



OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DOS CENTROS CIRÚRGICOS E
DIMENSIONAMENTO DE LEITOS, UM ESTUDO DE CASO DO INSTITUTO
NACIONAL DE TRAUMATOLOGIA E ORTOPEDIA (INTO)

Cecília Lorenzo de Siqueira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda
Laura Silvia Bahiense da Silva
Leite

Rio de Janeiro
Julho de 2016

OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DOS CENTROS CIRÚRGICOS E
DIMENSIONAMENTO DE LEITOS, UM ESTUDO DE CASO DO INSTITUTO
NACIONAL DE TRAUMATOLOGIA E ORTOPEDIA (INTO)

Cecília Lorenzo de Siqueira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO.

Examinada por:

Prof. Edilson Fernandes de Arruda, D.Sc.

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Silvio Hamacher, Dr.Ing.

Prof. Maria Stella de Castro Lobo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2016

Siqueira, Cecília Lorenzo de

Otimização Integrada dos Centros Cirúrgicos e Dimensionamento de Leitos, um estudo de caso do Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO) /Cecília Lorenzo de Siqueira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIII, 71 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Produção, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 49 – 51.

1. Planejamento de Cirurgias. 2. Otimização. I. de Arruda, Edilson Fernandes *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

*A alguém cujo valor é digno
desta dedicatória.*

Agradecimentos

Inicio meus agradecimento por **Deus** pois me deu forças para ultrapassar todos os obstáculos que a vida me impôs.

Aos meus pais, **Hermelinda Lorenzo** e **Carlos Alberto Siqueira**, meu infinito agradecimento. Agradeço por me apoiarem em qualquer decisão. Por estarem sempre presentes, mesmo que não fisicamente. Por cada palavra de incentivo. Sem vocês essa conquista não seria possível.

Ao meu namorado, **Rodrigo Camara** que sempre esteve ao meu lado me dando todo suporte necessário para que eu não fraquejasse durante essa jornada, meu muitíssimo obrigada.

Aos meus familiares e amigos que direta ou indiretamente sempre me apoiaram e acreditaram no meu êxito nessa trajetória.

A todos os mestres que tive durante a vida que de alguma forma contribuíram para a minha formação, em especial, aos meus orientadores, **Edílson Arruda** e **Laura Bahiense**, por todos os conhecimentos transmitidos e por serem tão disponíveis e solícitos.

Finalmente, gostaria de agradecer à UFRJ por todo o ensino que me foi dado e a todos mais que eu não tenha citado nesta lista de agradecimentos, mas que de uma forma ou de outra contribuíram não apenas para a minha dissertação, mas também para eu ser quem eu sou.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

OTIMIZAÇÃO INTEGRADA DOS CENTROS CIRÚRGICOS E
DIMENSIONAMENTO DE LEITOS, UM ESTUDO DE CASO DO INSTITUTO
NACIONAL DE TRAUMATOLOGIA E ORTOPEDIA (INTO)

Cecília Lorenzo de Siqueira

Julho/2016

Orientadores: Edilson Fernandes de Arruda
Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Programa: Engenharia de Produção

O Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO), localizado no estado do Rio de Janeiro, é um centro de referência em cirurgias de alta complexidade tanto em Ortopedia quanto em Traumatologia. Os serviços oferecidos são divididos em treze distintas subespecialidades, que são servidas diariamente, de Segunda-Feira a Sexta-Feira, por dezoito salas de cirurgia, além dos duzentos e setenta e três leitos de recuperação pós-cirurgia. Apesar da infraestrutura e profissionais de excelência, o INTO apresenta longas filas de espera para realização de procedimentos cirúrgicos, que atualmente chega a níveis alarmantes, oriundo de uma política de alocação de cirurgias não eficaz.

Este trabalho tem como objetivo propor uma política de alocação de cirurgias que visa atender três distintos pilares que são o gerenciamento da fila, ocupação das salas de cirurgia e dimensionamento dos leitos. A criação dessa política foi dividida em duas etapas. A primeira, por meio da programação inteira mista, busca selecionar a quantidade ótima de cirurgias por subespecialidades, que devem ser planejadas semanalmente, maximizando a ocupação das salas de cirurgia e utilizando o menor número de leitos e salas de cirurgia. Posteriormente, foi desenvolvida outra modelagem com o intuito de alocar as cirurgias diariamente perante a disponibilidade médica.

Essa política também foi avaliada considerando agrupamentos de cirurgias, onde procedimentos cirúrgicos, dentro da mesma subespecialidades, foram agrupados a partir de medidas de similaridade.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LONG-TERM INTEGRATED SURGERY ROOM OPTIMIZATION AND
RECOVERY WARD PLANNING, WITH A CASE STUDY IN THE BRAZILIAN
NATIONAL INSTITUTE OF TRAUMATOLOGY AND ORTHOPEDICS (INTO)

Cecília Lorenzo de Siqueira

July/2016

Advisors: Edilson Fernandes de Arruda

Laura Silvia Bahiense da Silva Leite

Department: Production Engineering

The National Institute of Traumatology and Orthopedics (INTO), located in the state of Rio de Janeiro, is a referral center for high complexity surgeries in both Orthopedics and Traumatology. The services offered are divided into thirteen distinct specialties, which are served daily, Monday to Friday, for eighteen operating rooms, in addition to two hundred seventy-three post-surgery recovery beds. Although the infrastructure and excellent professionals, INTO has long waiting lists for surgical procedures, which currently reaches alarming levels, resulted from an ineffective surgeries allocation policy.

This work aims to propose an operating allocation policy that address three distinct pillars that are queue management, occupation of operating rooms and number of beds. The creation of this policy was divided into two stages. The first, through the mixed integer programming, search select the optimum amount of surgeries for specialties, which must be planned weekly, maximizing the occupation of operating rooms and using the lowest number of beds and operating rooms. Subsequently, another model was developed in order to allocate daily surgery as medical availability.

This policy was also evaluated considering clusters of surgery, where surgical procedures, within the same specialty, were grouped from similarity measures.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica	4
3 Planejamento diário de cirurgias	7
4 Planejamento semanal de cirurgias	12
4.1 Algoritmo de pré-processamento: diminuição do espaço de busca	12
4.2 Modelo de planejamento semanal de cirurgias	14
4.3 Modelo de escalonamento semanal de cirurgias	18
4.4 Resultados de aplicação do modelo de planejamento semanal de ci- rurgias	21
4.5 Resultados de aplicação do modelo de escalonamento semanal de ci- rurgias	24
5 Planejamento considerando taxa de cancelamento de cirurgias	30
5.1 Análise de agrupamento dos procedimentos cirúrgicos	30
5.2 Modelagem Semanal de Cirurgias - planejamento e escalonamento	34
5.3 Resultados de aplicação do modelo de planejamento semanal de ci- rurgias considerando agrupamentos	38

5.4	Resultados de aplicação do modelo de escalonamento semanal de cirurgias considerando agrupamentos	42
6	Conclusão	47
	Referências Bibliográficas	49
A	Definição do número de agrupamentos por subespecialidades - aplicação do Método do Cotovelo	52
B	Agrupamentos por subespecialidades cirúrgicas - aplicação do algoritmo de agrupamento não hierárquico <i>k-médias</i>	59
C	Escalonamento semanal de cirurgias - modelagem sem taxa de cancelamento de cirurgias	67
D	Escalonamento semanal de cirurgias - modelagem com taxa de cancelamento de cirurgias de 16%	69

Lista de Figuras

1.1	Fluxo de paciente no INTO	2
4.1	Dimensionamento de Leitos INTO	24
4.2	Dimensionamento de Leitos Hospital DIA	25
5.1	Procedimentos Cirúrgicos - Ombro	31
5.2	Número Ótimo de Agrupamentos - Ombro	33
5.3	Agrupamentos ótimos - Ombro	34
A.1	Número Ótimo de Agrupamentos - Quadril	52
A.2	Número Ótimo de Agrupamentos - Quadril	53
A.3	Número Ótimo de Agrupamentos - Joelho	53
A.4	Número Ótimo de Agrupamentos - Mão	54
A.5	Número Ótimo de Agrupamentos - Trauma Adulto	54
A.6	Número Ótimo de Agrupamentos - Trauma Idoso	55
A.7	Número Ótimo de Agrupamentos - Ombro	55
A.8	Número Ótimo de Agrupamentos - Fixador Externo	56
A.9	Número Ótimo de Agrupamentos - Crânio Maxilo-Facial	56
A.10	Número Ótimo de Agrupamentos - Pé	57
A.11	Número Ótimo de Agrupamentos - Coluna	57
A.12	Número Ótimo de Agrupamentos - Tumor	58
A.13	Número Ótimo de Agrupamentos - Microcirurgia	58
B.1	Agrupamentos - Quadril	59
B.2	Agrupamentos - Infantil	60
B.3	Agrupamentos - Joelho	61
B.4	Agrupamentos - Mão	61
B.5	Agrupamentos - Trauma Adulto	62
B.6	Agrupamentos - Trauma Idoso	62
B.7	Agrupamentos - Ombro	63
B.8	Agrupamentos - Fixador Externo	63
B.9	Agrupamentos - Crânio Maxilo-Facial	64

B.10 Agrupamentos - Pé	64
B.11 Agrupamentos - Coluna	65
B.12 Agrupamentos - Tumor	65
B.13 Agrupamentos - Microcirurgia	66

Lista de Tabelas

3.1	Conjuntos e Subconjuntos	7
3.2	Variáveis decisão	8
4.1	Conjuntos e Subconjuntos	14
4.2	Variáveis de decisão	14
4.3	Conjuntos e Subconjuntos	18
4.4	Variáveis de decisão	19
4.5	Taxa Entrada, Tempo Cirurgia e Tempo de Recuperação . .	22
4.6	Combinações viáveis	22
4.7	Cirurgias por Especialidade e Unidade Hospitalar	23
4.8	Leitos por Especialidade e Unidade Hospitalar	23
4.9	Combinações ótimas do modelo de planejamento	26
4.10	Disponibilidade Equipe Médica	27
4.11	Equipe Médica/Salas de Cirurgia - INTO	27
4.12	Equipe Médica/Salas de Cirurgia - Dia	28
4.13	Escalonamento Diário Proposto versus Atual (INTO)	28
4.14	Escalonamento Semanal Proposto versus Atual	28
4.15	Escalonamento INTO - 2ª Feira	29
4.16	Escalonamento DIA - 2ª Feira	29
5.1	Conjuntos e Subconjuntos	35
5.2	Resultados Agrupamento	38
5.3	Tempo de cirurgia, em horas, por subespecialidade e agrupamento	39
5.4	Tempo de internação, em semanas, por subespecialidade e agrupamento	39
5.5	Combinações viáveis - Agrupamento	40
5.6	Cirurgias por SubEspecialidade - INTO	40
5.7	Cirurgias por SubEspecialidade - Hospital Dia	40
5.8	Leitos por SubEspecialidade - INTO	41
5.9	Leitos por SubEspecialidade - Hospital Dia	41

5.10	Combinções de cirurgias viáveis por agrupamento	42
5.11	Equipe Médica/Sala de Cirurgia - INTO	43
5.12	Equipe Médica/SubEspecialidade - Dia	43
5.13	Escalonamento Diário Proposto versus Atual	44
5.14	Escalonamento Semanal Proposto versus Atual	44
5.15	Escalonamento INTO - 2ª Feira	45
5.16	Escalonamento Hospital DIA - 2ª Feira	45
5.17	Planejamento Cirurgias Atual vs. Proposto	46
C.1	Escalonamento INTO - 3ª Feira	67
C.2	Escalonamento INTO - 4ª Feira	67
C.3	Escalonamento INTO - 5ª Feira	68
C.4	Escalonamento INTO - 6ª Feira	68
C.5	Escalonamento Hospital DIA - 3ª Feira	68
C.6	Escalonamento DIA - 4ª Feira	68
C.7	Escalonamento Hospital DIA - 5ª Feira	68
C.8	Escalonamento DIA - 6ª Feira	68
D.1	Escalonamento INTO - 3ª Feira	69
D.2	Escalonamento INTO - 4ª Feira	69
D.3	Escalonamento INTO - 5ª Feira	70
D.4	Escalonamento INTO - 6ª Feira	70
D.5	Escalonamento Hospital DIA - 3ª Feira	70
D.6	Escalonamento Hospital DIA - 4ª Feira	71
D.7	Escalonamento Hospital DIA - 5ª Feira	71
D.8	Escalonamento Hospital DIA - 6ª Feira	71

Capítulo 1

Introdução

Localizado no Rio de Janeiro, o Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO) é uma instituição pública especializada em tratamentos cirúrgicos complexos, tanto na área de traumatologia quanto na ortopedia. Os serviços prestados por essa instituição são destinados a pacientes oriundos do sistema único de saúde - SUS. Quanto aos serviços oferecidos, existe uma gama de treze subespecialidades distintas, a saber: *Infantil, Pé e Tornozelo, Mão, Quadril, Joelho, Coluna, Ombro e Cotovelo, Microcirurgia, Fixador Externo, Tumor, Cranio Maxilo-Facial, Trauma Adulto e Trauma Idoso*. Em sua maioria, os pacientes tratados no INTO são residentes no estado do Rio de Janeiro, porém o Instituto também recebe casos de alta complexidade de outros estados, desde que o paciente seja oriundo de rede pública de saúde e que fique comprovada a necessidade de seu tratamento.

Todos os pacientes direcionados ao INTO necessitam passar por uma avaliação preliminar, para que fique comprovada a necessidade da realização do tratamento. Tal avaliação é realizada por um médico que decide sobre a elegibilidade do paciente aos tratamentos disponíveis no Instituto. Os pacientes elegíveis são direcionados a um dos treze centros e permanecem na fila de cirurgia, que é atendida de acordo com a ordem de chegada dos pacientes. Após a realização da cirurgia, o paciente é direcionado à ala de recuperação, onde permanecerá até que tenha alta. Todo o processo está ilustrado na Figura 1.1. Quanto à tipologia dos pacientes direcionados ao INTO, estes são caracterizados como eletivos. Pacientes de emergência não são tratados neste Instituto.

Quanto à infraestrutura disponível, o hospital apresenta vinte e uma salas de cirurgia, das quais dezoito encontram-se em uso. Das 18 salas em uso, quinze estão localizadas na unidade principal do INTO, e as três restantes estão localizadas no Hospital Dia, unidade auxiliar e contígua, que atende cirurgias de menor duração e complexidade. As salas de cirurgia do INTO podem atender qualquer uma das subespecialidades disponíveis, ao passo que os do Hospital Dia atendem somente Pé e Tornozelo, Mão, Fixador Externo e Tumor. Já em relação à disponibilidade de

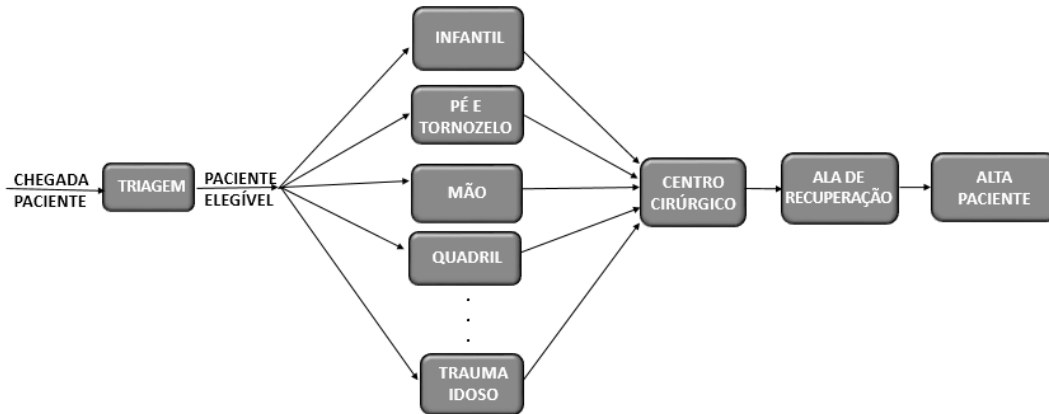


Figura 1.1: Fluxo de paciente no INTO

leitos, há um total de duzentos e setenta e três, dos quais duzentos e cinquenta e cinco estão alocados no hospital INTO e os demais ao Hospital Dia. Vale ressaltar que o paciente só pode ser internado em um leito pertencente à unidade na qual foi operado. Assim, não é possível que um paciente seja operado no INTO e internado no Hospital Dia, ou vice-versa. Já para a realização das cirurgias são disponibilizadas nove horas diárias, de Segunda-Feira até Sexta-Feira, sendo que é necessária aproximadamente meia hora para realizar a limpeza e preparação entre cirurgias consecutivas. Cabe ressaltar que a limpeza para a primeira cirurgia pode ser feita fora do horário de expediente; o mesmo se aplica à limpeza após a última cirurgia do dia. Isso possibilita maior flexibilidade e melhor utilização dos recursos.

Apesar de ser um hospital de referência, o INTO também é conhecido por suas longas filas de espera por cirurgia, que presentemente encontram-se em níveis alarmantes, mesmo que o volume de cirurgias anual tenha aumentado de 5422 em 2012 para 7000 no final de 2014, e tenha concretizado o fim do primeiro semestre de 2015 com 5412 cirurgias realizadas. Atualmente, a fila de espera chega a 15.784 pacientes, dos quais 4517 são oriundos da subespecialidade coluna, 4568 referem-se ao joelho, e 3091 ao quadril. Essas três subespecialidades juntas representam cerca de 77% do total da fila de espera por uma cirurgia a se realizar.

A situação atual das filas deve-se, em parte, a uma política de maximização do número de cirurgias realizadas, curiosamente implantada no intuito de reduzir o tempo de espera. Ocorre que essa política acaba por priorizar cirurgias de menor duração, tendendo a postergar indefinidamente cirurgias de duração maior, que são difíceis de encaixar em pequenos espaços vagos dos expedientes diários. Com isso, filas imensas e tempos de espera proibitivos resultaram para procedimentos mais complexos. Essa problemática é a principal motivação desse estudo.

Diante do cenário exposto, este trabalho visa construir uma política semanal de planejamento de cirurgias que contemple todo o processo, desde a chegada do

paciente à fila de espera até sua liberação do centro de recuperação pós-cirúrgica. Tal política tem como objetivo maximizar a ocupação balanceada das salas de cirurgia, diferentemente da política atualmente adotada pelo INTO, visando um equilíbrio na realização de cirurgias, mais ou menos complexas, possibilitando, assim, uma melhor utilização dos recursos para todos os procedimentos disponíveis. Além disso, existe a preocupação com um número mínimo de cirurgias a serem realizadas, que está intimamente ligado à taxa de chegada de pacientes por subespecialidade, com o propósito de manter as filas em patamares reduzidos no longo prazo. Por fim, o número de cirurgias programadas deve levar em conta a disponibilidade de leitos para recuperação pós-cirúrgica, uma vez que, na ausência de leitos disponíveis, a cirurgia terá que ser cancelada.

