando esta mesma tabela, verifica-se que para o segundo cenário, caracterizado por 360 cirurgias e 10 salas de operação, o ótimo foi obtido para as instâncias s360r10i0 e s360r10i1. As instâncias s360r10i2 e s360r10i4, com a execução da abordagem, apresentaram o melhor limite inferior comparativamente com o resultado do modelo original. Um baixo percentual de gap de otimalidade foi obtido para a instância s360r10i3.

Com o intuito de avaliar a qualidade da política de operação da abordagem d_{zw} , os resultados dos testes computacionais estão registrados na Tabela 4 para a função objetivo (3.9). Com base na Tabela 4, observa-se que a solução ótima foi obtida com a implementação da abordagem aplicada ao modelo de maximizar considerando as instâncias do primeiro cenário, composto por 240 cirurgias e 5 salas. Sendo que o tempo de resolução com a implementação da heurística foi inferior ao necessário para execução do modelo original para quatro das cinco instâncias deste cenário, são elas: s240r5i0, s240r5i2, s240r5i3 e s240r5i4. Em relação ao segundo cenário, composto por 360 cirurgias e 10 salas, a solução ótima foi encontrada para as instâncias s360r10i0 e s360r10i1. Ainda de acordo com os dados desta tabela, com a execução da heurística, o melhor limite inferior foi encon-

I	S	R	UB	IP Model			DZW	
				LB	gap(%)	t(s)	LB	t(s)
s240r5i0	240	5	779	779	0.00	1364	779	209
s240r5i1	240	5	676	676	0.00	834	676	2143
s240r5i2	240	5	780	780	0.00	1094	780	186
s240r5i3	240	5	765	765	0.00	494	765	49
s240r5i4	240	5	759	759	0.00	500	759	988
s360r10i0	360	10	1330	0	100.00	21602	1330	566
s360r10i1	360	10	1307	1307	0.00	17426	1307	22228
s360r10i2	360	10	1469	1161	20.97	21601	1104	21792
s360r10i3	360	10	1460	1456	0.27	21607	1426	21823
s360r10i4	360	10	1466	1151	21.49	21601	1458	21974

Tabela 4 – Resultados maximizando a ocupação formulação dzw.

I	S	R	UB	IP Model			DLZW	
				LB	gap(%)	t(s)	LB	t(s)
s240r5i0	240	5	779	779	0.00	1364	409	571
s240r5i1	240	5	676	676	0.00	834	413	5312
s240r5i2	240	5	780	780	0.00	1094	398	1193
s240r5i3	240	5	765	765	0.00	494	434	284
s240r5i4	240	5	759	759	0.00	500	400	2843
s360r10i0	360	10	1330	0	100.00	21602	471	1818
s360r10i1	360	10	1307	1307	0.00	17426	455	22362
s360r10i2	360	10	1469	1161	20.97	21601	464	22153
s360r10i3	360	10	1460	1456	0.27	21607	456	22290
s360r10i4	360	10	1466	1151	21.49	21601	436	22005

Tabela 5 – Resultados maximizando a ocupação formulação dlzw.

trado para a instância s360r10i4 em um tempo inferior ao necessário para gerar o resultado para o modelo original.

A Tabela 5 evidencia os resultados computacionais para a abordagem dl_{zw} . Considerando o cenário de 240 cirurgias e 5 salas, não obteve-se o ótimo para as instâncias consideradas. O mesmo ocorre para o cenário de 360 cirurgias e 10 salas. Porém, para uma das instâncias analisadas, a s360r10i0, o limite inferior obtido pela aplicação da abordagem converge mais comparado ao resultado para o modelo linear inteiro.