Este trabalho está subdividido em mais cinco capítulos. O capítulo 2 traz uma revisão de trabalhos na literatura que abordam a mesma temática do estudo desenvolvido. O capítulo 3 apresenta o primeiro modelo matemático desenvolvido nesse estudo, visando um planejamento diário de cirurgias que maximize a utilização das salas de cirurgia. No capítulo 4, em uma primeira etapa, o modelo anterior é estendido para um planejamento semanal de cirurgias, e em um passo subsequente, as cirurgias são alocadas diariamente com o intuito também de minimizar a quantidade de equipes médicas extra. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos para essa modelagem, resultados esses que tiveram grande parcela motivacional para o desenvolvimento do modelo que é exposto na seção seguinte. O Capítulo 5 apresenta uma análise mais profunda dos diferentes tipos de cirurgia, visando classificá-las em agrupamentos similares considerando tanto o tempo de execução quanto o tempo de recuperação para cada tipo de procedimento. Esse estudo motivou a criação do último modelo matemático desenvolvido nesse trabalho, que objetiva uma melhor ocupação das salas de cirurgia. O Capítulo 5 também é destinado à apresentação dos resultados obtidos no último modelo. Para finalizar, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho de pesquisa realizado nessa dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Políticas de alocação de cirurgias desempenham um papel importante na gestão hospitalar. A criação de uma política não aderente causa impactos diretos em vários setores, principalmente o financeiro [e.g., 1]. Políticas inadequadas podem ocasionar desequilíbrios entre as taxas de entrada e saída em processos posteriores, como por exemplo a ala de recuperação. Isso, por sua vez, pode ocasionar um excesso de cancelamentos de cirurgias, comprometendo, assim, a capacidade do sistema. A má gestão também pode acarretar um aumento das filas no processo de entrada, ocasionando assim uma longa espera dos pacientes para realização das respectivas cirurgias.

Há uma vasta literatura que aborda problemas desse cunho. A maioria dos trabalhos, como o de MIN e YIH [2], foca em cirurgias eletivas, que são agendadas com antecedência, facilitando assim a tomada de decisão. Já trabalhos como o de J. BOWERS [3] abordam cirurgias não-eletivas e emergenciais, que não são planejadas e precisam ser realizadas em um curto espaço de tempo, necessitando assim de modelagens mais robustas. Quanto à metodologia, a maioria da literatura utiliza a modelagem inteira mista [e.g., 4], porém outras abordagens de pesquisa operacional também são empregadas. Emprega-se, por exemplo, programação estocástica para lidar com a natureza probabilística de algumas variáveis, como as taxa de chegada dos pacientes e de ocupação dos leitos [e.g., 5]. Outras técnicas também foram utilizadas como programação dinâmica [e.g., 6], programação quadrática [e.g., 1] e simulação [e.g., 3]. Para uma pesquisa mais detalhada sobre problemas de alocação de cirurgias, pode-se citar os excelentes trabalhos de CARDOEN *et al.* [7], E.W.HANS e P.T.VANBERKEL [8] e DEMEULEMEESTER *et al.* [9].

Existem, na literatura, várias maneiras de tratar o problema de alocação de cirurgias. A escolha da abordagem depende, naturalmente, do objetivo do tomador de decisão. A maioria das abordagens foca no centro cirúrgico, propondo sua melhor utilização [e.g. 10–12]. Concentrar-se em um único recurso, contudo, muitas vezes não resulta na melhor estratégia para o sistema como um todo [e.g., 5], e alguns

autores preferem construir uma modelagem mais detalhada a fim de melhor avaliar o sistema. Um estudo realizado por BLAKE [13] mostrou que o gargalo do sistema pode estar relacionado ao número de leitos disponíveis na ala de recuperação, e JONNALAGADA *et al.* [14] constatou, em um estudo de caso, que a indisponibilidade de leitos nessa ala era responsável por cerca de 15% dos cancelamentos de cirurgias. A taxa de ocupação dos leitos na ala de recuperação também foi tópico nos estudos [e.g., 1, 15–17]. Em BELIEN e DEMEULEMEESTER [1] e SAADOULI *et al.* [16] a chegada de pacientes é considerada estocástica, e em AUGUSTO *et al.* [17] avaliou-se o efeito de permitir a recuperação de pacientes no centro cirúrgico, quando a ala de recuperação encontra-se lotada.

Outra questão crítica, além da ocupação dos leitos, está relacionada à fila de espera para a realização de cirurgias. Filas congestionadas são muitas vezes a principal preocupação tanto dos pacientes quanto da gestão hospitalar [e.g., 9], pois podem levar a longos tempos de espera e à consequente deterioração da saúde dos pacientes antes mesmo da realização das cirurgias. BHATTACHARJEE e RAY [18] argumentam que uma cuidadosa e estruturada gestão do fluxo de pacientes pode reduzir o congestionamento, ocasionando melhora significativa na performance do hospital. Uma típica solução para a gestão da fila está relacionada à atribuição de prioridades aos pacientes [e.g. 2], de acordo com a gravidade de suas enfermidades. Tal medida tende a proporcionar menores tempos de espera para pacientes de alta prioridade. Outros autores, como ARINGHIERI *et al.* [12] e E.TANFANI e A.TESTI [19] definiram heurísticas para determinar os níveis de prioridade, no intuito de manter a ocupação dos leitos nivelada, isto é, constante para todas as especialidades. Todavia, todas essas abordagens não garantem que todas as especialidades, e suas respectivas complexidades, são servidas de igual maneira, visto que essa que será introduzida para a modelagem do INTO.

Por fim, existe um paradigma quanto à disposição das cirurgias nos centros cirúrgicos. É usual a utilização do *bloco fechado* [e.g., 8, 12, 20], ou seja, cada sessão de centro cirúrgico, que normalmente ocupa todo o expediente diário, é designada para uma única especialidade. Porém, em algumas situações, é possível que as cirurgias sejam realizadas em *bloco aberto*, no qual uma sessão pode contemplar cirurgias de diversas especialidades. Isso é viável quando determinados centros cirúrgicos são compatíveis com diversas especialidades. Não tão popular quanto a abordagem de *bloco fechado*, o *bloco aberto* foi avaliado por Y.LIU *et al.* [21] a partir de uma determinada heurística. O resultado encontrado foi significativo para instâncias grandes.

Conforme exposto no Capítulo 1, o INTO possui filas imensas de aguardo por cirurgias, com tempos de espera proibitivos para procedimentos mais complexos. Por isso esse trabalho se preocupou em avaliar o sistema do INTO como um todo, desde a chegada do paciente à fila até sua liberação da ala de recuperação pós-

cirúrgica. Com isso, o estudo foi fortemente balizado por esses três pilares: filas de espera por cirurgias, ocupação dos centros cirúrgico e disponibilidade de leitos.

A questão da ocupação dos centros cirúrgicos está intimamente ligada à necessidade de priorização das cirurgias mais complexas. Isso, quando analisado em conjunto com o tamanho das filas de espera pelas especialidades, permite o desenvolvimento de metodologias de Pesquisa Operacional que tratem de diminuir o tamanho dessas filas de espera no longo prazo.

Não menos importante é a questão da disponibilidade dos leitos de recuperação pós-cirúrgica, uma vez que se torna inviável planejar a realização de uma cirurgia sem que haja leito vago para acomodar o paciente depois. Nos próximos capítulos serão apresentadas as modelagens matemáticas propostas para o tratamento das filas de espera por cirurgias no INTO.

Capítulo 3

Planejamento diário de cirurgias

Esse capítulo é dedicado à apresentação do primeiro modelo matemático desenvolvido nesse estudo, visando um planejamento diário de cirurgias para o Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia que maximize a utilização das salas de cirurgia. É importante enfatizar que esse modelo contempla desde a entrada dos pacientes (**fila**) até a sua internação (**ocupação dos leitos**), passando pela utilização das salas de cirurgia.

Para a melhor compreensão do modelo, são definidos alguns conjuntos, subconjuntos e variáveis de decisão conforme Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

Tabela 3.1: **Conjuntos e Subconjuntos**

Conjuntos/ Subconjuntos	Descrição
$I_1 = \{1, \dots, N_{i1}\}$	disponibilidade salas de cirurgia INTO
$I_2 = \{1, \dots, N_{i2}\}$	disponibilidade salas de cirurgia Hospital Dia
$I = I_1 \cup I_2$	total de salas de cirurgias
$S = \{1, \dots, N_s\}$	cirurgias por subespecialidades
$J = \{1, \dots, N_j\}$	cirurgias candidatas a serem realizadas em um período programado
$J_n \in J$	cirurgias proibitivas no Hospital Dia
Tempo _{<i>j</i>}	tempo médio, em horas, esperado por cirurgia para cada subespecialidade
Taxa Entrada _{<i>s</i>}	demanda média, diária, de pacientes por subespecialidade
Limpeza _{<i>j</i>}	tempo de limpeza da sala referente a cirurgia <i>j</i>
Setup _{<i>r</i>}	tempo de preparação para a cirurgia <i>r</i>
<i>H</i>	tempo total, em horas, disponível para realização de cirurgia diariamente
R_{T_s}	tempo médio, em dias, de recuperação por subespecialidade
N_{leitos}	número de leitos disponíveis

O objetivo principal desse modelo é definir um planejamento diário de cirurgias de forma que a utilização sala de cirurgia seja maximizada, com a intenção de garantir que as cirurgias de maior duração também sejam realizadas. Note que maximizar a utilização da sala de cirurgia equivale a minimizar o tempo ocioso de todo o conjunto

Tabela 3.2: Variáveis decisão

Variáveis Decisão	Descrição
$x_{i,j}$	1 quando a cirurgia $j \in J$ é alocada à sala $i \in I$, 0 caso contrário
$L_{i,j,r}$	1 quando as cirurgias j e r são alocadas à sala i e a cirurgia j precede a cirurgia r , 0 caso contrário
S_j	tempo inicial da cirurgia j , para todo $j \in J$
Y_s	número de leitos destinados à subespecialidade s na ala de recuperação

de salas de cirurgia. Portanto, a função objetivo pode ser definida como:

$$\text{Max} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{Tempo}_j \cdot x_{i,j}, \quad (3.1)$$

logo, quando a cirurgia j é alocada na sala de cirurgia i , então a variável é definida como 1 e o tempo de cirurgia é adicionado na função objetivo (3.1); caso contrário $x_{i,j}$ recebe zero e o tempo de cirurgia não é contabilizado.

A primeira restrição do modelo estabelece que cada cirurgia é realizada uma única vez. Isso equivalente a dizer que cada cirurgia pode ser alocada no máximo a um sala de cirurgia, resultando nas seguintes inequações:

$$\sum_{i \in I} x_{i,j} \leq 1, \quad \forall j \in J. \quad (3.2)$$

A relação entre as variáveis $x_{i,j}$ e $L_{i,j,r}$ é estabelecida a partir das desigualdades (3.3) e (3.4), abaixo.

$$L_{i,j,r} + L_{i,r,j} \leq 0.5 * (x_{i,j} + x_{i,r}), \quad \forall i \in I, j \in J, r \in J \mid j \leq r. \quad (3.3)$$

$$L_{i,j,r} + L_{i,r,j} \geq x_{i,j} + x_{i,r} - 1, \quad \forall i \in I, j \in J, r \in J \mid j \leq r. \quad (3.4)$$

As inequações (3.3) e (3.4) agem conjuntamente, com j e r representando cirurgias distintas pertencentes ao conjunto J . Se nenhuma dessas cirurgias for alocada à sala i , o lado direito da Inequação (3.3) é definida como zero, enquanto o lado direito da Inequação (3.4) é igual a -1 . Isso implica que $-1 \leq L_{i,j,r} + L_{i,r,j} \leq 0$, assim, como se tratam de variáveis binárias, a soma deve ser zero, o que significa que ambas as variáveis devem ser definidas como zero. Se, por outro lado, uma única cirurgia j ou r for alocada à sala i , acrescenta-se $0,5$ ao lado direito da Inequação (3.3), enquanto o lado direito da Inequação (3.4) é zero. Isso também significa que $L_{i,j,r} + L_{i,r,j} = 0$, implicando que ambas as variáveis binárias assumem valor zero. Como consequência, essas cirurgias não são alocadas na mesma sala de cirurgia. Agora, se ambas as cirurgias são alocadas à sala i , o lado direito das duas Inequações (3.3) e (3.4) assumem valor 1. Desta forma, $L_{i,j,r} + L_{i,r,j} = 1$, o que implica

que somente uma dessas variáveis binárias é definida como 1. A cirurgia j precede a cirurgia r se $L_{i,j,r} = 1$ e o contrário é verdadeiro sempre que $L_{i,r,j} = 1$.

Agora, considere o seguinte conjunto de inequações, que contemplam o tempo das cirurgias alocadas:

$$S_r \geq S_j + \text{Tempo}_j + \text{Limpeza}_j + \text{Setup}_r + \\ -(H + \text{Limpeza}_j) \cdot (1 - L_{i,j,r}) \quad \forall i \in I, j \in J, r \in J \mid j \neq r, \quad (3.5)$$

$$S_j \leq H - \text{Time}_j \quad \forall j \in J, \quad (3.6)$$

A Ineq. (3.6) somente permite que sejam iniciadas cirurgias caso as mesmas possam ser finalizadas na janela diária disponível.

Para interpretar a Inequação (3.5), considere S_r , $r \in J$ como sendo o tempo inicial da cirurgia r , além de supor que a cirurgia j e r estejam alocadas na mesma sala $i \in I$, e que a cirurgia j precede a cirurgia r . Assim, a partir das Inequações (3.3) e (3.4), constata-se que $L_{i,j,r} = 1$, e, por consequência, o tempo da cirurgia r , denotado por S_r , deve ser superior a S_j acrescido do tempo de execução da cirurgia j , denotada por Tempo_j , além do tempo de limpeza da sala referente a cirurgia j (Limpeza_j) e o tempo de preparação para a cirurgia r (Setup_r). Caso nenhuma das cirurgias sejam alocadas à sala i , a restrição (3.5) será desativada para esse par de cirurgias, assim o lado direito da equação ficará negativo e consequentemente S_r poderá receber qualquer valor não-negativo.

A restrição (3.7) assegura que as cirurgias são realizadas de forma sequencial. Repare que, segundo (3.7), a $(n+1)$ -ésima cirurgia do tipo j só pode ser realizada depois que a n -ésima cirurgia do mesmo tipo tenha sido iniciada em alguma sala de cirurgia.

$$\sum_{i \in I} x_{i, j_{s(n+1)}} \leq \sum_{i \in I} x_{i, j_{s_n}} \quad \forall j_s, s \in S, \quad (3.7)$$

onde $J_s \subset J$ é um conjunto ordenado de todas as subespecialidades cirúrgicas $s \in S$ contidos no conjunto J que representa os candidatos a realização de cirurgia, e j_{s_n} é o n -ésimo elemento desse mesmo conjunto.

Lembre que este modelo também objetiva o gerenciamento de longo prazo das filas de todas as subespecialidades, ou seja, pretende-se que essas filas não cresçam de forma indevida. Para tal, foi estabelecido que o número mínimo de cirurgias a ser realizado diariamente para cada tipo de subespecialidade $s \in S$ deve ser superior à média diária de entrada de pacientes para aquela subespecialidade. Essa restrição, apresentada pela Inequação (3.8), tem também como objetivo obter o balanceamento entre as cirurgias realizadas, o que permite a redução das filas em

todas as subespecialidades cirúrgicas.

$$\sum_{j \in J_s} \sum_{i \in I} x_{i,j} \geq \text{Taxa Entrada}_s, \forall s \in S, \quad (3.8)$$

onde Taxa Entrada_s , $s \in S$ representa a demanda média diária de pacientes por subespecialidade.

Até agora, o modelo abordou questões relacionadas a demandas por serviços e capacidade das salas de cirurgia. Contudo, para que o planejamento seja viável, é necessário também verificar a disponibilidade dos leitos na ala de recuperação para que os pacientes submetidos à cirurgia sejam alocados na etapa pós-cirúrgica. Para modelar o gerenciamento dos leitos, foi considerado um conjunto de variáveis Y_s que representa o número de leitos disponíveis para cada subespecialidade $s \in S$. A gestão do fluxo dos pacientes desde o sala de cirurgia até a ala de recuperação é representada pela Inequação (3.9).

$$\sum_{j \in J_s} \sum_{i \in I} x_{i,j} \leq \frac{Y_s}{R_{T_s}}, \forall s \in S, \quad (3.9)$$

onde R_{T_s} é o tempo médio de recuperação para os pacientes referentes a cada subespecialidade $s \in S$.

De forma mais clara, a Inequação (3.9) detalha a relação entre a quantidade de cirurgias alocadas a uma determinada subespecialidade s e o número de leitos reservados para essa mesma subespecialidade na ala de recuperação. Considerando o tempo médio de recuperação R_{T_s} para a subespecialidade s , o lado direito da Inequação (3.9) representa o número médio de leitos liberados por dia para aquela subespecialidade. Conseqüentemente, a Inequação (3.9) garante que o número diário de cirurgias realizadas para cada subespecialidade não exceda o número de leitos liberados por dia para essa mesma subespecialidade.

Seja N_{leitos} o conjunto que denota o número total de leitos na ala de recuperação. A Inequação (3.10) garante que a soma dos leitos destinados a todas as subespecialidades não exceda o número total de leitos disponíveis na ala de recuperação.

$$\sum_{s \in S} Y_s \leq N_{\text{leitos}} \quad (3.10)$$

Por fim, uma peculiaridade em relação ao Hospital Dia: conforme comentado na Seção `refcap:int`, trata-se de uma unidade auxiliar e contígua, que atende cirurgias de menor duração e complexidade. As salas de cirurgia do Hospital Dia atendem somente Pé e Tornozelo, Mão, Fixador Externo e Tumor. Portanto, algumas subespecialidades não podem ser realizadas nas instalações desse hospital. Seja, então, $J_n \in J$ o subconjunto que representa tais cirurgias proibidas. Desta forma, a Equ-

ção (3.11) previne que qualquer cirurgia desse subconjunto seja realizada nessas instalações.

$$\sum_{i_2 \in I_2} \sum_{j \in J_n} x_{i,j} = 0. \quad (3.11)$$

O modelo completo, contemplando as restrições (3.2)-(3.11), pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{Tempo}_j \cdot x_{i,j} \\ & \text{Sujeito a} \\ & (3.2) - (3.11), \\ & x_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, \\ & L_{i,j,r} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, j \in J, r \in J, \\ & S_j \in \mathbb{R}^+ \quad \forall j \in J, \\ & Y_s \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall s \in S. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Vale ressaltar que nesta formulação diária, cada sala de cirurgia está preparada para realizar procedimentos de qualquer natureza, ou seja, essa formulação é baseada no conceito de **bloco aberto**, muito conhecido na literatura, onde cada sala de cirurgia pode receber, diariamente, um mix de cirurgias.

O modelo diário (3.12) foi implementado no software AIMMS[®] e resolvido com o otimizador CPLEX[®] 12.6. A solução ótima foi encontrada aproximadamente em **710 minutos** utilizando um notebook Intel-core i5 com 2.3GHz, 6MB RAM e Windows 7.

Este primeiro modelo apresentou um alto tempo de processamento, de aproximadamente **12 horas**, e não se deve esquecer que ele contempla apenas o planejamento diário de cirurgias, que não é o objetivo final. O que se deseja é um planejamento semanal de cirurgias, que seria impossível de ser resolvido contemplando-se todas as possíveis combinações de elementos dos subconjuntos abordados na formulação (3.12).

Para que a modelagem matemática por programação inteira tivesse sentido prático, ou seja, tivesse um tempo de processamento razoável, foi essencial o desenvolvimento um algoritmo de pré-processamento que reduzisse o espaço de busca do problema (3.12). Esse algoritmo é explicado de forma detalhada na Seção 4.1.

Capítulo 4

Planejamento semanal de cirurgias

Nesse capítulo é apresentado um modelo matemático que contempla um planejamento semanal de cirurgias para o INTO. Conforme comentado no capítulo anterior, antes de entrar no modelo propriamente dito, apresenta-se um algoritmo de pré-processamento desenvolvido com o intuito de reduzir o espaço de busca do problema (3.12), para que o modelo semanal proposto nesse capítulo tenha sentido prático, ou seja, tenha um tempo de processamento razoável.

4.1 Algoritmo de pré-processamento: diminuição do espaço de busca

Existe um esforço de processamento muito grande, no estudo em questão, no que diz respeito à exploração do espaço de busca do problema (3.12), uma vez que ele contempla todas as possíveis combinações de elementos dos subconjuntos abordados naquela formulação, fazendo com que a árvore de *branch-and-bound* tenha um tamanho proibitivo.

Com o intuito de reduzir esse espaço de busca, e atingir o objetivo final que é a programação semanal de cirurgias, foi construído um algoritmo de pré-processamento que tem como resultado uma matriz de cirurgias viáveis para o INTO.

Vale ressaltar, ainda, que, na formulação semanal, ao contrário do que foi feito na formulação diária, cada sala de cirurgia está preparada para realizar apenas procedimentos de mesma natureza, ou seja, essa formulação é baseada no conceito de **bloco fechado**, muito conhecido na literatura, onde, diariamente, uma vez escolhido o tipo de cirurgia, cada sala de cirurgia realiza apenas procedimentos do mesmo tipo.

Algoritmo de geração da matriz de cirurgias viáveis:

1. **Passo 0:** Para cada tipo (subespecialidade) de cirurgia i , seja $Ttotal_i$ =(tempo médio de execução da cirurgia i + tempo de limpeza da sala de cirurgia + tempo de preparo da cirurgia i). Dividir o número total de horas disponíveis por dia sala de cirurgia (9 horas) por $Ttotal_{min} = \min_i\{Ttotal_i\}$. Desta forma, o número $k = \left\lfloor \frac{9}{Ttotal_{min}} \right\rfloor$ representa o número máximo de cirurgias de um mesmo tipo (subespecialidade) que podem ser realizadas diariamente em qualquer sala de cirurgia. Por exemplo, se $Ttotal_{min} = 2$ horas, então $k = \left\lfloor \frac{9}{2} \right\rfloor = 4$.
2. **Passo 1:** Para cada tipo de cirurgia i (subespecialidade), gerar combinações viáveis contendo até l cirurgias do tipo i de tal forma que $l \leq k$. Por exemplo, se o tipo de cirurgia i possui $Ttotal_i = 3$, então as combinações possíveis para o tipo de cirurgia i são: fazer nenhuma cirurgia daquele tipo, fazer apenas 1 cirurgia daquele tipo, fazer duas cirurgias daquele tipo ou fazer três cirurgias daquele tipo.
 - Desconsiderando-se todas as combinações inviáveis, a matriz de cirurgias referente ao INTO fica determinada.
3. **Passo 2:** Dentre as combinações de cirurgias viáveis encontrada no Passo 1, verificar quais combinações contêm somente o conjunto de cirurgias que podem ser realizadas no Hospital Dia.
 - Feito isso, a matriz de combinações de cirurgias viáveis para o Hospital Dia fica determinada.

Fim(Algoritmo)

No Passo 1 pode parecer estranho considerar “até l ” em vez de “exatamente l ” cirurgias na geração das combinações viáveis, uma vez que o intuito é maximizar a ocupação salas de cirurgia, mas o “até” é importante pois não necessariamente haverá leitos vagos na ala de recuperação para se fazer sempre o número máximo de cirurgias possível.

Esse algoritmo foi desenvolvido utilizando o software estatístico R[®], e o tempo para obtenção da matriz de cirurgias viáveis foi de **35,88 segundos**.

4.2 Modelo de planejamento semanal de cirurgias

Para a melhor compreensão do modelo, são definidos, previamente, os conjuntos de dados e as variáveis de decisão conforme a Tabela 4.1 e a Tabela 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1: **Conjuntos e Subconjuntos**

Conjuntos/ Subconjuntos	Descrição
$L = \{1, \dots, N_l\}$	representa todas as possíveis subespecialidades cirúrgicas
$I = \{1, \dots, N_i\}$	quantidade de combinações viáveis para o INTO
$J = \{1, \dots, N_j\}$	quantidade de combinações viáveis para o Hospital Dia
$[Mat_{INTO}]_{li}$	matriz de combinações viáveis para o INTO
$[Mat_{DIA}]_{lj}$	matriz de combinações viáveis para o Hospital Dia
c_i	tempo de ocupação da sala de cirurgia pela <i>combinação_i</i>
d_j	tempo de ocupação da sala de cirurgia pela <i>combinação_j</i>
Taxa Entrada _l	demanda média, semanal, de pacientes por subespecialidade
$l_k \in L$	conjunto de cirurgias que são realizadas no Hospital Dia
$l_z \in L$	conjunto de cirurgias que não são realizadas no Hospital Dia
R_{Tl}	tempo médio de recuperação, em semanas, por subespecialidade
ρ_l	limite máximo de cirurgia por subespecialidade
N_{INTO}	número de leitos disponíveis no Hospital INTO
N_{DIA}	número de leitos disponíveis no Hospital Dia
S_{INTO}	número de salas de cirurgias no INTO
S_{DIA}	número de salas de cirurgias no Hospital Dia

Tabela 4.2: **Variáveis de decisão**

Variáveis Decisão	Descrição
x_i	> 0 se a <i>combinação_i</i> for considerada na solução, 0 caso contrário
y_j	> 0 se a <i>combinação_j</i> for considerada na solução, 0 caso contrário
Leitos _{INTO}	número de leitos total do INTO
Leitos _{DIA}	número de leitos total do Hospital DIA
Salas _{INTO}	número de salas de cirurgia do INTO
Salas _{DIA}	número de salas de cirurgia do Hospital Dia
W_{INTO_l}	número de leitos do INTO, por subespecialidade
W_{DIA_l}	número de leitos do Hospital Dia, por subespecialidade
$Cirx_l$	1 se a <i>cirurgia_l</i> é realizada no INTO, 0 caso contrário
$Ciry_l$	1 se a <i>cirurgia_l</i> é realizada no Hospital Dia, 0 caso contrário

O modelo semanal visa, então, maximizar a utilização de cada sala de cirurgia,

mas, ao mesmo tempo, objetiva minimizar a quantidade de leitos de recuperação e de salas de cirurgia utilizadas, dado que só se deva alocar o número necessário tanto de leitos quanto de salas para realização dos procedimentos. Desta forma, a função objetivo pode ser definida como:

$$\text{Max } \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i + \sum_{j \in J} d_j \cdot y_j - \text{Leitos}_{INTO} - \text{Leitos}_{DIA} - \text{Salas}_{INTO} - \text{Salas}_{DIA}, \quad (4.1)$$

Como se deseja maximizar a utilização das salas de cirurgia, essas variáveis contam positivamente na função objetivo. Já as variáveis Leitos_{INTO} , Leitos_{DIA} , Salas_{INTO} e Salas_{DIA} contam de forma negativa na função objetivo para garantir a minimização da quantidade de leitos de recuperação e das salas necessárias.

A primeira restrição do modelo tem como objetivo garantir o gerenciamento da fila. De forma objetiva, o número de cirurgias realizadas semanalmente por cada uma das subespecialidades $l \in L$ deve ser superior à taxa média de entrada semanal de pacientes, de forma a garantir um balanceamento das cirurgias realizadas. Essa restrição representada pela Inequação (4.2).

$$\sum_{i \in I} \text{Mat}_{INTO,l,i} \cdot x_i + \sum_{j \in J} \text{Mat}_{INTO,l,j} \cdot y_j \geq \text{Taxa Entrada}_l, \quad \forall l \in L, \quad (4.2)$$

Não basta avaliar somente a quantidade mínima de cirurgias a serem realizadas para cada subespecialidade (4.2), é necessário também verificar a quantidade máxima de cirurgias que podem ser realizadas para cada subespecialidade, quantidade essa que está atrelada à disponibilidade dos leitos de recuperação para cada subespecialidade. Nesse sentido, as inequações (4.3) e (4.4), a seguir, consideram o gerenciamento de leitos, contemplando as variáveis de decisão $W_{INTO,l}$ e $W_{DIA,l}$, ambas inteiras, responsáveis pelo dimensionamento dos leitos por subespecialidade.

$$\sum_{i \in I} \text{Mat}_{INTO,l,i} \cdot x_i \leq \frac{W_{INTO,l}}{R_{Tl}}, \quad \forall l \in L, \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in J} \text{Mat}_{DIA,l_k,j} \cdot y_j \leq \frac{W_{DIA,l_k}}{R_{Tl_k}}, \quad \forall l_k \in L, \quad (4.4)$$

Mesmo considerando as restrições (4.3) e (4.4), o modelo alocava um número muito grande de cirurgias com tempo de internação curto, que implicavam em maior rotatividade dos leitos de recuperação, como por exemplo as cirurgias de mão. Isso gerava um planejamento semanal impossível de ser cumprido com as equipes médicas existentes. Para mitigar esse efeito, foi criado o parâmetro ρ_l , por subespecialidade, que ajusta o máximo de cirurgias de cada tipo que devem ser feitas, em função de

suas taxas de entrada e tempo de internação, conforme Inequação (4.5).

$$\sum_{i \in I} Mat_{INTO_l, i} \cdot x_i + \sum_{j \in J} Mat_{INTO_l, j} \cdot y_j \leq Taxa_{Entrada_l} * \rho_l, \forall l \in L. \quad (4.5)$$

O próximo conjunto de restrições, representado pelas Inequações (4.6) - (4.9), garante que leitos só sejam alocados a uma determinada subespecialidade e em um determinado hospital se a respectiva subespecialidade for alocada pelo modelo.

$$\sum_{i \in I} Mat_{INTO_l, i} \cdot x_i \geq Cirx_l, \forall l \in L, \quad (4.6)$$

$$W_{INTO_l} \leq N_{INTO} \cdot Cirx_l, \forall l \in L, \quad (4.7)$$

$$\sum_{j \in J} Mat_{DIA_{l_k}, j} \cdot y_j \geq Ciry_{l_k}, \forall l_k \in L, \quad (4.8)$$

$$W_{DIA_{l_k}} \leq N_{DIA} \cdot Ciry_{l_k}, \forall l_k \in L, \quad (4.9)$$

onde $Cirx_l$ e $Ciry_{l_k}$ são variáveis de decisão binárias e N_{INTO} e N_{DIA} são, respectivamente, a quantidade de leitos disponíveis no INTO e no Hospital Dia. Desta forma, se uma determinada especialidade l_k não for alocada, por exemplo, no Hospital Dia, conseqüentemente, a variável $Ciry_{l_k} = 0$ e, por fim, $W_{DIA_{l_k}}$ assume zero, não alocando leito para tal subespecialidade.

O conjunto de restrições representado pelas Inequações (4.10) - (4.14) diz respeito ao dimensionamento dos leitos. Essencialmente, elas garantem que a soma do número total de leitos disponibilizados para cada especialidade não pode exceder o número total de leitos disponível na ala de recuperação para aquela subespecialidade. Além disso, a restrição (4.12) garante que cirurgias que não podem ser alocadas ao Hospital Dia (l_z) de fato não o sejam.

$$\sum_{l \in L} W_{INTO_l} \leq Leitos_{INTO}, \quad (4.10)$$

$$\sum_{l_k \in L} W_{DIA_{l_k}} \leq Leitos_{DIA}, \quad (4.11)$$

$$\sum_{l_z \in L} W_{DIA_{l_z}} = 0, \quad (4.12)$$

$$Leitos_{INTO} \leq N_{INTO}, \quad (4.13)$$

$$Leitos_{DIA} \leq N_{DIA}, \quad (4.14)$$

onde N_{INTO} e N_{DIA} são as quantidades de leitos presentes na ala de recuperação em cada uma das instalações médicas.

Por fim, o último conjunto de restrições, representado pelas Inequações (4.15) - (4.18), refere-se à disponibilidade semanal das salas de cirurgia em cada um dos hospitais.

$$\sum_{i \in I} x_i \leq Salas_{INTO}, \quad (4.15)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq Salas_{DIA}, \quad (4.16)$$

$$Salas_{INTO} \leq S_{INTO}, \quad (4.17)$$

$$Salas_{DIA} \leq S_{DIA}, \quad (4.18)$$

O problema completo, considerando as restrições (4.2)-(4.16), pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i + \sum_{j \in J} d_j \cdot y_j - Leitos_{INTO} - Leitos_{DIA} - Salas_{INTO} - \\ & \text{Salas}_{DIA} \\ & \text{Sujeito a (4.2) - (4.18), e} \\ & x_i \in \mathbb{Z}^+, \forall i \in I, \\ & y_j \in \mathbb{Z}^+, \forall j \in J, \\ & Leitos_{INTO} \in \mathbb{Z}^+, \\ & Leitos_{DIA} \in \mathbb{Z}^+, \\ & Salas_{INTO} \in \mathbb{Z}^+, \\ & Salas_{DIA} \in \mathbb{Z}^+, \\ & W_{INTO_l} \in \mathbb{Z}^+, \forall l \in L, \\ & W_{DIA_l} \in \mathbb{Z}^+, \forall l \in L, \\ & \rho \in \mathbb{R}^+, \\ & Cirx_l \in \{0, 1\}, \forall l \in L, \\ & Ciry_l \in \{0, 1\}, \forall l \in L. \end{aligned} \quad (4.19)$$

O modelo (4.19) foi implementado no software Xpress[®], e o tempo para obtenção da solução ótima foi de 0,437 segundos e tem um total de 105 variáveis e 88 restrições. Como resultado, tem-se a quantidade ótima de cirurgias semanal por

subespecialidade e o dimensionamento de leitos na ala de recuperação.

Esse modelo não contempla, porém, o escalonamento das cirurgias para cada um dos dias da semana. A Seção 4.3, apresenta o modelo desenvolvido para esse fim.

4.3 Modelo de escalonamento semanal de cirurgias

Utilizando os resultados do modelo de planejamento semanal, apresentado na Seção 4.2, foi desenvolvida uma nova modelagem com o objetivo de escalonar as cirurgias para cada um dos dias da semana, levando em conta as restrições operacionais mapeadas no sistema do INTO. Para melhor compreensão desse modelo, foram definidos alguns conjuntos e variáveis de decisão conforme pode ser visto nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tabela 4.3: **Conjuntos e Subconjuntos**

Conjuntos/ Subconjuntos	Descrição
$L = \{1, \dots, N_l\}$ Mat_{INTO}^* Mat_{DIA}^*	representa todas as possíveis subespecialidades cirúrgicas são submatrizes das matrizes Mat_{INTO} , considera a solução ótima do modelo de planejamento são submatrizes das matrizes Mat_{DIA} considera a solução ótima do modelo de planejamento
$I^* = \{1, \dots, N_i^*\}$	quantidade de combinações de cirurgias para o INTO referente a solução ótima do modelo de planejamento
$J^* = \{1, \dots, N_j^*\}$	quantidade de combinações de cirurgias para o Hospital Dia referente a solução ótima do modelo de planejamento
$K = \{1, \dots, N_k\}$	quantidade de salas de cirurgias disponíveis INTO
$Z = \{1, \dots, N_z\}$	quantidade de salas de cirurgias disponíveis Hospital Dia
$D = \{1, \dots, N_d\}$	representa os dias da semana (Segunda-feira a Sexta-feira.)
Q_i	quantidade máxima disponível para cada <i>combinação</i> _{i}
Q_j	quantidade máxima disponível para cada <i>combinação</i> _{j}
$T_{l,d}$	representa a disponibilidade de equipe médica para realizar a cirurgia da subespecialidade $l \in L$ no dia da semana $d \in D$

Esse modelo tem como objetivo principal maximizar a ocupação diária das salas de cirurgia e ao mesmo tempo minimizar a necessidade de equipe médica, conforme a função objetivo 4.20.

Tabela 4.4: Variáveis de decisão

Variáveis Decisão	Descrição
$x_{i,d,k}$	> 0 se a <i>combinação</i> _{i} for alocada no <i>dia</i> _{d} para a sala de <i>cirurgia</i> _{k}
$y_{j,d,z}$	> 0 se a <i>combinação</i> _{j} for alocada no <i>dia</i> _{d} para a sala de <i>cirurgia</i> _{k}
$e_{l,d}$	representa a quantidade necessária de equipe médica extra por subespecialidade $l \in L$ para cada dia $d \in D$
θ	quantidade máxima de equipe médica extra permitida
Q_i	quantidade máxima disponível para cada <i>combinação</i> _{i}
Q_j	quantidade máxima disponível para cada <i>combinação</i> _{j}

$$\text{Max} \sum_{i \in I^*} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} x_{i,d,k} + \sum_{j \in J^*} \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z} y_{j,d,z} - \left(\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} e_{l,d} + \theta \right) \quad (4.20)$$

onde $x_{i,d,k}$, $y_{j,d,z}$, $e_{l,d}$ e θ são variáveis de decisão inteiras e positivas. Como o intuito é maximizar a ocupação diária tanto a variável $x_{i,d,k}$ e $y_{j,d,z}$ são contabilizadas de forma positiva na função objetivo. Já a variável $e_{l,d}$ age de forma negativa na função objetivo visto que o ideal é não usar equipe extra, assim como a variável θ que quanto sua unidade de medida melhor.

O primeiro conjunto de restrições do modelo, representado pelas inequações (4.21) e (4.22), tem como objetivo garantir que para cada sala de cirurgia cirúrgico seja alocada no máximo uma combinação de cirurgias.

$$\sum_{i \in I^*} x_{i,d,k} \leq 1, \quad \forall d \in D, \quad \forall k \in K. \quad (4.21)$$

$$\sum_{j \in J^*} y_{j,d,z} \leq 1, \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in Z. \quad (4.22)$$

Seja Q_i o número de vezes que a combinação de cirurgias i aparece na solução ótima de (4.19) para o INTO, e seja Q_j o número de vezes que a combinação de cirurgias j aparece na solução ótima de (4.19) para o Hospital Dia. As equações (4.23) e (4.24) estabelecem as relações entre essas quantidades e as variáveis de decisão $x_{i,d,k}$ e $y_{j,d,z}$.

$$\sum_{d \in D} \sum_{k \in K} x_{i,d,k} = Q_i, \quad \forall i \in I^*. \quad (4.23)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{z \in Z} y_{j,d,z} = Q_j, \quad \forall j \in J^*. \quad (4.24)$$

É muito importante, também, verificar a disponibilidade de realização de determinadas subespecialidades cirúrgicas em alguns dias da semana, uma vez que nem todas as equipes médicas operam em todos os dias da semana. Sejam, então, os

subconjuntos $D_{n,l} \in D$ que representam os dias inativos para cada uma das subespecialidades $l \in L$. Desta forma, as restrições (4.25) e (4.26) forçam a não realização desses tipos de cirurgias nesses determinados dias.

$$\sum_{i \in I} \text{MatINTO}_{l,i}^* \cdot x_{i,d,k} = 0 \quad \forall l \in L, \quad \forall d \in D_{n,l}, \quad \forall k \in K. \quad (4.25)$$

$$\sum_{j \in J} \text{MatDIA}_{l,j}^* \cdot y_{j,d,z} = 0 \quad \forall l \in L, \quad \forall d \in D_{n,l}, \quad \forall z \in Z. \quad (4.26)$$

Seja $T_{l,d}$ o conjunto que representa a disponibilidade de equipe médica para realizar uma cirurgia da subespecialidade $l \in L$ no dia da semana $d \in D$. O índice $i_l \in I^*$ restringe as subespecialidades do tipo l dentro das combinações ótimas. Por fim, conforme já definido anteriormente, as variáveis de decisão $e_{l,d}$ representam a quantidade necessária de equipe médica extra por subespecialidade $l \in L$ para cada dia da semana $d \in D$. Desta forma, as Inequações (4.27) e (4.28) representam o máximo de equipe médica que pode ser utilizado em cada dia d para cada subespecialidade médica l .

$$\sum_{k \in K} x_{i_l,d,k} - (T_{l,d} + e_{l,d}) \leq 0, \quad \forall i_l \in I^*, \quad \forall d \in D. \quad (4.27)$$

$$\sum_{z \in Z} y_{i_l,d,z} - (T_{l,d} + e_{l,d}) \leq 0, \quad \forall i_l \in I^*, \quad \forall d \in D. \quad (4.28)$$

Por fim, a Inequação 4.29 é responsável por limitar superiormente a quantidade de equipe médica extra que pode ser usada diariamente para cada subespecialidade, de tal forma que não haja um desequilíbrio na realização dos procedimentos cirúrgicos.

$$(T_{l,d} + e_{l,d})/T_{l,d} \leq \theta, \quad \forall l \in L, \quad \forall d \in D. \quad (4.29)$$

O problema completo, então, considerando as restrições (4.21)-(4.29), pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} & \text{Max } \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} x_{i,d,k} + \sum_{j \in J} \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z} y_{j,d,z} - (\sum_{l \in L} \sum_{d \in D} e_{l,d} + \theta) \\ & \text{Sujeito a (4.21) - (4.29), e} \\ & x_{i,d,k} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I^*, \quad \forall d \in D, \quad \forall k \in K, \\ & y_{j,d,z} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J^*, \quad \forall d \in D, \quad \forall z \in Z, \\ & e_{l,d} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall l \in L, \quad \forall d \in D, \\ & \theta \in \mathbb{R}^+. \end{aligned} \quad (4.30)$$

O modelo (4.30) implementado no software Xpress[®] tem um total de 1081 va-

riáveis e 399 restrições, e o tempo para obtenção da solução ótima foi de 0,124 segundos. Como resultado, tem-se o escalonamento ótimo de cirurgias na semana porsubespecialidades, considerando a utilização de equipe médica extra quando necessário.