A Tabela 6 contém o registro dos resultados obtidos de acordo com a abordagem dlc_{zw} . Para o primeiro cenário, verifica-se que melhores resultados foram obtidos para o modelo original comparativamente com o limite inferior resultante da aplicação da heurística. Com relação ao segundo cenário, observa-se que o desempenho da heurística foi superior ao do modelo exato para a instância de s360r10i0. Em relação às outras quatro instâncias deste cenário, o modelo original apresentou melhores resultados para

I	S	R	UB	IP Model			DLCZW	
				LB	gap(%)	t(s)	LB	t(s)
s240r5i0	240	5	779	779	0.00	1364	408	405
s240r5i1	240	5	676	676	0.00	834	425	4560
s240r5i2	240	5	780	780	0.00	1094	411	2160
s240r5i3	240	5	765	765	0.00	494	450	474
s240r5i4	240	5	759	759	0.00	500	424	3587
s360r10i0	360	10	1330	0	100.00	21602	542	3965
s360r10i1	360	10	1307	1307	0.00	17426	469	22618
s360r10i2	360	10	1469	1161	20.97	21601	524	22814
s360r10i3	360	10	1460	1456	0.27	21607	474	22454
s360r10i4	360	10	1466	1151	21.49	21601	435	22575

Tabela 6 – Resultados maximizando a ocupação formulação dlczw.

o tempo de execução considerado.

A primeira abordagem apresentou desempenho superior às demais pelo número de soluções ótimas encontradas e por resultar em melhores limites inferiores para aquelas instâncias que não caracterizaram otimalidade. A segunda abordagem apresentou desempenho semelhante à primeira por resultar em otimalidade para o primeiro cenário. As duas últimas abordagens apresentaram qualidade da solução inferiores às das duas primeiras, uma vez que não houve garantia de otimalidade nas instâncias consideradas.

4.20 Experimentos computacionais para minimizar o atraso ponderado

Os testes da implementação para as abordagens d_{yw} , d_{zw} , dl_{zw} e dlc_{zw} executando a Formulação H_x com a função objetivo de minimizar o atraso ponderado, (3.10), estão evidenciadas nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 respectivamente.

As tabelas estão organizadas da seguinte forma: a primeira coluna representa a identificação da instância utilizada. As próximas duas colunas representam o número de cirurgias e o número de salas que estão sendo considerados para cada instância. Na quarta coluna há o registro do limite inferior para o modelo relaxado considerando a minimização de atraso. As próximas três colunas representam a melhor solução viável encontrada, o gap percentual de otimalidade e o tempo em segundos para obtenção dos resultados do modelo de programação inteira implementado. As duas últimas colunas da tabela estão relacionadas aos resultados computacionais obtidos

I	S	R	LB	IP Model			DYW	
				UB	gap(%)	t(s)	UB	t(s)
s240r5i0	240	5	157.15	157.31	0.10	21917	165.27	242
s240r5i1	240	5	142.93	143.07	0.10	21878	149.34	742
s240r5i2	240	5	85.03	85.21	0.21	22013	87.54	761
s240r5i3	240	5	94.92	94.94	0.02	22150	98.03	733
s240r5i4	240	5	93.42	93.92	0.53	21992	102.29	21782
s360r10i0	360	10	0.00	2011.69	100.00	21920	0.00	1733
s360r10i1	360	10	105.86	384.23	72.45	22072	109.13	21688
s360r10i2	360	10	2.29	2152.08	99.89	22579	13.65	21642
s360r10i3	360	10	36.81	2206.28	98.33	22053	55.33	21965
s360r10i4	360	10	3.70	2140.29	99.83	22275	52.21	21895

Tabela 7 – Resultados minimizando atraso formulação dyw.

com a abordagem heurística: limite (limite superior para minimização) e tempo em segundos de execução.

A forma de disponibilizar a informação, ou seja, a sequência de colunas, ocorre da mesma maneira para todas as abordagens. Realiza-se por meio das tabelas um comparativo entre o resultado da implementação para o modelo original, o modelo original relaxado e a abordagem em análise.

A Tabela 7 evidencia os resultados obtidos pelo modelo de minimizar a ocupação para a abordagem d_{yw} . Conforme verifica-se o primeiro cenário apresentou limites apertados de solução no mesmo intervalo de tempo considerado para realização dos testes computacionais e obteve-se a solução ótima para a instância s360r10i0 do segundo cenário. Para as outras instâncias do segundo cenário, não houve garantia de otimalidade, mas foram obtidos limites superiores melhores com a execução da abordagem em relação aos resultados do modelo original.