As Seções 4.4 e 4.5 mostram os resultados para os modelos 4.19 e 4.30 propostos nesse Capítulo.

4.4 Resultados de aplicação do modelo de planejamento semanal de cirurgias

Para a aplicação do modelo de planejamento semanal de cirurgias, apresentado na Seção 4.2, dois parâmetros são muito importantes: a taxa de chegada dos pacientes por subespecialidade, que possui forte impacto no tamanho das filas de espera; e o tempo de recuperação dos pacientes por subespecialidade, que, juntamente com a disponibilidade dos leitos de recuperação, impacta na possibilidade ou não de realização das cirurgias. Esses parâmetros foram processados a partir de bases de dados históricas cujo escopo foi entre Janeiro/2012 e Julho/2015. A base de dados que computa a entrada de paciente no sistema do INTO apresenta tanto a data quanto a subespecialidade que o paciente se enquadra possibilitando assim o cálculo da taxa de entrada de pacientes, semanal, para cada uma das subespecialidades. Já a base dos procedimentos cirúrgicos realizados compreende tanto o tempo de cirurgia quanto o tempo de internação para cada um dos pacientes, possibilitando, assim, para cada subespecialidade estimar o tempo de cirurgia e internação. Medidas essas importante para a aplicação do algoritmo de pré-processamento para a diminuição do espaço de busca dos modelos de planejamento e escalonamento, apresentado na Seção 4.1. A Tabela 4.5 apresenta de forma sintetizada esses dados de entrada.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da aplicação do algoritmo de pré-processamento para a diminuição do espaço de busca dos modelos de planejamento e escalonamento, apresentado na Seção 4.1. Como resultado desse algoritmo, tem-se as matrizes de combinações de cirurgias viáveis para o INTO e para o Hospital Dia, onde as linhas são as subespecialidades cirúrgicas e as colunas são as combinações viáveis. A Tabela 4.6 mostra, então, a quantidade de combinações viáveis para cada uma das unidades hospitalares.

Para a aplicação do modelo, faz-se ainda necessário lembrar alguns parâmetros referentes à infraestrutura disponível no INTO. O hospital apresenta dezoito salas de cirurgia em uso. Dessas, quinze estão localizadas na unidade principal do INTO, e as três restantes estão localizadas no Hospital Dia, que atende cirurgias de menor

Tabela 4.5: Taxa Entrada, Tempo Cirurgia e Tempo de Recuperação

Especialidade Cirúrgica	Taxa Entrada (pacientes/semana)	Tempo Cirurgia (horas)	Tempo Recuperação (semanas)
Mão	30,47	1,74	0,42
Pé e Tornozelo	14,88	2,11	0,76
Fixador Externo	3,78	1,79	1,24
Tumor	6,75	1,86	0,86
Coluna	13,04	4,61	2,47
Crânio Maxilo-Facial	6,57	3,11	0,66
Infantil	9,91	2,03	0,81
Joelho	32,19	2,97	1,21
Microcirurgia	4,93	2,33	1,19
Ombro e Cotovelo	12,36	3,15	0,65
Quadril	21,19	2,88	2,17
Trauma Adulto	10,13	2,71	1,88
Trauma Idoso	2,58	2,86	2,41

Tabela 4.6: Combinações viáveis

Unidade Hospitalar	Combinações Viáveis
Hospital INTO	34
Hospital Dia	15

duração e complexidade. Já em relação aos leitos de recuperação, há um total de duzentos e setenta e três, dos quais duzentos e cinquenta e cinco estão no INTO e os demais (dezoito) estão no Hospital Dia. Vale lembrar que o paciente só pode ser internado em um leito pertencente à unidade na qual foi operado. Além disso, são disponibilizadas nove horas diárias para a realização das cirurgias, de Segunda-Feira até Sexta-Feira.

A Tabela 4.7 e a Tabela 4.8 mostram os resultados da aplicação do modelo de planejamento semanal de cirurgias, apresentado na Seção 4.2, para os dados históricos compreendidos entre Janeiro/2012 e Julho/2015 coletados no INTO.

A Tabela 4.7 mostra a quantidade ótima de cirurgias a serem realizadas, por cada uma das subespecialidades cirúrgicas, em cada uma das unidades hospitalares. O planejamento semanal de cirurgias totaliza 189 (cento e oitenta e nove cirurgias), o que remete a quase 500 (quinhentas) horas de cirurgias semanais e uma ocupação total de aproximadamente 65,12% salas de cirurgia, sendo 86,5% deles no INTO e 13,5% no Hospital Dia. Além disso, das trinta e quatro combinações viáveis de cirurgia para o INTO e das quinze para o Hospital Dia, somente dezesseis combinações foram consideradas na solução ótima, e algumas aparecem mais de uma vez na solução.

A Tabela 4.8 apresenta a quantidade necessária de leitos de recuperação por subespecialidade. São necessários, no total, duzentos e trinta e um, sendo duzentos

Tabela 4.7: **Cirurgias por Especialidade e Unidade Hospitalar**

Especialidade Cirúrgica	Hospital INTO	Hospital Dia
Mão	0	35
Pé e Tornozelo	12	3
Fixador Externo	4	0
Tumor	8	0
Coluna	14	0
Crânio Maxilo-Facial	8	0
Infantil	12	0
Joelho	34	0
Microcirurgia	6	0
Ombro e Cotovelo	16	0
Quadril	22	0
Trauma Adulto	12	0
Trauma Idoso	3	0

e treze no INTO e dezoito no Hospital Dia. Em relação ao total de leitos disponíveis, existe uma sobra de quarenta e dois leitos no INTO, o que se traduz em uma folga para o sistema.

Tabela 4.8: **Leitos por Especialidade e Unidade Hospitalar**

Especialidade Cirúrgica	Hospital INTO	Hospital Dia
Mão	0	15
Pé e Tornozelo	10	3
Fixador Externo	5	0
Tumor	7	0
Coluna	35	0
Crânio Maxilo-Facial	6	0
Infantil	10	0
Joelho	42	0
Microcirurgia	8	0
Ombro e Cotovelo	11	0
Quadril	48	0
Trauma Adulto	23	0
Trauma Idoso	8	0

A Figura 4.2 mostra a distribuição percentual dos leitos de recuperação dimensionados para o Hospital Dia. Essa unidade tem 83,33% de seus leitos alocados a pacientes que realizam cirurgias de Mão.

A Figura 4.1 mostra a distribuição percentual dos leitos de recuperação dimensionados para o INTO. Vale ressaltar que três das treze subespecialidades, a saber, Quadril, Joelho e Coluna ocupam mais de 50% dos leitos dimensionados para o INTO. Essas cirurgias possuem altas taxas de entrada de pacientes e tempos de

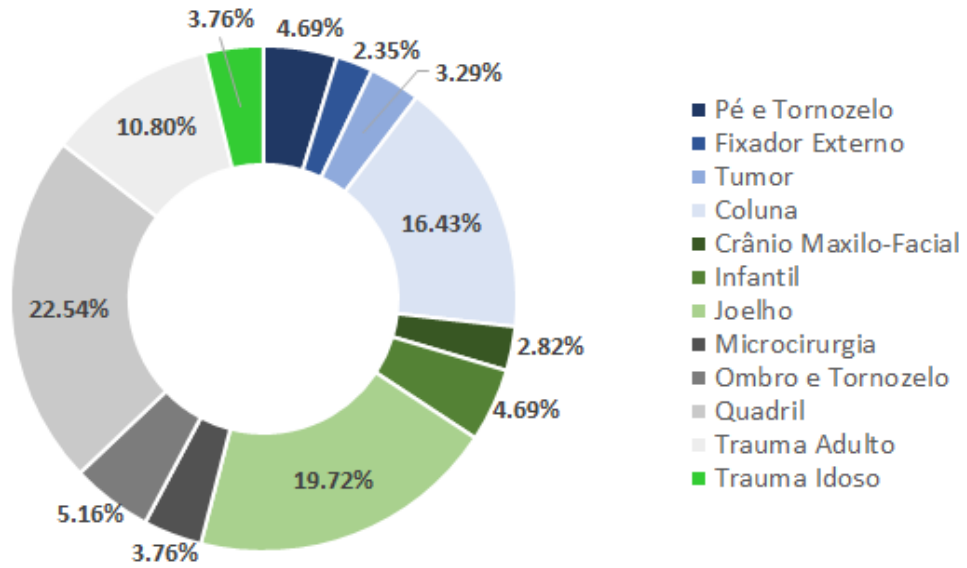


Figura 4.1: Dimensionamento de Leitos INTO

internação altos também, vide Tabela 4.5.

O modelo 4.19 apresentou como resultado a quantidade ótima semanal de cirurgias que devem ser realizadas por subespecialidade, além do dimensionamento dos leitos de recuperação. Conforme já mencionado ao final da Seção 4.2, esse modelo não contempla, contudo, o escalonamento das cirurgias para cada um dos dias da semana, onde torna-se necessário analisar a disponibilidade diária das equipes médicas. A Seção 4.3, apresentou o modelo 4.30 desenvolvido para esse fim, e a Seção 4.5 mostra os resultados para essa modelagem.

4.5 Resultados de aplicação do modelo de escalonamento semanal de cirurgias

Conforme relatado na Seção 4.3, o modelo de escalonamento semanal 4.30 utiliza os resultados da modelagem de planejamento semanal, a fim de escalonar as cirurgias para cada um dos dias da semana, levando em conta as restrições operacionais mapeadas no sistema do INTO. Esse modelo tem como objetivo principal maximizar a ocupação diária das salas de cirurgia e ao mesmo tempo minimizar a necessidade de equipe médica.

A Tabela 4.9 mostra as 16 combinações de cirurgias ótimas escolhidas pelo modelo 4.19, de planejamento semanal. Para cada combinação, são descritos: a subespecialidade cirúrgica, o total e cirurgias dentro da combinação, e quantas vezes

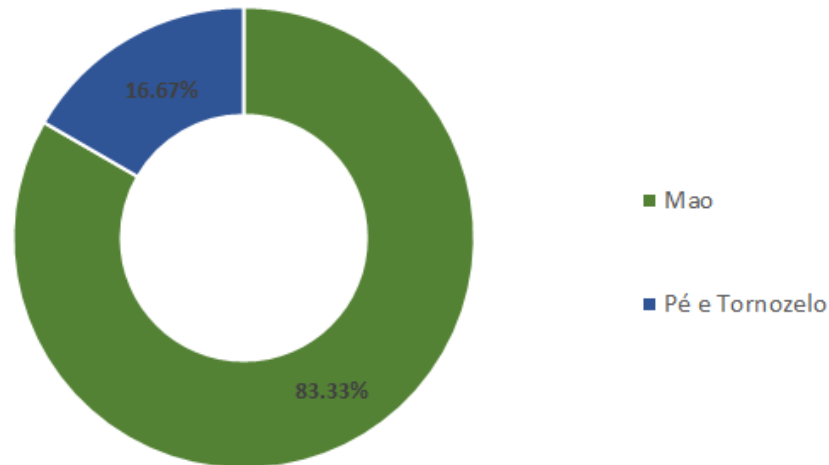


Figura 4.2: Dimensionamento de Leitos Hospital DIA

aquela combinação aparece na solução. As combinações 1, 2 e 4 são designadas ao Hospital Dia, as restantes ao INTO.

A Tabela 4.10 apresenta a disponibilidade diária de equipe médica para cada subespecialidade. Nessa tabela, as subespecialidades Trauma Adulto e Trauma Idoso estão concentrados na subespecialidades Trauma. Entradas vazias na Tabela 4.10 representam inatividade de determinada subespecialidades naquele dia específico.

No modelo de escalonamento semanal 4.30, a variável θ representa um limitante superior para a quantidade de equipe médica extra que pode ser usada diariamente para cada subespecialidade. Com auxílio dos especialistas, determinou-se que um valor viável para θ seria de 2 unidades.

As Tabelas 4.11 e 4.12 mostra os resultados do escalonamento semanal das equipes médicas por salas de cirurgia para o INTO e o Hospital Dia, respectivamente.

Ao contrastar a Tabela 4.10 com as Tabelas 4.11 e 4.12, nota-se que algumas subespecialidades demandam maior quantidade de equipe médica diariamente do que o planejamento atual, o que é contabilizado pela variável $e_{l,d}$ apresentada na Seção 4.3, referente à quantidade necessária de equipe médica extra por subespecialidade.

A Tabela 4.13 mostra a diferença entre o escalonamento diário proposto pelo modelo 4.30 e o realizado atualmente pelo INTO. Os valores positivos traduzem a necessidade do incremento daquela ordem no número de equipes médicas por sala de cirurgia em cada dia da semana. Os valores negativos mostram uma maior demanda planejada pelo INTO do que a encontrada pelo modelo. Já as entradas nulas refletem uma igualdade entre as duas visões.

A Tabela 4.14 mostra, de forma consolidada, a demanda semanal de equipes médicas por subespecialidade tanto para o planejamento atual feito pelo INTO quanto

Tabela 4.9: **Combinações ótimas do modelo de planejamento**

Combinação	Especialidade cirúrgica	Total de cirurgias	Número de repetições
1	Mão	3	1
2	Mão	4	8
3	Pé e Tornozelo	3	4
4	Pé e Tornozelo	3	1
5	Fixador Externo	4	1
6	Tumor	4	2
7	Coluna	1	14
8	Crânio Maxilo-Facial	2	4
9	Infantil	3	4
10	Joelho	2	17
11	Microcirurgia	3	2
12	Ombro e Cotovelo	2	8
13	Quadril	2	11
14	Trauma Adulto	2	6
15	Trauma Idoso	2	1
16	Trauma Idoso	1	1

para o proposto pelo modelo 4.30. Pode-se verificar que não são utilizados todos as noventa salas de cirurgia disponibilizadas, conforme Capítulo 1, no planejamento atual feito pelo INTO, e sim oitenta e uma salas de cirurgia. Nessa mesma tabela, criou-se uma coluna denominada “Diferença”, que mostra quais subespecialidades estão com seu planejamento atual (INTO) alinhado com o proposto pelo modelo (entradas nulas), e quais estão subestimados (entradas positivas) e sobrestimados (entradas negativas). No total, verifica-se uma necessidade de quatro salas de cirurgias (e equipes médicas correspondentes) a mais do que está planejado semanalmente, mas, mesmo na modelagem atual não de utilizam as noventa salas de cirurgia.

Por fim, a Tabela 4.15 e a Tabela 4.16 mostram o escalonamento de cirurgias referente ao primeiro dia útil da Semana, respectivamente, para o INTO e para o Hospital DIA.

Lembrando que podem ser alocadas no máximo quatro cirurgias por dia, de acordo com as nove horas disponíveis por salas de cirurgia, note que as subespecialidades que alocam apenas uma única cirurgia por sala de cirurgia, diariamente, são exatamente aquelas relacionadas a procedimentos mais complexos, que exigem tempos de cirurgias maiores, conforme foi exposto na Tabela 4.5. O escalonamento semanal completo está detalhado no Apêndice C.

Apesar de a modelagem apresentada nesse Capítulo 4 resultar em um planejamento (e escalonamento) semanal ótimo, conforme mostrado nas Tabelas 4.13 e 4.14, esse se torna inviável quando se estressa o modelo e se considera a taxa de cancelamento semanal de cirurgias, que atualmente atinge a marca de 16% da

Tabela 4.10: Disponibilidade Equipe Médica

Especialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão	2	2	2	2	2
Pé e Tornozelo	1	1		1	2
Fixador Externo			2		
Tumor	1		1	2	
Coluna	2	2		2	2
Crânio Maxilo-Facial	1	1	1	1	
Infantil	1		2		1
Joelho	3	3	3	3	3
Microcirurgia		2			
Ombro e Cotovelo	1		2	1	2
Quadril	2	2	2	2	2
Trauma	2	3	2	2	2

Tabela 4.11: Equipe Médica/Salas de Cirurgia - INTO

Especialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão					
Pé e Tornozelo	1	1		1	1
Fixador Externo			1		
Tumor			1	1	
Coluna	3	4		4	3
Crânio Maxilo-Facial	1	1	1	1	
Infantil	1		2		1
Joelho	5	3	3	3	3
Microcirurgia		2			
Ombro e Cotovelo	1		3	1	3
Quadril	2	2	2	2	3
Trauma	1	2	2	2	1

realidade do INTO, ou seja, 16% das cirurgias agendadas semanalmente são canceladas, cancelamentos esses oriundos por falta de equipe médica disponível, disponibilidade de insumos necessários para a realização da cirurgia, contração de infecção por parte do pacientes, além de outros motivos.

Se parte desses procedimentos não são realizados, uma das premissas fundamentais do modelo, que é o gerenciamento das filas de entrada (espera por cirurgia), é violada. Para tratar essa importante questão, o Capítulo 5, introduz uma modelagem matemática mais robusta, que possibilita a inclusão da restrição que mede esse nível de cancelamento de cirurgias.

Tabela 4.12: Equipe Médica/Salas de Cirurgia - Dia

Especialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão	2	2	1	2	2
Pé					1

Tabela 4.13: Escalonamento Diário Proposto versus Atual (INTO)

Especialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão	0	0	-1	0	0
Pé e Tornozelo	0	0		0	0
Fixador Externo			-1		
Tumor	-1		0	-1	
Coluna	+1	+2		+2	+1
Crânio Maxilo-Facial	0	0	0	0	
Infantil	0		0		0
Joelho	+2	0	0	0	0
Microcirurgia		0			
Ombro e Cotovelo	0		+1	0	+1
Quadril	0	0	0	0	+1
Trauma	-1	-1	0	0	-1

Tabela 4.14: Escalonamento Semanal Proposto versus Atual

Especialidade Cirúrgica	Planejamento Atual	Planejamento Proposto	Diferença
Mão	10	9	-1
Pé e Tornozelo	5	5	0
Fixador Externo	2	1	-1
Tumor	4	2	-2
Coluna	8	14	+6
Crânio Maxilo-Facial	4	4	0
Infantil	4	4	0
Joelho	15	17	+2
Microcirurgia	2	2	0
Ombro e Cotovelo	6	8	+2
Quadril	10	11	+1
Trauma	11	8	-3
Total	81	85	+4

Tabela 4.15: Escalonamento INTO - 2ª Feira

Centro Cirúrgico	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna			
2º	Coluna			
3º	Coluna			
4º	Crânio Maxilo-Facial	Crânio Maxilo-Facial		
5º	Infantil	Infantil	Infantil	
6º	Joelho	Joelho		
7º	Joelho	Joelho		
8º	Joelho	Joelho		
9º	Joelho	Joelho		
10º	Joelho	Joelho		
11º	Ombro	Ombro		
12º	Pé	Pé	Pé	
13º	Quadril	Quadril		
14º	Quadril	Quadril		
15º	Trauma Idoso	Trauma Idoso		

Tabela 4.16: Escalonamento DIA - 2ª Feira

Centro Cirúrgico	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Mão	Mão	Mão	
2º	Mão	Mão	Mão	Mão

Capítulo 5

Planejamento considerando taxa de cancelamento de cirurgias

Nesse capítulo é apresentado um modelo matemático que leva em consideração a taxa de cancelamento semanal de cirurgias do INTO, que atualmente atinge a marca de 16%.

Conforme comentado ao final do Capítulo 4, quando parte dos procedimentos cirúrgicos não são realizados, uma das premissas fundamentais do modelo, que é o gerenciamento das filas de entrada (espera por cirurgia), é violada. Para tratar essa importante questão, uma modelagem matemática mais robusta, possibilitando a inclusão da restrição que mede esse nível de cancelamento de cirurgias, foi desenvolvida.

Para desenvolver essa modelagem, fez-se necessária uma etapa anterior de desagregação das subespecialidades cirúrgicas por grupos de similaridades e dissimilaridades em relação aos tempos de duração de cirurgia e aos tempos de internação. Isso foi importante para tornar os modelos anteriores de planejamento e escalonamento mais versáteis, conforme será explicado de forma mais detalhada a seguir.

5.1 Análise de agrupamento dos procedimentos cirúrgicos

Cada uma das subespecialidades cirúrgicas envolve distintos procedimentos, que se diferenciam em vários aspectos, dentre eles, o tempo de duração da cirurgia e o tempo de internação necessária para o paciente se recuperar, medidas essas que se relacionam com a complexidade da cirurgia. Para o melhor entendimento desta questão, a Figura 5.1 exemplifica aos procedimentos cirúrgicos referentes à

subespecialidade Ombro. Pode-se verificar que existem procedimentos que possuem um menor tempo de internação e de cirurgia, enquanto outros apresentam tempo de internação e cirurgia bem maiores, configurando assim, a presença de uma variabilidade no processo cirúrgico, mesmo quando se considera uma mesma subespecialidade.

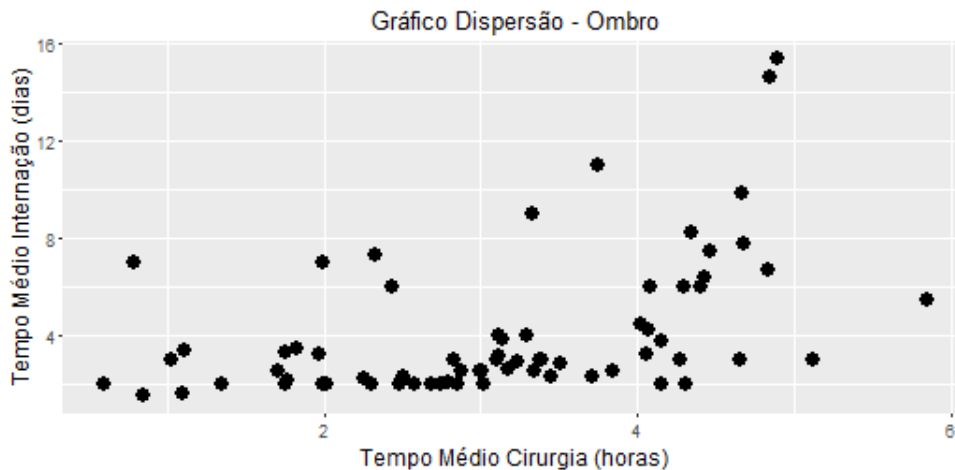


Figura 5.1: Procedimentos Cirúrgicos - Ombro

Essa desagregação dos procedimentos por tempo de cirurgia e internação dentro de uma mesma subespecialidade é muito importante quando se passa a considerar as taxas de cancelamento de cirurgia, pois essa desagregação provê maior versatilidade aos modelos desenvolvidos no Capítulo 4. Quando se considera apenas os tempos médios de cirurgia e internação dentro de uma mesma subespecialidade, e essa subespecialidade contém muitos procedimentos complexos, acaba-se realizando poucos procedimentos por dia, por causa da limitação da disponibilidade de nove horas diárias por sala de cirurgia. Por isso, conforme comentado ao final da Seção 4.5, a modelagem apresentada no Capítulo 4 se torna inviável quando se estressa o modelo e se considera a taxa de cancelamento semanal de cirurgias. Quando, por outro lado, se desagrega as subespecialidades por grupos de similaridade em relação aos tempos de cirurgia e internação, ganha-se mais versatilidade para que se possa encaixar as restrições que envolvem essas taxas cancelamento de procedimentos.

A fim de classificar os procedimentos cirúrgicos, dentro de cada subespecialidade, por similaridade em relação aos tempos de cirurgia e internação, usou-se a técnica de agrupamento não hierárquica denominada *k-médias*. O objetivo desta técnica é determinar os k centróides $\chi = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ de cada conjunto analisado, e minimizar a distância dos elementos do conjunto a esses k centróides. A distância dos elementos aos centróides é medida, em geral, pela distância Euclidiana. A seguir, descreve-se o algoritmo utilizado para implementar o método das *k-médias*.

Algoritmo de agrupamento não hierárquico - *k*-médias:

1. **Passo 1:** Determinar um número k de agrupamentos.
2. **Passo 2:** Escolher k pontos iniciais para serem utilizados como estimativas dos centróides.
3. **Passo 3:** Avaliar cada ponto do conjunto original e colocá-lo no agrupamento cujo centróide que estiver mais próximo. A posição do centróide deve ser recalculada cada vez que um ponto é adicionado ao agrupamento.
4. **Passo 4:** Repetir o **Passo 3** anterior até que não haja mudança no agrupamento ou um número máximo de passo é executado.

Fim(Algoritmo)

Para fazer a desagregação por agrupamentos dos procedimentos cirúrgicos dentro de uma certa subespecialidade, deve-se construir os agrupamentos de tal forma que os procedimentos dentro de um mesmo agrupamento sejam os mais similares possível (com relação a uma métrica pré-determinada), enquanto os procedimentos fora daquele agrupamento sejam os mais dissimilares possível em relação a essa mesma métrica. A métrica utilizada foi a distância Euclideana, e os dados (tempos de cirurgia (em horas) e tempos de internação (em dias)) foram normalizados em relação à média e ao desvio padrão.

O algoritmo das *k*-médias é muito simples e eficiente, mas ele assume que se tenha bastante conhecimento sobre os dados de entrada para que se escolha o melhor k no Passo 1 do algoritmo, e esse é um ponto crucial do método. Para encontrar o número ótimo de agrupamentos para cada uma das subespecialidades no Passo 1, utilizou-se o *Método do Cotovelo*.

Esse método analisa a qualidade dos agrupamentos formados para diferentes valores de k , e usa, como medida de desempenho, a soma dos quadrados das distâncias dos elementos de cada agrupamento até seu centróide, representada pela equação (5.1):

$$SSR = \sum_{i=1}^{g_k} \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - x_i)'(X_{ij} - x_i) \quad (5.1)$$

onde g_k é o número de grupos existentes quando se está no passo k do Método de Cotovelo, n_i é o número de elementos do agrupamento C_i , X_{ij} é o vetor de observações do j -ésimo elemento que pertence ao i -ésimo agrupamento, e x_i é o centróide do agrupamento C_i .

O Método do Cotovelo foi implementado para k variando de $k = 1$ até $k = 10$, para todas as subespecialidades cirúrgicas, e a Figura 5.2 ilustra a aplicação do método para a subespecialidade Ombro. No eixo horizontal aparece o número de agrupamentos avaliados e no eixo vertical a respectiva soma dos quadrados das distâncias dos elementos de cada agrupamento até seu centróide, representada pela equação (5.1).

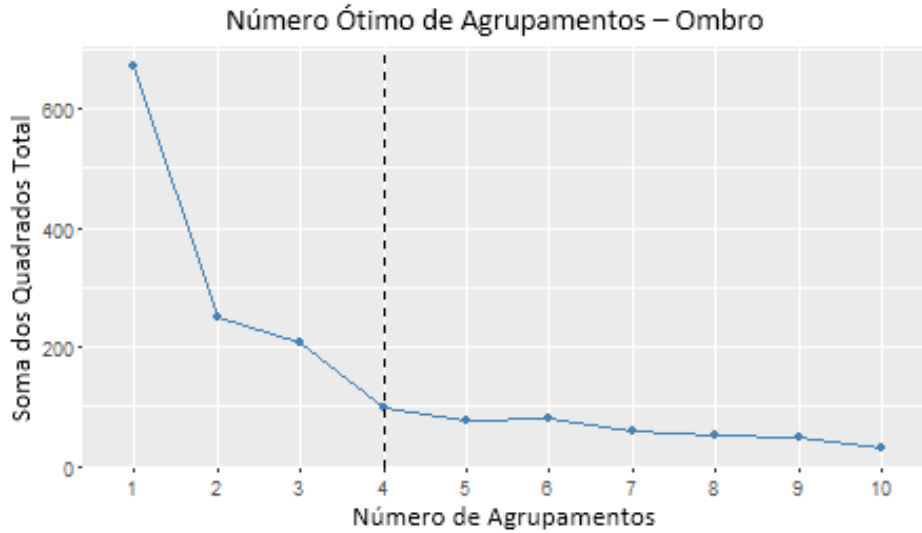


Figura 5.2: Número Ótimo de Agrupamentos - Ombro

Para a escolha do k ótimo, deve-se considerar o menor número de agrupamentos possível tal que a soma do quadrado total (eixo vertical) seja relativamente pequena. Esse ponto de inflexão no gráfico lembra o cotovelo, vem daí o nome do método. Para a subespecialidade Ombro, considerou-se $k = 4$ (ver Figura 5.2).

A Figura 5.3 mostra o mesmo gráfico apresentado na Figura 5.1 onde os procedimentos cirúrgicos foram coloridos de acordo com os agrupamentos definidos pelo Método do Cotovelo (cores iguais significam mesmo agrupamento).

Esse mesmo procedimento foi realizado para as demais subespecialidades, e as respectivas análises encontram-se nos Apêndices A e B.

Vale ressaltar que o *Método do Cotovelo*, às vezes, pode ser ambíguo quanto à definição do valor do k apropriado. Quando isso aconteceu, o Algoritmo de *k-médias* foi rodado para os diferentes valores de k que saíram do Método do Cotovelo, e, posteriormente aplicou-se a medida de avaliação R^2 para mensurar a variabilidade das variáveis em análise. Escolheu-se, então, aquela quantidade k de agrupamentos que explicasse pelo menos 70% das variáveis em análise, ou seja, aquele k que garantisse que pelo menos 70% das variáveis em análise fossem explicadas pela quantidade de agrupamentos definidos.

Finalizados todos os agrupamentos, para todas as subespecialidades cirúrgicas, esses foram considerados para o desenvolvimento do novo modelo semanal de cirur-

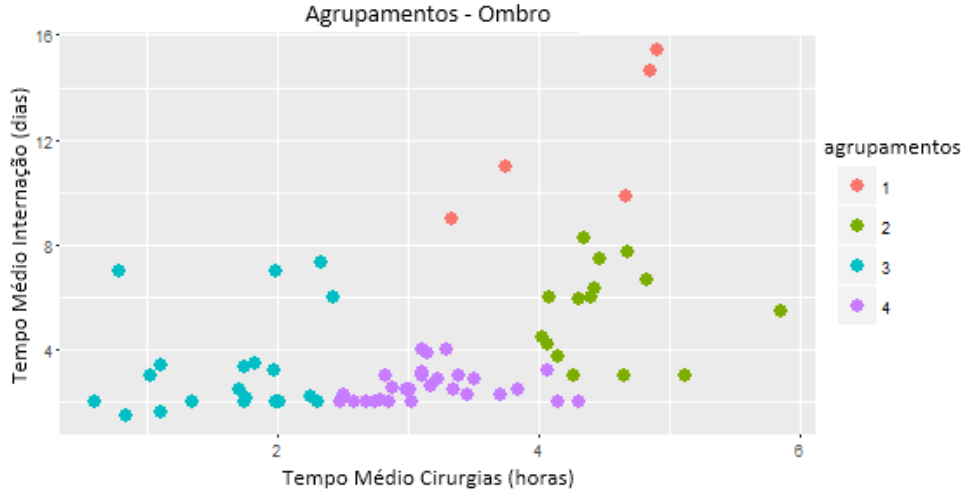


Figura 5.3: Agrupamentos ótimos - Ombro

gias que será apresentado na Seção 5.2.

5.2 Modelagem Semanal de Cirurgias - planejamento e escalonamento

A partir dos agrupamentos obtidos na Seção 5.1, aplicou-se novamente o algoritmo de pré-processamento para diminuição do espaço de busca, apresentado na Seção 4.1, para atualizar as matrizes de cirurgias viáveis tanto para o INTO quanto para o Hospital Dia. Mediante esse resultado, foi desenvolvido um modelo matemático similar ao apresentado na Seção 4.2, onde algumas restrições tiveram que ser adaptadas, como será visto em seguida.

Para a melhor compreensão do modelo, serão considerados os mesmos conjuntos definidos na Seção 4.2, e alguns outros adicionais conforme Tabela 5.1.

Da mesma maneira que o modelo 4.19 da Seção 4.2, a função objetivo 5.2 visa maximizar a utilização das salas de cirurgia, e, ao mesmo tempo, visa minimizar a quantidade de leitos de recuperação e de salas de cirurgias.

$$\text{Max} \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i + \sum_{j \in J} d_j \cdot y_j - \text{Leitos}_{INTO} - \text{Leitos}_{DIA} - \text{Salas}_{INTO} - \text{Salas}_{DIA} \quad (5.2)$$

onde x_i , y_j , Leitos_{INTO} , Leitos_{DIA} , Salas_{INTO} , Salas_{DIA} são variáveis de decisão inteiras. A variável x_i assume valor superior a zero se tal combinação for considerada na solução do modelo, e as variáveis Leitos_{INTO} , Leitos_{DIA} , Salas_{INTO} e

Tabela 5.1: **Conjuntos e Subconjuntos**

Conjuntos/ Subconjuntos	Descrição
$Z = \{1, \dots, N_z\}$	o número total de agrupamentos considerando todas as subespecialidades
$z_k \in Z$	agrupamentos de cirurgias factíveis com o Hospital DIA
$z_r \in Z$	quantidade de combinações viáveis para o Hospital Dia
$Mat2_{INTO_l, z}$	a entrada da matriz recebe 1 se a <i>subespecialidade_l</i> refere-se ao <i>agrupamento_z</i> , 0 caso contrário
$Mat2_{DIA_l, z}$	a entrada da matriz recebe 1 se a <i>subespecialidade_l</i> refere-se ao <i>agrupamento_z</i> , 0 caso contrário
ϕ	taxa de cancelamento semanal de cirurgias

$Salas_{DIA}$ contam de forma negativa na função objetivo para garantir a minimização da quantidade de leitos de recuperação e salas de cirurgia necessárias, da mesma forma que foi feito no modelo 4.19 da Seção 4.2.

A primeira restrição do modelo tem como objetivo garantir o gerenciamento da fila, assim como feito no modelo 4.19, que não considerava o agrupamento de cirurgias. Contudo, a base de dados do INTO impossibilitou quantificar a taxa de entrada semanal para todos os agrupamentos $z \in Z$, visto que só existe a informação do procedimento cirúrgico realizado quando o paciente já o realizou. Uma vez que há longas filas de espera, e elas são maiores ainda para alguns procedimentos cirúrgicos, uma quantidade considerável dos pacientes dentro do escopo de análise não havia realizado ainda alguns tipos de cirurgias. Com isso, não existia, na base de dados coletada no INTO, a taxa de entrada semanal para alguns agrupamentos de cirurgias. Para contornar essa situação, houve a necessidade de se construir duas novas matrizes de mapeamento, a saber, $Mat2_{INTO_l, z}$ e $Mat2_{DIA_l, z}$.

$$\sum_{i \in I} Mat2_{INTO_l, z} \cdot Mat_{INTO_{z, i}} \cdot x_i + \sum_{j \in J} Mat2_{DIA_l, z} \cdot Mat_{DIA_{z, j}} \cdot y_j \geq \text{Taxa Entrada}_l \cdot \phi, \forall l \in L \quad (5.3)$$

onde ϕ representa a taxa de cancelamento semanal de cirurgias, logo há a necessidade de agendar um número maior de cirurgias, visto que uma determinada quantidade de procedimentos cirúrgicos são previamente cancelados. Essa folga no agendamento de cirurgias é utilizada para garantir que a premissa do gerenciamento das filas de entrada (filas de espera por cirurgia) não seja violada.

A restrição (5.3) garante que a *subespecialidade_l* atinja um nível mínimo de cirurgias realizadas semanalmente, porém não impõe que cirurgias referentes a todos os agrupamentos sejam feitas. Então, para garantir que pelo menos uma cirurgia de cada um dos agrupamentos seja direcionada sala de cirurgia, construiu-se a restrição

(5.4).

$$\sum_{i \in I} Mat_{INTO_{z,i}} \cdot x_i + \sum_{j \in J} Mat_{DIA_{z,j}} \cdot y_j \geq 1, \forall z \in Z \quad (5.4)$$

De forma semelhante ao modelo apresentado na Seção (4.2), as restrições (5.5) - (5.18) podem ser compreendidas conforme as restrições (4.3) - (4.16)

$$\sum_{i \in I} Mat_{INTO_{z,i}} \cdot x_i \leq \frac{W_{INTO_z}}{R_{T_z}}, \forall z \in Z \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in J} Mat_{DIA_{z_k,j}} \cdot y_j \leq \frac{W_{DIA_{z_k}}}{R_{T_{z_k}}}, \forall z_k \in Z \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \in I} Mat2_{INTO_{l,z}} \cdot Mat_{INTO_{z,i}} \cdot x_i + \sum_{j \in J} Mat2_{DIA_{l,z}} \cdot Mat_{DIA_{z,j}} \cdot y_j \leq Taxa_{Entrada_l} \cdot \rho_l, \forall l \in L \quad (5.7)$$

$$\sum_{i \in I} Mat_{INTO_{z,i}} \cdot x_i \geq Cirx_z, \forall z \in Z \quad (5.8)$$

$$W_{INTO_z} \leq N_{INTO} \cdot Cirx_z, \forall z \in Z \quad (5.9)$$

$$\sum_{j \in J} Mat_{DIA_{z_k,j}} \cdot y_j \geq Ciry_{z_k}, \forall z_k \in Z \quad (5.10)$$

$$W_{DIA_{z_k}} \leq N_{DIA} \cdot Ciry_{z_k}, \forall z_k \in Z \quad (5.11)$$

$$\sum_{z \in Z} W_{INTO_z} \leq Leitos_{INTO} \quad (5.12)$$

$$\sum_{z_k \in L} W_{DIA_{z_k}} \leq Leitos_{DIA} \quad (5.13)$$

$$\sum_{z_r \in Z} W_{DIA_{z_r}} = 0 \quad (5.14)$$

$$Leitos_{INTO} \leq N_{INTO} \quad (5.15)$$

$$Leitos_{DIA} \leq N_{DIA} \quad (5.16)$$

$$\sum_{i \in I} x_i \leq Salas_{INTO} \quad (5.17)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq \text{Salas}_{DIA} \quad (5.18)$$

$$\text{Salas}_{INTO} \leq S_{INTO} \quad (5.19)$$

$$\text{Salas}_{DIA} \leq S_{DIA} \quad (5.20)$$

O problema completo, considerando as restrições (5.3)-(5.20), pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \sum_{i \in I} c_i \cdot x_i + \sum_{j \in J} d_j \cdot y_j - \text{Leitos}_{INTO} - \text{Leitos}_{DIA} - \text{Salas}_{INTO} - \\ & \text{Salas}_{DIA} \\ & \text{Sujeito a (5.3) - (5.20), e} \\ & x_i \in \mathbb{Z}^+, \forall i \in I, \\ & y_j \in \mathbb{Z}^+, \forall j \in J, \\ & \text{Leitos}_{INTO} \in \mathbb{Z}^+, \\ & \text{Leitos}_{DIA} \in \mathbb{Z}^+, \\ & \text{Salas}_{INTO} \in \mathbb{Z}^+, \\ & \text{Salas}_{DIA} \in \mathbb{Z}^+, \\ & W_{INTO_z} \in \mathbb{Z}^+, \forall z \in Z, \\ & W_{DIA_z} \in \mathbb{Z}^+, \forall z \in Z, \\ & \rho \in \mathbb{R}^+, \\ & \text{Cir}x_z \in \{0, 1\}, \forall z \in Z, \\ & \text{Cir}y_z \in \{0, 1\}, \forall z \in Z. \end{aligned} \quad (5.21)$$

O modelo (5.21) implementado no software Xpress[®] tem um total de 658 variáveis e 284 restrições, e o tempo para obtenção da solução ótima foi de 103,326 segundos. Como resultado, tem-se a quantidade ótima de cirurgias semanal por subespecialidades e o dimensionamento de leitos na ala de recuperação.