Conforme a Tabela 8, os resultados da abordagem d_{zw} para a função objetivo de minimizar o atraso podem ser verificados. Observa-se que apesar de não haver garantia de otimalidade para o primeiro cenário, foram obtidos limites apertados. No segundo cenário houve garantia de otimalidade para a instância r360r10i0 e para as demais deste cenário, apesar de não haver garantida de otimalidade, a execução da abordagem resultou em melhores limites superiores.

Em Tabela 9, avalia-se os resultados da abordagem $dlzw$ para a função de minimizar o atraso ponderado. O desenvolvimento desta abordagem permite perceber que o modelo exato apresenta melhor desempenho para o

I	S	R	LB	IP Model			DZW	
				UB	gap(%)	t(s)	UB	t(s)
s240r5i0	240	5	157.15	157.31	0.10	21917	165.27	453
s240r5i1	240	5	142.93	143.07	0.10	21878	149.34	694
s240r5i2	240	5	85.03	85.21	0.21	22013	87.54	593
s240r5i3	240	5	94.92	94.94	0.02	22150	98.03	584
s240r5i4	240	5	93.42	93.92	0.53	21992	102.29	21806
s360r10i0	360	10	0.00	2011.69	100.00	21920	0.00	1426
s360r10i1	360	10	105.86	384.23	72.45	22072	138.84	21715
s360r10i2	360	10	2.29	2152.08	99.89	22579	13.65	21729
s360r10i3	360	10	36.81	2206.28	98.33	22053	55.33	21677
s360r10i4	360	10	3.70	2140.29	99.83	22275	52.21	21808

Tabela 8 – Resultados minimizando atraso formulação dzw.

I	S	R	LB	IP Model			DLZW	
				UB	gap(%)	t(s)	UB	t(s)
s240r5i0	240	5	157.5	157.31	0.10	21917	603	220
s240r5i1	240	5	142.93	143.07	0.10	21878	655	620
s240r5i2	240	5	85.03	85.21	0.21	22013	472	462
s240r5i3	240	5	94.92	94.94	0.02	22150	521	525
s240r5i4	240	5	93.42	93.92	0.53	21992	603	21632
s360r10i0	360	10	0.00	2011.69	100.00	21920	900	302
s360r10i1	360	10	105.86	384.23	72.45	22072	1027	21697
s360r10i2	360	10	2.29	2152.08	99.89	22579	961	21789
s360r10i3	360	10	36.81	2206.28	98.33	22053	956	21619
s360r10i4	360	10	3.7	2140.29	99.83	22275	1140	21703

Tabela 9 – Resultados minimizando o atraso formulação dlzw.

cenário de 240 cirurgias. Em contrapartida, para o cenário de 360 cirurgias, a heurística aplicada apresentou melhores resultados em relação ao modelo original para as instâncias s360r10i0, s360r10i2, s360r10i3 e s360r10i4. Para instâncias maiores o método exato apresenta soluções de pior qualidade, o que justifica a aplicação de heurísticas que permitem obter boas soluções em menor tempo computacional.

Os resultados para a função objetivo de minimizar o atraso ponderado para a abordagem dlczw são apresentados na Tabela 10. Para o primeiro cenário foram obtidos melhores resultados com a aplicação do modelo exato em relação à heurística. Já para o segundo cenário, a heurística apresentou melhores resultados para as instâncias s360r10i0, s360r10i2, s360r10i3 e s360r10i4.