Assim como o modelo desenvolvido na Seção 4.2, o modelo 5.21 não contempla o escalonamento das cirurgias para cada um dos dias da semana. Aqui, para este fim, é utilizado o mesmo modelo 4.30 da Seção 4.3, em função da saída de 5.21. Esse modelo também foi implementado no software Xpress[®], e o tempo para obtenção da solução ótima foi de 103,326 segundos. Como resultado, tem-se o escalonamento ótimo de cirurgias na semana por subespecialidade, considerando a utilização de equipe médica extra quando necessário.

As Seções 5.3 e 5.4 mostram os resultados para o modelo 5.21 proposto nesse Capítulo, e para o modelo 4.30 em função da saída de 5.21.

5.3 Resultados de aplicação do modelo de planejamento semanal de cirurgias considerando agrupamentos

Conforme introduzido na Seção 5.1, a fim de classificar os procedimentos cirúrgicos, dentro de cada subespecialidade, em grupos de similaridade em relação aos tempos de cirurgia e internação, usou-se a técnica de agrupamento não hierárquica denominada *k-médias*, em conjunto com o *Método do Cotovelo*. Isso possibilitou a criação de um modelo mais robusto para o planejamento semanal de cirurgias, que levou em consideração esses agrupamentos.

A Tabela 5.2 mostra a quantidade de agrupamentos considerados por subespecialidade, em um total de quarenta e nove agrupamentos. Além disso, é exibida a métrica R^2 , um indicador que avalia o quanto da variabilidade das variáveis utilizadas na técnica de segmentação são explicadas para aquele determinado número de agrupamentos fixado. Vale lembrar que foi estipulado um mínimo de 70% de acurácia para essa métrica.

Tabela 5.2: **Resultados Agrupamento**

SubEspecialidade Cirúrgica	Quantidade de Agrupamentos	R^2
Mão	4	78,2%
Pé e Tornozelo	4	80,4%
Fixador Externo	3	73,8%
Tumor	4	79,1%
Coluna	4	76,9%
Crânio Maxilo-Facial	4	70,2%
Infantil	4	75,8%
Joelho	3	70,8%
Microcirurgia	4	80,7%
Ombro e Cotovelo	4	77,2%
Quadril	3	70,5%
Trauma Adulto	4	72,0%
Trauma Idoso	4	78,3%

As Tabelas 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, os tempos médios de cirurgia, em horas, e os tempos médios de internação, em semanas, por subespecialidade cirúrgica e agrupamento.

Os tempos médios de cirurgia por agrupamento são essenciais para a execução do algoritmo de geração da matriz de cirurgias viáveis apresentado na Seção 4.1, que deve ser rodado antes da execução do modelo apresentado na Seção 5.2. Esse

algoritmo retorna a quantidade de combinações de cirurgias viáveis para o INTO e para o Hospital Dia, que são utilizadas como dados de entrada para o modelo eq:optmodelweekcluster da Seção 5.2.

Tabela 5.3: **Tempo de cirurgia, em horas, por subespecialidade e agrupamento**

SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Mão	1,36	1,50	2,72	5,23
Pé e Tornozelo	2,12	1,14	3,94	1,83
Fixador Externo	0,98	2,31	2,06	
Tumor	4,03	2,82	2,52	1,23
Coluna	4,66	4,06	1,72	7,22
Crânio Maxilo-Facial	4,91	3,92	2,47	1,18
Infantil	2,33	0,77	3,56	2,06
Joelho	3,75	1,84	3,08	
Microcirurgia	2,55	4,68	1,45	2,74
Ombro e Cotovelo	4,30	4,51	1,64	4,19
Quadril	1,58	2,95	2,77	
Trauma Adulto	4,25	3,90	2,95	1,47
Trauma Idoso	3,06	2,38	3,94	1,39

Tabela 5.4: **Tempo de internação, em semanas, por subespecialidade e agrupamento**

SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Mão	1,74	0,27	0,36	0,49
Pé e Tornozelo	0,55	0,36	0,58	4,07
Fixador Externo	0,70	0,76	4,17	
Tumor	1,44	0,73	3,44	0,44
Coluna	1,40	4,14	1,24	3,17
Crânio Maxilo-Facial	1,56	0,52	0,33	0,35
Infantil	2,76	0,41	0,78	0,48
Joelho	0,83	0,68	4,89	
Microcirurgia	0,75	0,85	0,42	4,98
Ombro e Cotovelo	1,71	0,78	0,47	0,37
Quadril	1,30	4,96	1,17	
Trauma Adulto	1,25	6,37	1,10	1,64
Trauma Idoso	1,13	4,92	2,25	0,81

A Tabela 5.5 mostra as quantidades de combinações viáveis de cirurgias para o INTO e o Hospital Dia, como resultado da aplicação do algoritmo da Seção 4.1.

Definidas as combinações viáveis, e, conseqüentemente, as matrizes $Mat_{INTOz,i}$ e $Mat_{DIAz,i}$, conjuntamente com o tempo de internação, além dos demais dados, como a quantidade de leitos e salas de cirurgia disponíveis, que são os mesmos conforme

Tabela 5.5: **Combinações viáveis - Agrupamento**

Unidade Hospitalar	Combinações Viáveis
Hospital INTO	346
Hospital Dia	138

Seção 4.4, o modelo referente à Seção 5.2 está pronto para ser executado. Como resultado para a modelagem proposta, a Tabela 5.6 apresenta por subespecialidade, e respectivos agrupamentos, as quantidades de cirurgias referentes ao INTO que devem ser planejadas semanalmente. Da mesma forma, a Tabela 5.7 mostra as cirurgias a serem planejadas para o Hospital Dia.

Tabela 5.6: **Cirurgias por SubEspecialidade - INTO**

SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Mão	1	1	8	10
Pé e Tornozelo	3	2	3	1
Fixador Externo	0	2	1	
Tumor	1	2	1	2
Coluna	2	1	12	1
Crânio Maxilo-Facial	1	2	3	2
Infantil	1	2	6	3
Joelho	38	2	1	
Microcirurgia	2	1	2	1
Ombro e Cotovelo	1	6	2	6
Quadril	9	1	17	
Trauma Adulto	9	1	2	1
Trauma Idoso	1	1	1	1

Tabela 5.7: **Cirurgias por SubEspecialidade - Hospital Dia**

SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Mão	0	0	8	8
Pé e Tornozelo	0	0	10	0
Fixador Externo	1	1	0	
Tumor	2	0	0	0

De forma consolidada, o planejamento das duas unidades hospitalares totaliza duzentos e dez cirurgias, resultando numa ocupação de 83,11% dos das salas de cirurgia, sendo 83% deles no INTO e 17% no Hospital Dia. Quanto à ocupação dos leitos de recuperação, no Hospital Dia eles são utilizados em sua totalidade, dezoito leitos, já no INTO ficam vagos cinquenta e um dos duzentos e cinquenta e cinco

disponíveis. Para melhor compreensão, nas Tabelas 5.8 e 5.9 estão sintetizadas as quantidades de leitos para cada uma das subespecialidades e suas respectivas segmentações em cada uma das unidades hospitalares. Para a obtenção dessa solução ótima, das trezentos e quarenta e seis combinações factíveis para o INTO, foram utilizadas trinta e duas combinações, enquanto para o Hospital DIA foram selecionadas quatro das cento e trinta e oito possíveis.

Tabela 5.8: **Leitos por SubEspecialidade - INTO**

SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Mão	2	1	3	5
Pé e Tornozelo	2	1	2	5
Fixador Externo	0	2	5	
Tumor	2	2	4	1
Coluna	3	5	15	4
Crânio Maxilo-Facial	2	2	1	1
Infantil	3	1	5	2
Joelho	32	2	5	
Microcirurgia	2	1	1	5
Ombro e Cotovelo	2	5	1	3
Quadril	12	5	20	
Trauma Adulto	12	7	3	2
Trauma Idoso	2	5	3	1

Tabela 5.9: **Leitos por SubEspecialidade - Hospital Dia**

SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Mão	0	0	3	4
Pé e Tornozelo	0	0	6	0
Fixador Externo	1	1	0	
Tumor	3	0	0	0

Assim como na Seção 4.4, esses resultados não nos remetem a um escalonamento de cirurgias diário, logo os resultados aqui obtidos foram utilizados como dados de entrada para a modelagem apresentada na Seção 4.3, que visa obter o planejamento de cirurgias detalhado, resultados esses que serão expostos na próxima Seção.

5.4 Resultados de aplicação do modelo de escalonamento semanal de cirurgias considerando agrupamentos

Para gerar o quadro de cirurgias diário, necessita-se, a priori, das combinações que geraram a solução ótima para a modelagem da seção anterior, apresentadas na Tabela 5.10. As combinações 4, 8,10 e 13 são referentes ao Hospital DIA e as demais são relacionadas ao INTO. Em cada uma das combinações, além de apresentar a quantidade de cirurgias para cada um dos agrupamentos, por subespecialidade, estão destacadas também, na última coluna, as quantidades de repetições referentes a cada uma das combinações, variável muito importante para as restrições 4.23 e 4.24. Os demais dados, referentes à disponibilidade de equipe médica, são os mesmos utilizados na Seção 4.5, e estão destacados na Tabela 4.10, assim como o valor fixado de θ .

Tabela 5.10: **Combinações de cirurgias viáveis por agrupamento**

Combinação	SubEspecialidade Cirúrgica	Grupo	Grupo	Grupo	Grupo	Quantidade de repetições
		1	2	3	4	
1	Mão	1	0	0	1	1
2	Mão	0	1	0	1	1
3	Mão	0	0	1	1	8
4	Mão	0	0	1	1	8
5	Pé e Tornozelo	1	0	1	1	1
6	Pé e Tornozelo	1	0	2	0	1
7	Pé e Tornozelo	2	2	0	0	1
8	Pé e Tornozelo	0	0	2	0	5
9	Fixador Externo	0	2	1		1
10	Fixador Externo	1	1	0		1
11	Tumor	1	0	1	1	1
12	Tumor	0	2	0	0	1
13	Tumor	0	2	0	0	1
14	Coluna	1	0	3	0	2
15	Coluna	0	0	0	1	1
16	Coluna	0	1	2	0	1
17	Coluna	0	0	4	0	1
18	Crânio Maxilo-Facial	1	0	1	0	1
19	Crânio Maxilo-Facial	0	1	1	1	2
20	Infantil	1	0	1	1	1
21	Infantil	0	1	2	0	2
22	Infantil	0	0	1	2	1
23	Joelho	2	0	0		19
24	Joelho	0	2	1		1
25	Microcirurgia	2	0	0	1	1
26	Microcirurgia	0	1	2	0	1
27	Ombro e Cotovelo	1	0	0	1	1
28	Ombro e Cotovelo	0	1	0	1	5
29	Ombro e Cotovelo	0	1	2	0	1
30	Quadril	1	1	1		1
31	Quadril	1	0	2		8
32	Trauma Adulto	2	0	0	0	4
33	Trauma Adulto	1	1	0	0	1
34	Trauma Adulto	0	0	2	1	1
35	Trauma Idoso	0	0	1	0	1
36	Trauma Idoso	1	1	0	1	1

A Tabela 5.11 mostra os resultados do escalonamento semanal das equipes médicas por salas de cirurgia para o INTO.

Tabela 5.11: **Equipe Médica/Sala de Cirurgia - INTO**

SubEspecialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão	2	2	1	2	3
Pé e Tornozelo	2	1		0	0
Fixador Externo			1		
Tumor	1		1	0	
Coluna	2	0		2	2
Crânio Maxilo-Facial	1	1	0	1	
Infantil	1		2		1
Joelho	3	6	3	5	3
Microcirurgia		2			
Ombro e Cotovelo	1		3	1	2
Quadril	2	1	2	2	2
Trauma	1	1	2	2	2

Da mesma forma, a Tabela 5.12 mostra os resultados do escalonamento semanal das equipes médicas por salas de cirurgia para o Hospital Dia.

Tabela 5.12: **Equipe Médica/SubEspecialidade - Dia**

SubEspecialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão	2	2	2	2	
Pé e Tornozelo		1		1	3
Fixador Externo			1		
Tumor	1			0	

A Tabela 5.13 mostra a diferença entre o escalonamento diário proposto pelo modelo 4.30 considerando os agrupamentos, e o realizado atualmente pelo INTO. Os valores positivos traduzem a necessidade do incremento daquela ordem no número de equipes médicas por sala de cirurgia em cada dia da semana. Os valores negativos mostram uma maior demanda planejada pelo INTO do que a encontrada pelo modelo. Já as entradas nulas refletem uma igualdade entre as duas visões.

A Tabela 5.14 mostra, de forma consolidada, a demanda semanal de equipes médicas por subespecialidade tanto para o planejamento atual feito pelo INTO quanto para o proposto pelo modelo 4.30 considerando os agrupamentos. Pode-se verificar que não são utilizados todas as noventa salas de cirurgias disponibilizadas, conforme Capítulo 1, no planejamento atual feito pelo INTO, e sim oitenta e uma salas de cirurgia. Nessa mesma tabela, criou-se uma coluna denominada “Diferença”, que mostra quais subespecialidades estão com seu planejamento atual (INTO) alinhado

com o proposto pelo modelo (entradas nulas), e quais estão subestimados (entradas positivas) e sobrestimados (entradas negativas). No total, na modelagem atual, que considera os 16% de taxa de cancelamento de cirurgias, verifica-se uma necessidade de nove salas de cirurgia (e equipes médicas correspondentes) a mais do que está planejado semanalmente pelo INTO, alcançando a totalidade das noventa salas de cirurgia disponíveis.

Tabela 5.13: **Escalonamento Diário Proposto versus Atual**

SubEspecialidade Cirúrgica	Segunda Feira	Terça Feira	Quarta Feira	Quinta Feira	Sexta Feira
Mão	+2	+2	+1	+2	+1
Pé e Tornozelo	+1	+1		0	+1
Fixador Externo			0		
Tumor	+1		0	-2	
Coluna	0	-2		0	0
Crânio Maxilo-Facial	0	0	-1	0	
Infantil	0		0		0
Joelho	0	+3	0	+2	0
Microcirurgia		0			
Ombro e Cotovelo	0		+1	0	0
Quadril	0	-1	0	0	0
Trauma	-1	-2	0	0	0

Tabela 5.14: **Escalonamento Semanal Proposto versus Atual**

SubEspecialidade Cirúrgica	Planejamento Atual	Planejamento Proposto	Diferença
Mão	10	18	+8
Pé e Tornozelo	5	8	+3
Fixador Externo	2	2	0
Tumor	4	3	-1
Coluna	8	6	-2
Crânio Maxilo-Facial	4	3	-1
Infantil	4	4	0
Joelho	15	20	+5
Microcirurgia	2	2	0
Ombro e Cotovelo	6	7	+1
Quadril	10	9	-1
Trauma	11	8	-3
Total	81	90	+9

Por fim, a Tabela 5.15 e a Tabela 5.16 mostram o escalonamento de cirurgias referente ao primeiro dia útil da Semana, respectivamente, para o INTO e para o Hospital DIA. O escalonamento semanal completo está detalhado no Apêndice D.

Tabela 5.15: Escalonamento INTO - 2ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 3
2º	Coluna 4			
3º	Crânio Maxilo-Facial 1	Crânio Maxilo-Facial 3		
4º	Infantil 1	Infantil 2		
5º	Joelho 1	Joelho 1		
6º	Joelho 1	Joelho 1		
7º	Joelho 1	Joelho 1		
8º	Mão 3	Mão 4		
9º	Mão 1	Mão 4		
10º	Ombro 2	Ombro 4		
11º	Pé 1	Ombro 3		
12º	Pé 3	Ombro 3		
13º	Quadril 1	Quadril 2	Quadril 3	
14º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
15º	Trauma Adulto 1	Trauma Adulto 1		

Tabela 5.16: Escalonamento Hospital DIA - 2ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Tumor 1	Tumor 1		
2º	Mão 3	Mão 4		
3º	Mão 3	Mão 4		

Para fins comparativos, segue na Tabela 5.17, a estimativa de cirurgias realizadas semanalmente pelo INTO, considerando o ano de 2015, e a quantidade de cirurgias propostas pelo modelo desenvolvido diferidas da taxa de cancelamento(16%). Pode-se perceber que algumas subespecialidades apresentam um planejamento relativamente próximo ou similar ao proposto pelo modelo que é o caso do Fixador Externo, Tumor, Crânio Maxilo-Facial, enquanto outros procedimentos estão a quem do proposto pelo modelo que é o caso da Coluna, Joelho, Quadril, subespecialidades essas com maiores filas de espera, conforme visto anteriormente, corroborando assim os maiores índices na quantidade de pacientes na fila de espera

Tabela 5.17: Planejamento Cirurgias Atual vs. Proposto

Subespecialidade Cirúrgica	Planejamento Atual	Planejamento Proposto	Diferença
Mão	26	36	+10
Pé e Tornozelo	16	19	+3
Fixador Externo	5	5	0
Tumor	8	8	0
Coluna	8	16	+8
Crânio Maxilo-Facial	8	8	0
Infantil	9	12	+3
Joelho	32	41	+9
Microcirurgia	4	6	+2
Ombro e Cotovelo	12	15	+3
Quadril	22	27	+5
Trauma Adulto	20	13	-7
Trauma Idoso	5	4	-1

Capítulo 6

Conclusão

Conforme mencionado no Capítulo 1, apesar de ser um hospital de referência, o Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia (INTO) também é conhecido por suas longas filas de espera por cirurgia, que presentemente encontram-se em níveis alarmantes. A situação atual das filas deve-se, em parte, a uma política de maximização do número de cirurgias realizadas, curiosamente implantada no intuito de reduzir o tempo de espera. Ocorre que essa política acaba por priorizar cirurgias de menor duração, tendendo a postergar indefinidamente cirurgias de duração maior, que são difíceis de encaixar em pequenos espaços vagos dos expedientes diários. Com isso, filas imensas e tempos de espera proibitivos resultaram para procedimentos mais complexos. Essa problemática foi a principal motivação desse estudo.

Este trabalho teve como intuito construir uma política semanal de planejamento de cirurgias para o INTO que contemplasse todo o processo, desde a chegada do paciente à fila de espera até sua liberação do centro de recuperação pós-cirúrgica. Tal política teve como objetivo **maximizar a ocupação balanceada dos centros cirúrgicos**, diferentemente da política atualmente adotada pelo INTO, visando um equilíbrio na realização de cirurgias, mais ou menos complexas, possibilitando, assim, uma melhor utilização dos recursos para todos os procedimentos disponíveis.

Além disso, houve a preocupação com um número mínimo de cirurgias a serem realizadas, que está intimamente ligado à taxa de chegada de pacientes por especialidade, com o propósito de manter as filas em patamares reduzidos no longo prazo. Por fim, o número de cirurgias programadas levou em conta a disponibilidade de leitos para recuperação pós-cirúrgica, uma vez que, na ausência de leitos disponíveis, a cirurgia tem que ser cancelada.

Foram propostas duas modelagem matemáticas, apresentadas nos Capítulos 4 e 5. A diferença entre elas reside no fato de a segunda considerar a taxa de cancelamento semanal de cirurgias do INTO, que atualmente atinge a marca de 16%.

A primeira modelagem gerou um planejamento semanal de cirurgias totalizando cento e oitenta e nove cirurgias, o que significa quase quinhentas horas de cirurgias

semanais e uma ocupação total de aproximadamente 65,12% dos centros cirúrgicos, sendo 86,5% deles no INTO e 13,5% no Hospital Dia. Além disso, foram necessários, no total, duzentos e trinta e um leitos de recuperação, sendo duzentos e treze no INTO e dezoito no Hospital Dia. Em relação ao total de leitos disponíveis, existe uma sobra de quarenta e dois leitos no INTO, o que se traduz em uma folga para o sistema.

A segunda modelagem, que considerou a taxa de cancelamento semanal de cirurgias de 16%, gerou um planejamento semanal de cirurgias totalizando duzentos e dez cirurgias, resultando numa ocupação de 83,11% dos centros cirúrgicos, sendo 83% deles no INTO e 17% no Hospital Dia. Quanto à ocupação dos leitos de recuperação, no Hospital Dia eles são utilizados em sua totalidade, dezoito leitos, já no INTO ficam vagos cinquenta e um dos duzentos e cinquenta e cinco disponíveis. Nessa modelagem, verificou-se uma necessidade de nove centros cirúrgicos (e equipes médicas correspondentes) a mais do que está planejado semanalmente pelo INTO, alcançando a totalidade das noventa salas de cirurgia disponíveis. Apesar de o número de salas serem utilizadas em sua totalidade, os leitos conferem uma certa folga ao sistema.

Quando analisado o número de centros cirúrgicos/equipes médicas por especialidade na segunda modelagem proposta, e comparado com o planejamento vigente do INTO, constata-se uma maior necessidade desses recursos para alguns procedimentos e menor quantidade para outros, como é o caso da Mão e da Coluna, respectivamente. Ao analisar de forma detalhada, percebe-se que existe, em algumas especialidades cirúrgicas, uma predominância de alguns agrupamentos sobre outros, o que pode acarretar em sobrestimação ou subestimação dos recursos. É importante ressaltar, conforme já alertado na Seção 5.2, que a base de dados coleta no INTO impossibilitou a estimação da entrada de pacientes por agrupamento cirúrgico, o que gerou essas distorções.

Sendo assim, como trabalho futuro, seria interessante mensurar a taxa de entrada de pacientes por agrupamentos cirúrgicos, e assumir que a incidência, a priori, não tenha sofrido grandes modificações ao longo do tempo para se ter uma estimativa desse dado, e assim poder comparar com a modelagem aqui desenvolvida. Uma outra sugestão de trabalho futuro seria considerar os níveis de ocupação dos leitos no decorrer da semana, que estão intimamente ligados com o escalonamento diário das cirurgias, de forma a não haver maior contingenciamento de pacientes em determinados dias da semana do que em outros.

Referências Bibliográficas

- [1] BELIEN, J., DEMEULEMEESTER, E. “Building cyclic master surgery schedules with leveled resulting bed occupancy”, *European Journal of Operational Research*, v. 176, pp. 1185–1204, 2007.
- [2] MIN, D., YIH, Y. “An elective surgery scheduling problem considering patient priority”, *Computers & Operations Research*, v. 37, pp. 281–304, 2010.
- [3] J. BOWERS, G. M. “Ambulatory care and orthopaedic trauma theatres”, *European Journal of Operational Research*, v. 154, pp. 599–608, 2004.
- [4] AGNETIS, A., COPPI, A., CORSINI, M., et al. “A decomposition approach for the combined master surgical schedule and surgical case assignment problems”, *Health Care Management Science*, v. 17, n. 1, pp. 49–59, 2014. ISSN: 1386-9620. doi: 10.1007/s10729-013-9244-0.
- [5] MIN, D., YIH, Y. “Scheduling elective surgery under uncertainty and downstream capacity constraints”, *European Journal of Operational Research*, v. 206, pp. 642–652, 2010.
- [6] BELIEN, J., DEMEULEMEESTER, E. “A branch-and-price approach for integrating nurse and surgery scheduling”, *European Journal of Operational Research*, v. 189, pp. 652–668, 2008.
- [7] CARDOEN, B., DEMEULEMEESTER, E., BELIEN, J. “Operation room planning and scheduling: A literature review”, *European Journal of Research*, v. 210, pp. 921–932, 2010.
- [8] E.W.HANS, P.T.VANBERKEL. “Operating Room Planning and Scheduling Operating theatre planning and scheduling”. In: *Handbook of Healthcare System Scheduling*, v. 168, *International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, pp. 105–130, New York, 2012.
- [9] DEMEULEMEESTER, R., BELIEN, J., CARDOEN, B., et al. “Operating Room Planning and Scheduling”. In: Denton, B. (Ed.), *Handbook of Healthcare Operations Management*, v. 184, *International Series in Operati-*

ons Research & Management Science, Springer, pp. 121–152, New York, 2013. ISBN: 978-1-4614-5884-5. doi: 10.1007/978-1-4614-5885-2_5.

- [10] MARQUES, I., CAPTIVO, M. E., PATO, M. V. “An integer programming approach to elective surgery scheduling”, *OR Spectrum*, v. 34, pp. 407–427, 2012.
- [11] MOLINA-PARIENTE, J., FERNANDEZ-VIAGAS, V., FRAMINAN, J. “Integrated operating room planning and scheduling problem with assistant surgeon dependent surgery durations”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 82, pp. 8 – 20, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.01.006>.
- [12] ARINGHIERI, R., LANDA, P., SORIANO, P., et al. “A two level metaheuristic for the operating room scheduling and assignment problem”, *Computers & Operations Research*, v. 54, pp. 21 – 34, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.08.014>.
- [13] BLAKE, J. “Capacity planning in operating rooms”. In: Yih, Y. (Ed.), *Handbook of Healthcare Delivery Systems*, CRC Press, pp. 34–1–34–12, Boca Raton, 2010. ISBN: 9781439803332 - CAT# K10187.
- [14] JONNALAGADA, R., HARIHARAN, E. R., WALROND, S., et al. “Evaluation of the reasons for cancellation and delays of surgical procedures in a developing country”, *International Journal of Clinical Practice*, v. 59, pp. 716 – 720, 2005.
- [15] SANTIBANEZ, P., BEGEN, M., ATKIN, D. “Surgical block scheduling in a system of hospitals: an application to resource and wait list management in British Columbia health authority”, *Health Care Management Science*, v. 10, pp. 269–282, 2007.
- [16] SAADOULI, H., JERBI, B., DAMMAK, A., et al. “A stochastic optimization and simulation approach for scheduling operating room and recovery beds in an ortopedic surgery department”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 80, pp. 72–79, 2015.
- [17] AUGUSTO, V., XIE, X., PERDOMO, V. “Operating theatre scheduling with patient recovery in both oprating room and recovery beds”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 58, pp. 231–238, 2010.
- [18] BHATTACHARJEE, P., RAY, P. K. “Patient flow modeling and performance analysis of healthcare delivery processes in hospitals: An review and reflections”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 78, pp. 299–312, 2014.

- [19] E.TANFANI, A.TESTI. “A pre-assignment heuristic algorithm for the master surgical schedule problem(MSSP”, *Annals of Operations Research*, v. 178, pp. 105–119, 2010.
- [20] R.ARINGHERI, P., E.TANFANI. “Assigning surgery cases to operating rooms: A VSN approach for leveling ward beds occupancie”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, v. 47, pp. 173 – 180, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2014.08.014>.
- [21] Y.LIU, C.CHU, K.WANG. “A new heuristic algorithm for the operating room scheduling”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 61, pp. 865–871, 2011.

Apêndice A

Definição do número de agrupamentos por subespecialidades - aplicação do Método do Cotovelo