A análise dos resultados permite verificar que para a função de minimizar o atraso ponderado, a execução das heurísticas apresentou desempenho superior ao método exato com o aumento das instâncias consideradas. Ape-

I	S	R	LB	IP Model			DLCZW	
				UB	gap(%)	t(s)	UB	t(s)
s240r5i0	240	5	157.15	157.31	0.10	21917	515.44	21842
s240r5i1	240	5	142.93	143.07	0.10	21878	416.28	21890
s240r5i2	240	5	85.03	85.21	0.21	22103	435.46	22112
s240r5i3	240	5	94.92	94.94	0.02	22150	452.94	21897
s240r5i4	240	5	93.42	93.92	0.53	21992	400	21997
s360r10i0	360	10	0.00	2011.69	100.00	21920	743	449
s360r10i1	360	10	105.86	384.23	72.45	22072	879.08	22093
s360r10i2	360	10	2.29	2152.08	99.89	22579	911.15	22460
s360r10i3	360	10	36.81	2206.28	98.33	22053	995.83	22033
s360r10i4	360	10	3.70	2140.29	99.83	22275	922.71	23085

Tabela 10 – Resultados minimizando o atraso formulação dlczw.

sar de não garantir a otimalidade no tempo computacional estipulado, as abordagens apresentaram melhor desempenho para as instâncias de 360 cirurgias.

5 Conclusão e Trabalhos futuros

O sequenciamento de cirurgias é um problema desafiador na gestão hospitalar. A modelagem do problema envolve particularidades da organização em análise. Foi proposta uma formulação inteira para resolver o problema para um horizonte de tempo de médio prazo. Cirurgias foram atribuídas a cada dia e foi estabelecido, em cada dia, a sequência de cirurgias. Duas funções objetivo foram aplicadas para o estudo inicial deste trabalho: maximizar a ocupação e minimizar o atraso ponderado.

A modelagem resultou em limites de relaxação apertados para o primeiro caso. Já para o segundo caso, a distância entre os valores das soluções viáveis encontradas e dos limites da relaxação linear foram bem grandes para as instâncias maiores. As aproximações heurísticas foram aplicadas com intuito de explorar os limites de relaxação linear quando cada dia é considerado independente, uma vez que foram encontrados bons limites para pequenas instâncias em ambas as funções objetivo utilizadas na modelagem do problema de sequenciamento de cirurgias. A aplicação de métodos heurísticos não garante otimalidade, apesar de desejável. Com a aplicação das abordagens, em alguns casos, boas soluções puderam ser encontradas mais rapidamente, o que permite gerar contribuições ao contexto em análise de forma a aumentar a agilidade de resposta do sistema. Observou-se que executando a formulação H_x para a função de maximizar a ocupação as duas abordagens apresentaram desempenho superior às demais. Já com a execução da formulação H_x para a função de minimizar o atraso ponderado, as duas últimas abordagens, apesar de não garantirem gap de otimalidade, apresentaram soluções de melhor qualidade em relação às duas primeiras abordagens. Em ambos os casos, função objetivo de maximizar a ocupação e função objetivo de minimizar o atraso, o método exato apresentou uma redução na qualidade da solução com o aumento das instâncias consideradas, o que justifica o aprimoramento das técnicas heurísticas implementadas neste trabalho. Alternativas de trabalhos futuros podem estar direciona-

das a técnicas de heurísticas de arredondamento, uma vez que boa parte das variáveis w e y correspondem a valores contínuos resultantes do modelo original relaxado como pode ser verificado pelas duas últimas colunas das Tabelas 1 e 2.

Por meio deste trabalho foi possível realizar uma comparação entre as quatro abordagens heurísticas para duas formas de avaliação de desempenho do sistema: maximizar a ocupação ou minimizar atraso ponderado. O estudo do problema de sequenciamento de cirurgias leva à necessidade de consideração de novas formas de melhorias considerando os modelos propostos neste trabalho. A utilização de abordagens para solução do problema utilizando técnicas heurísticas mostrou-se promissora, sendo destacada a oportunidade de refinamento na fixação de variáveis. A elaboração de estratégias para fixar apenas parte de um conjunto de variáveis e a utilização de informações da relaxação linear para determinar um subconjunto de variáveis mais promissor a ser fixado podem ser exploradas e aprimoradas em trabalhos futuros.

Referências

- ADAN, I.; VISSERS, J. Patient mix optimisation in hospital admission planning: a case study. *International Journal of Operations & Production Management*, MCB UP Ltd, v. 22, p. 445–461, 2002.
- ARENAS, M. et al. Analysis via goal programming of the minimum achievable stay in surgical waiting lists. *Journal of the Operational Research Society*, JSTOR, p. 387–396, 2002.
- AUGUSTO, V.; XIE, X.; PERDOMO, V. Operating theatre scheduling with patient recovery in both operating rooms and recovery beds. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 231–238, 2010.
- BELIËN, J.; DEMEULEMEESTER, E. Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 176, n. 2, p. 1185–1204, 2007.
- BELIËN, J.; DEMEULEMEESTER, E. A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 189, n. 3, p. 652–668, 2008.
- BELIËN, J.; DEMEULEMEESTER, E.; CARDOEN, B. A decision support system for cyclic master surgery scheduling with multiple objectives. *Journal of Scheduling*, Springer, v. 12, n. 2, p. 147–161, 2009.
- BLAKE, J. T.; CARTER, M. W. Surgical process scheduling: a structured review. *Journal of the Society for Health Systems*, v. 5, n. 3, p. 17–30, 1996.
- BLAKE, J. T.; CARTER, M. W. A goal programming approach to strategic resource allocation in acute care hospitals. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 140, n. 3, p. 541–561, 2002.
- BOWERS, J.; MOULD, G. Ambulatory care and orthopaedic capacity planning. *Health Care Management Science*, Springer, v. 8, n. 1, p. 41–47, 2005.
- CARDOEN, B.; DEMEULEMEESTER, E. Capacity of clinical pathways—a strategic multi-level evaluation tool. *Journal of Medical Systems*, Springer, v. 32, n. 6, p. 443–452, 2008.

CARDOEN, B.; DEMEULEMEESTER, E. Operating room planning and scheduling: A classification scheme. *Serials Publications*, 2010.

CARDOEN, B.; DEMEULEMEESTER, E.; BELIËN, J. Sequencing surgical cases in a day-care environment: an exact branch-and-price approach. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 36, n. 9, p. 2660–2669, 2009.

CARDOEN, B.; DEMEULEMEESTER, E.; BELIËN, J. Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 201, n. 3, p. 921–932, 2010.

DENTON, B.; GUPTA, D. A sequential bounding approach for optimal appointment scheduling. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 35, n. 11, p. 1003–1016, 2003.

DENTON, B.; VIAPIANO, J.; VOGL, A. Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty. *Health Care Management Science*, Springer, v. 10, n. 1, p. 13–24, 2007.

DEXTER, F. Operating room utilization: information management systems. *Current Opinion in Anesthesiology*, LWW, v. 16, n. 6, p. 619–622, 2003.

DEXTER, F. et al. Calculating a potential increase in hospital margin for elective surgery by changing operating room time allocations or increasing nursing staffing to permit completion of more cases: a case study. *Anesthesia & Analgesia*, LWW, v. 94, n. 1, p. 138–142, 2002.

DEXTER, F.; LEDOLTER, J.; WACHTEL, R. E. Tactical decision making for selective expansion of operating room resources incorporating financial criteria and uncertainty in subspecialties' future workloads. *Anesthesia & Analgesia*, LWW, v. 100, n. 5, p. 1425–1432, 2005.

DEXTER, F.; MACARIO, A. Changing allocations of operating room time from a system based on historical utilization to one where the aim is to schedule as many surgical cases as possible. *Anesthesia & Analgesia*, LWW, v. 94, n. 5, p. 1272–1279, 2002.

DEXTER, F.; MACARIO, A. When to release allocated operating room time to increase operating room efficiency. *Anesthesia & Analgesia*, LWW, v. 98, n. 3, p. 758–762, 2004.

- DEXTER, F.; TRAUB, R. D. How to schedule elective surgical cases into specific operating rooms to maximize the efficiency of use of operating room time. *Anesthesia & Analgesia*, LWW, v. 94, n. 4, p. 933–942, 2002.
- DEXTER, F.; TRAUB, R. D.; MACARIO, A. How to release allocated operating room time to increase efficiency: predicting which surgical service will have the most underutilized operating room time. *Anesthesia & Analgesia*, LWW, v. 96, n. 2, p. 507–512, 2003.
- ETZIONI, D. A. et al. The aging population and its impact on the surgery workforce. *Annals of surgery*, Lippincott, Williams, and Wilkins, v. 238, n. 2, p. 170, 2003.
- FEI, H. et al. Solving surgical cases assignment problem by a branch-and-price approach. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 112, n. 1, p. 96–108, 2008.
- FEI, H.; MESKENS, N.; CHU, C. A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 221–230, 2010.
- GHAZALBASH, S. et al. Operating room scheduling in teaching hospitals. *Advances in Operations Research*, Hindawi Publishing Corporation, 2012.
- GLOUBERMAN, S.; MINTZBERG, H. Managing the care of health and the cure of disease—part i: Differentiation. *Health care management review*, LWW, v. 26, n. 1, p. 56–69, 2001.
- GUERRIERO, F.; GUIDO, R. Operational research in the management of the operating theatre: a survey. *Health care management science*, Springer, v. 14, n. 1, p. 89–114, 2011.
- GUINET, A.; CHAABANE, S. Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 85, n. 1, p. 69–81, 2003.
- HANS, E. W.; NIEBERG, T. Operating room manager game. *INFORMS Transactions on Education*, INFORMS, v. 8, n. 1, p. 25–36, 2007.
- HOUDENHOVEN, M. v. et al. A framework for hospital planning and control. *Healthcare logistics: the art of balance*, p. 16–30, 2007.
- JEBALI, A.; ALOUANE, A. B. H.; LADET, P. Operating rooms scheduling. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 99, n. 1, p. 52–62, 2006.

- LAMIRI, M.; XIE, X.; ZHANG, S. Column generation approach to operating theater planning with elective and emergency patients. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 40, n. 9, p. 838–852, 2008.
- MACARIO, A. Are your hospital operating rooms “efficient”? a scoring system with eight performance indicators. *Anesthesiology*, LWW, v. 105, n. 2, p. 237–240, 2006.
- MAGERLEIN, J. M.; MARTIN, J. B. Surgical demand scheduling: a review. *Health services research*, Health Research & Educational Trust, v. 13, n. 4, p. 418, 1978.
- MARQUES, I.; CAPTIVO, M. E.; PATO, M. V. An integer programming approach to elective surgery scheduling. *OR spectrum*, Springer, v. 34, n. 2, p. 407–427, 2012.
- MARQUES, I.; CAPTIVO, M. E.; PATO, M. V. Scheduling elective surgeries in a portuguese hospital using a genetic heuristic. *Operations Research for Health Care*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 59–72, 2014.
- MESKENS, N.; DUVIVIER, D.; HANSET, A. Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the surgical team. *Decision Support Systems*, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 650–659, 2013.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier. cap, v. 8, p. 165–194, 2010.
- OZKARAHAN, I. Allocation of surgical procedures to operating rooms. *Journal of Medical Systems*, Springer, v. 19, n. 4, p. 333–352, 1995.
- PERDOMO, V.; AUGUSTO, V.; XIE, X. Operating theatre scheduling using lagrangian relaxation. In: IEEE. *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*. [S.l.], 2006. v. 2, p. 1234–1239.
- PHAM, D.-N.; KLINKERT, A. Surgical case scheduling as a generalized job shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 185, n. 3, p. 1011–1025, 2008.
- PRZASNYSKI, Z. H. Operating room scheduling: A literature review. *AORN journal*, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 67–82, 1986.
- RAIS, A.; VIANA, A. Operations research in healthcare: a survey. *International Transactions in Operational Research*, Wiley Online Library, v. 18, n. 1, p. 1–31, 2011.

RIISE, A.; BURKE, E. K. Local search for the surgery admission planning problem. *Journal of Heuristics*, Springer, v. 17, n. 4, p. 389–414, 2011.

ROLAND, B. et al. Scheduling an operating theatre under human resource constraints. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 212–220, 2010.

VIJAYAKUMAR, B. et al. A dual bin-packing approach to scheduling surgical cases at a publicly-funded hospital. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 224, n. 3, p. 583–591, 2013.