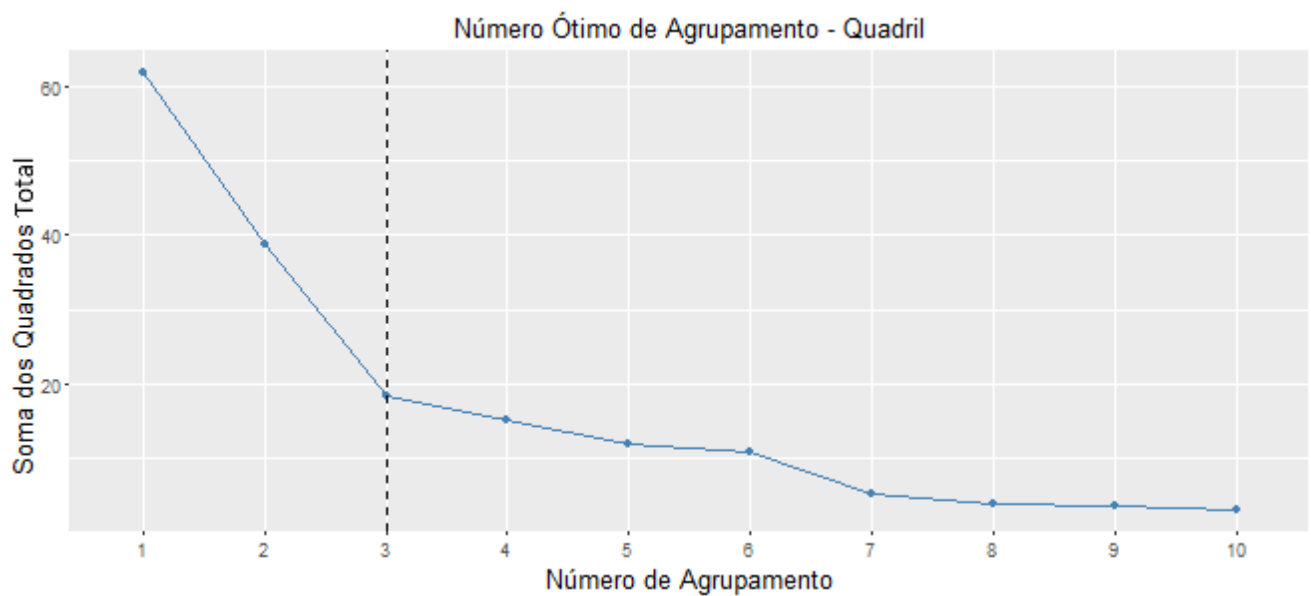


Figura A.1: Número Ótimo de Agrupamentos - Quadril

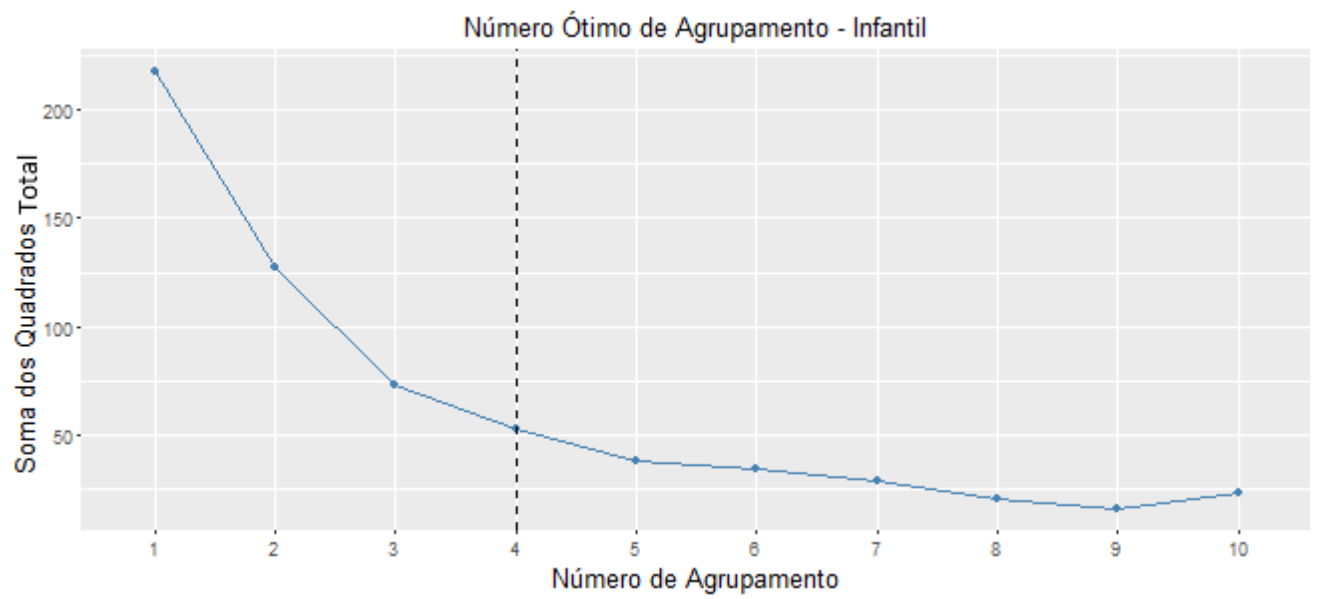


Figura A.2: Número Ótimo de Agrupamentos - Quadril

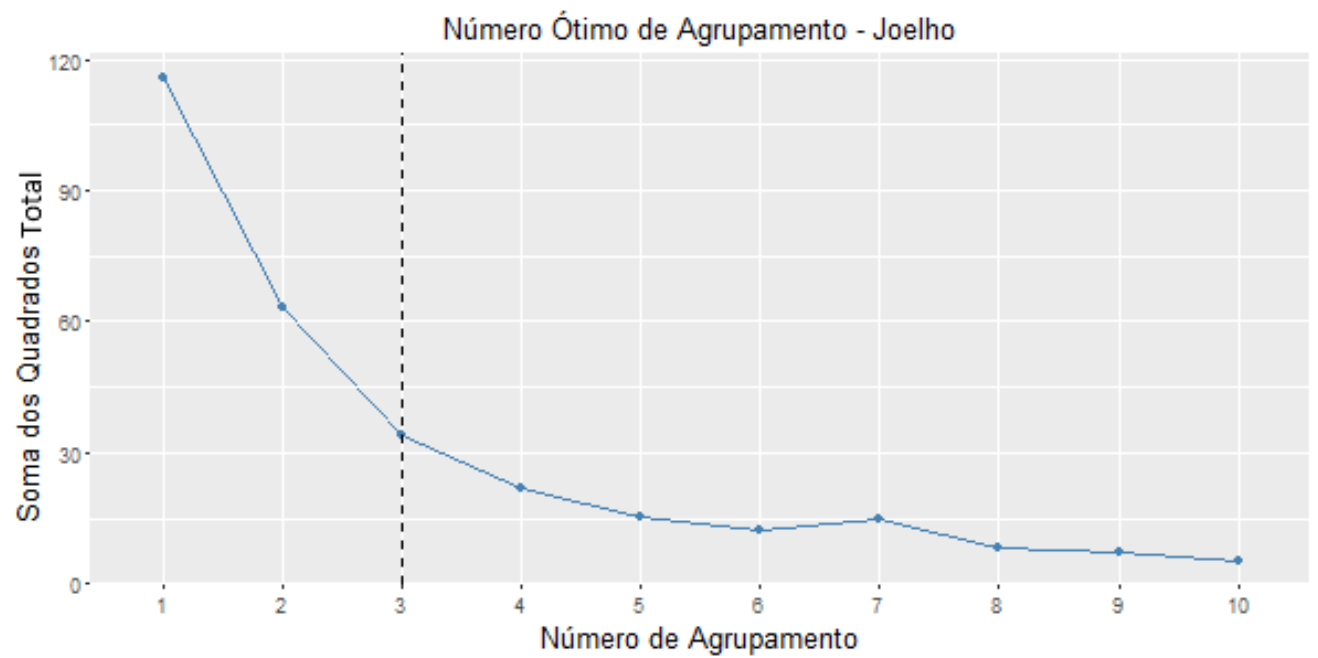


Figura A.3: Número Ótimo de Agrupamentos - Joelho

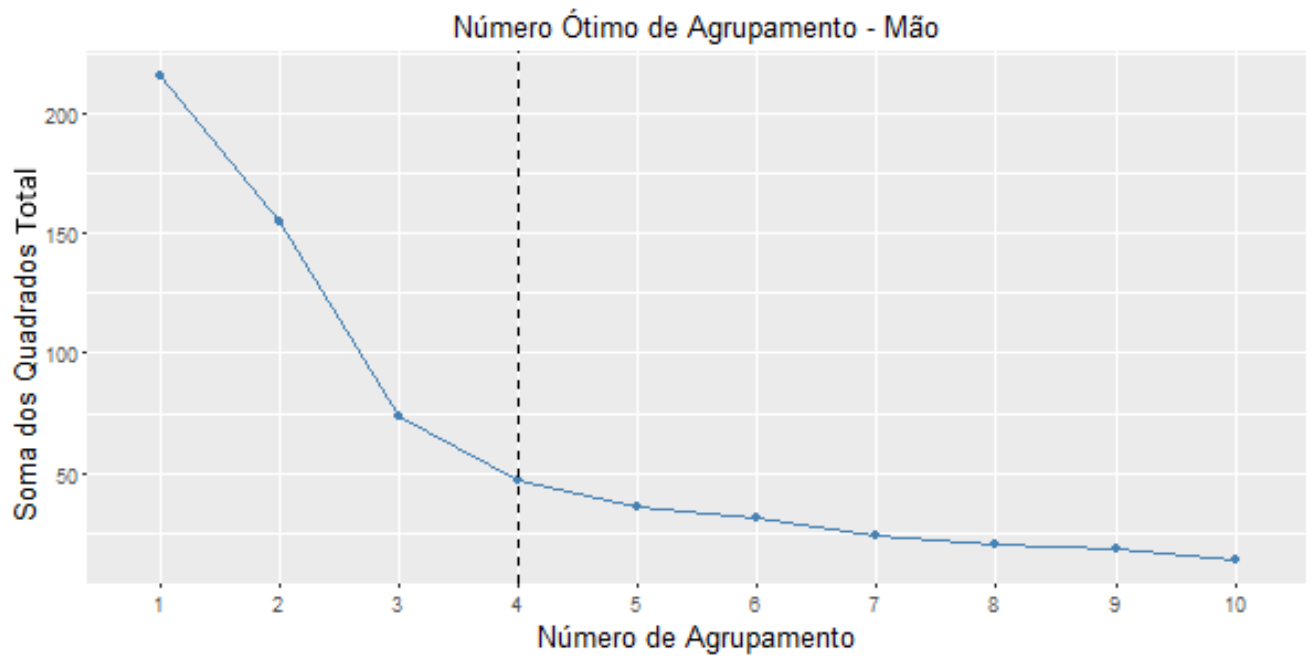


Figura A.4: Número Ótimo de Agrupamentos - Mão

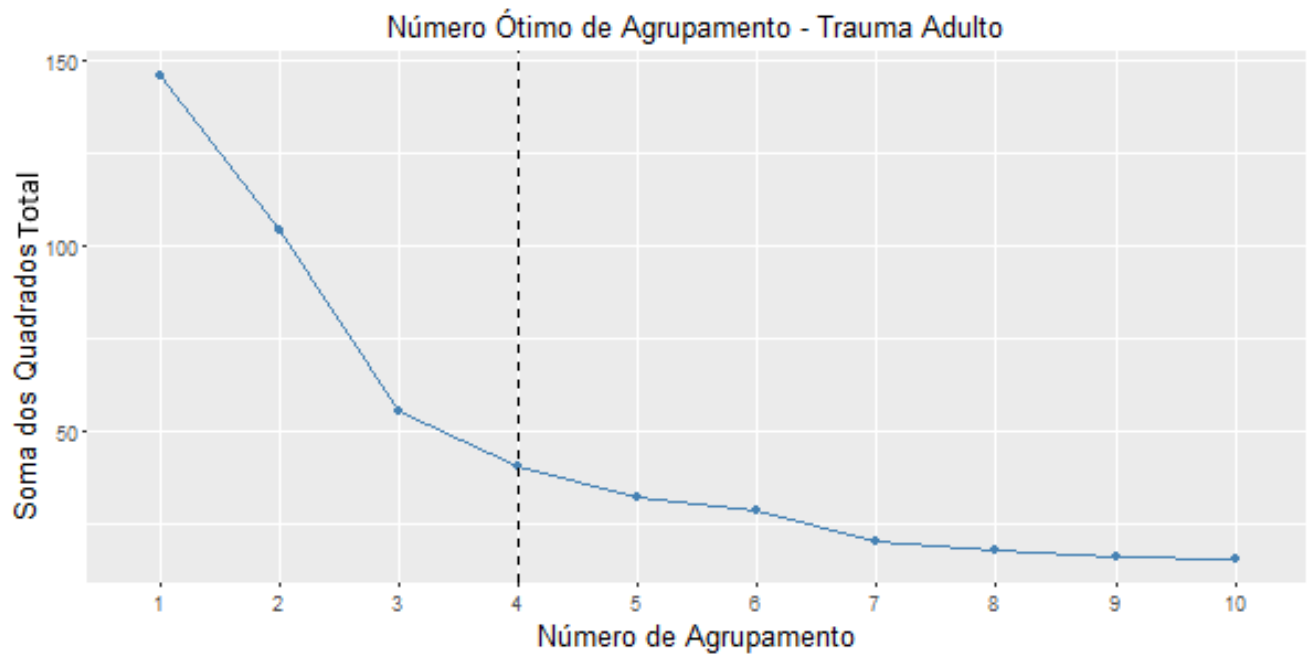


Figura A.5: Número Ótimo de Agrupamentos - Trauma Adulto

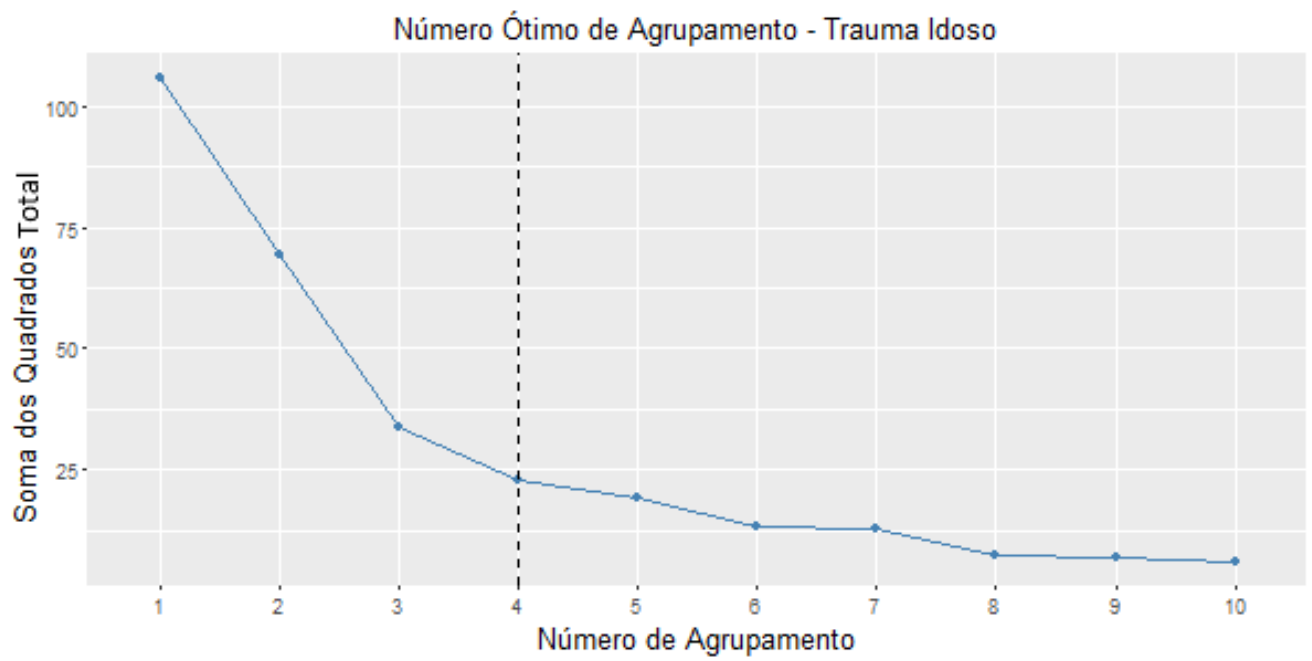


Figura A.6: Número Ótimo de Agrupamentos - Trauma Idoso

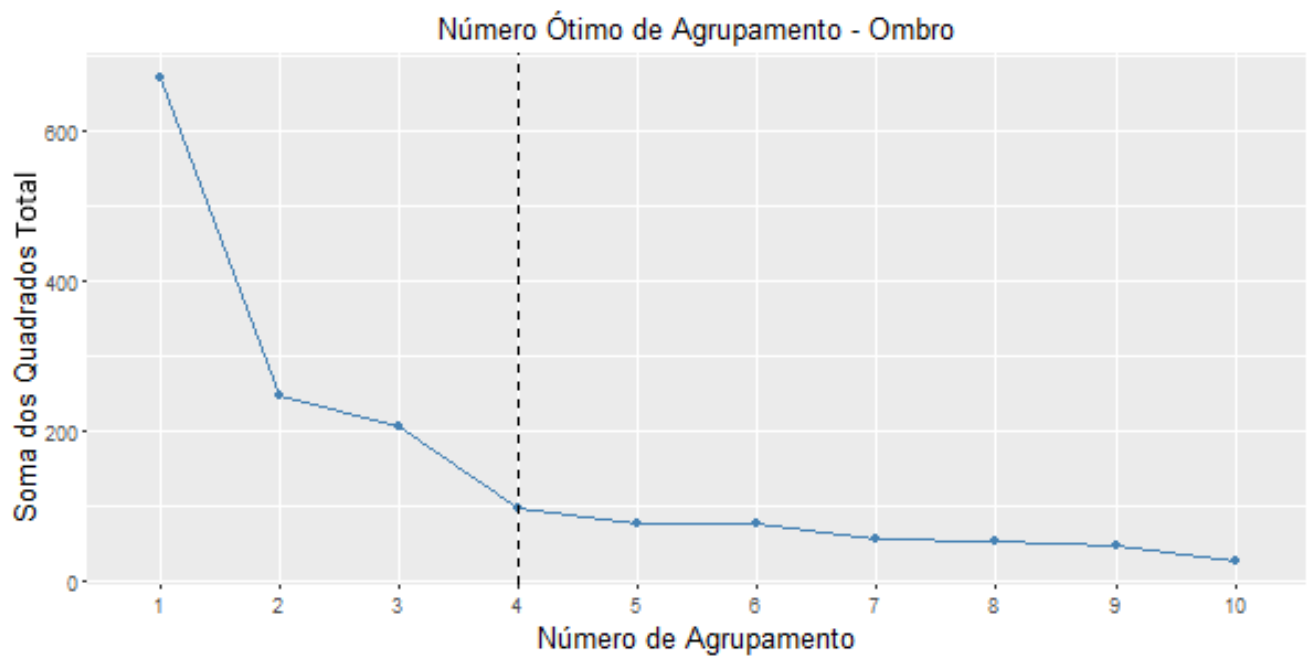


Figura A.7: Número Ótimo de Agrupamentos - Ombro

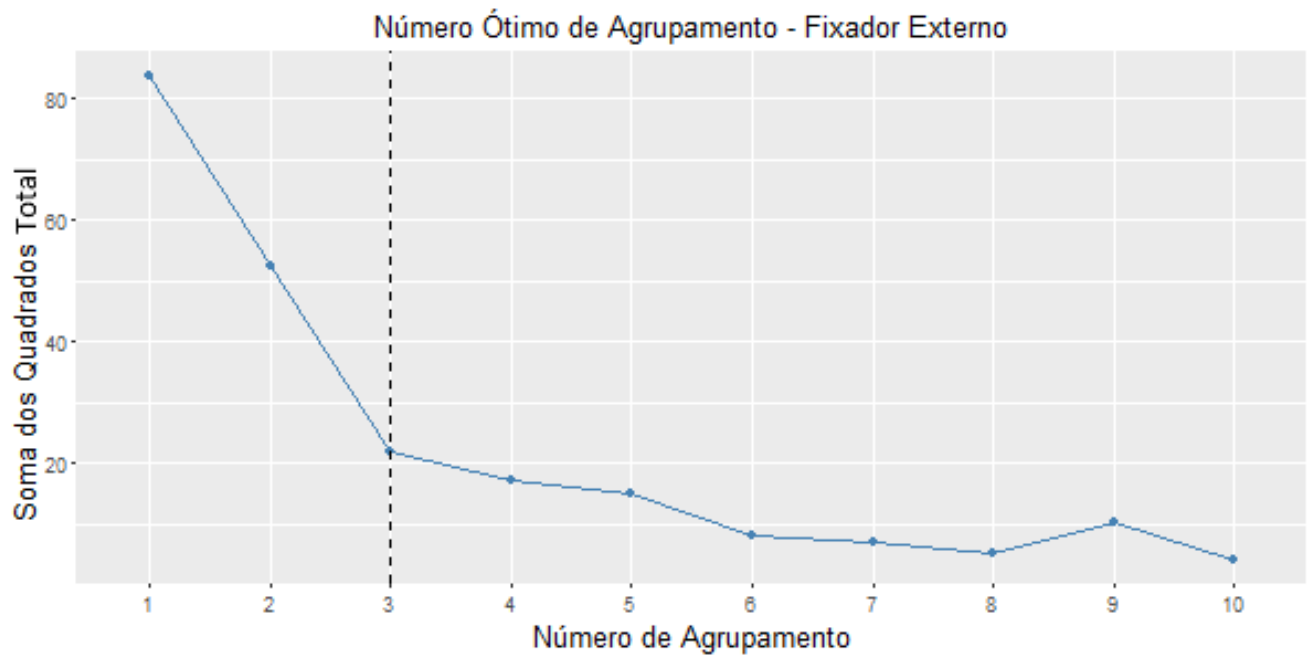


Figura A.8: Número Ótimo de Agrupamentos - Fixador Externo

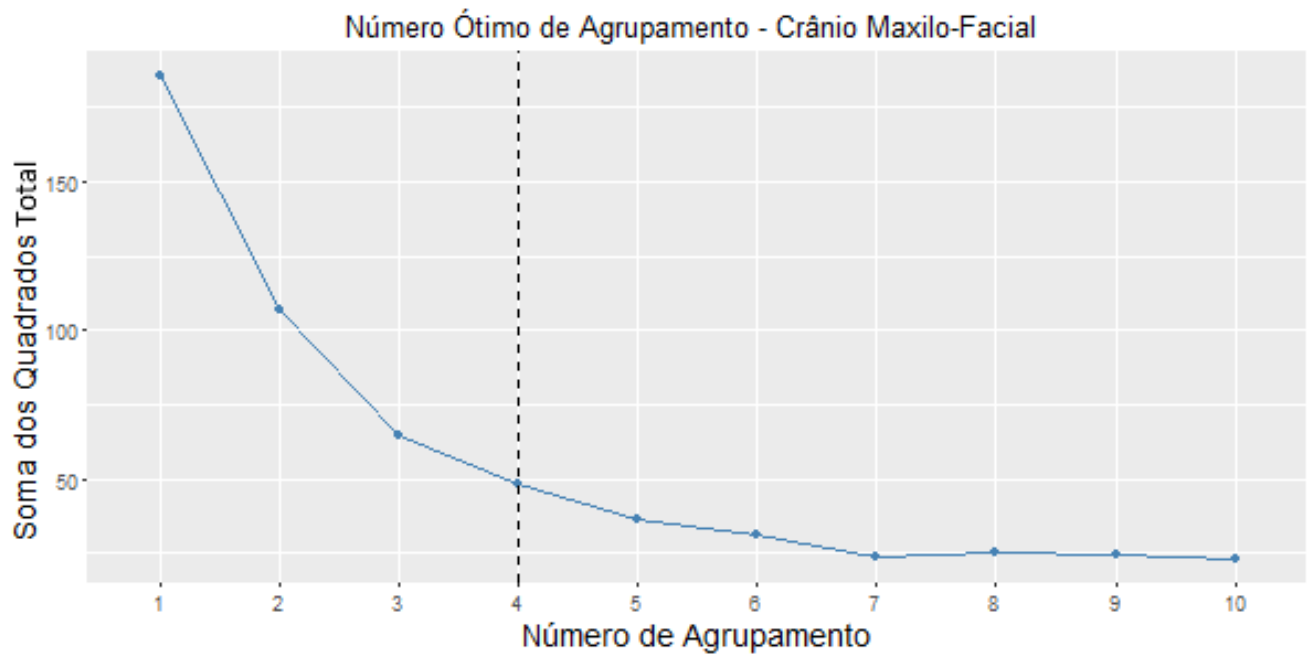


Figura A.9: Número Ótimo de Agrupamentos - Crânio Maxilo-Facial

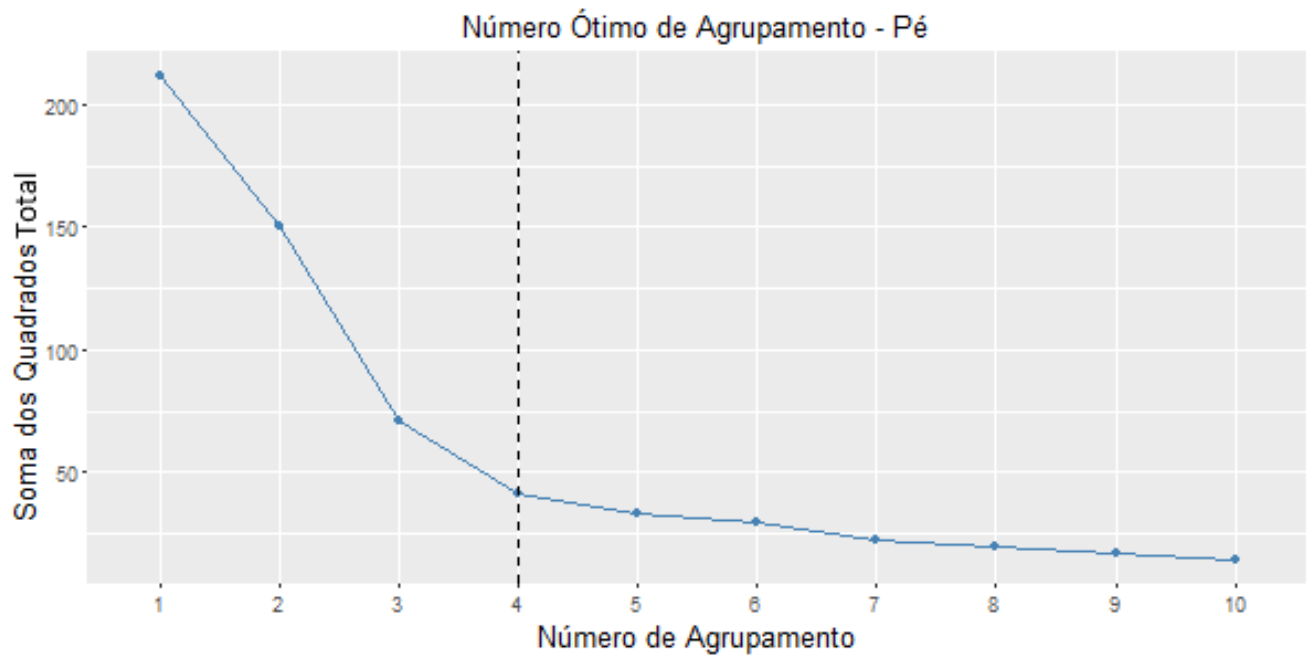


Figura A.10: Número Ótimo de Agrupamentos - Pé

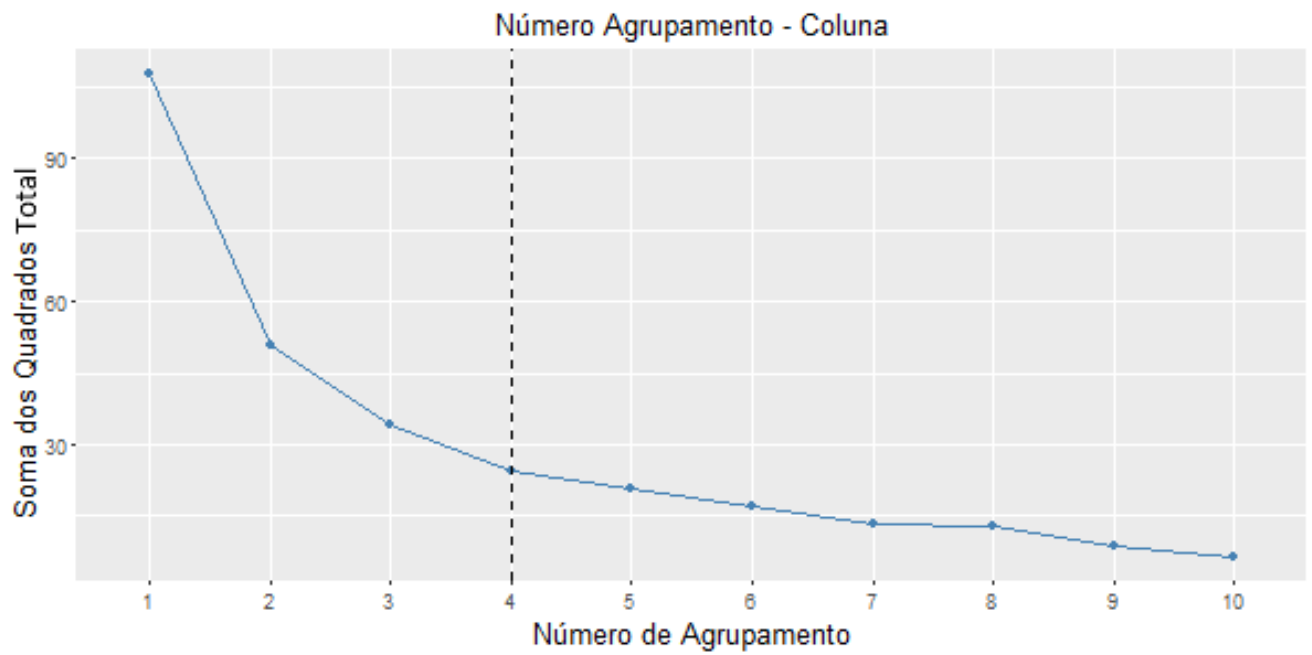


Figura A.11: Número Ótimo de Agrupamentos - Coluna

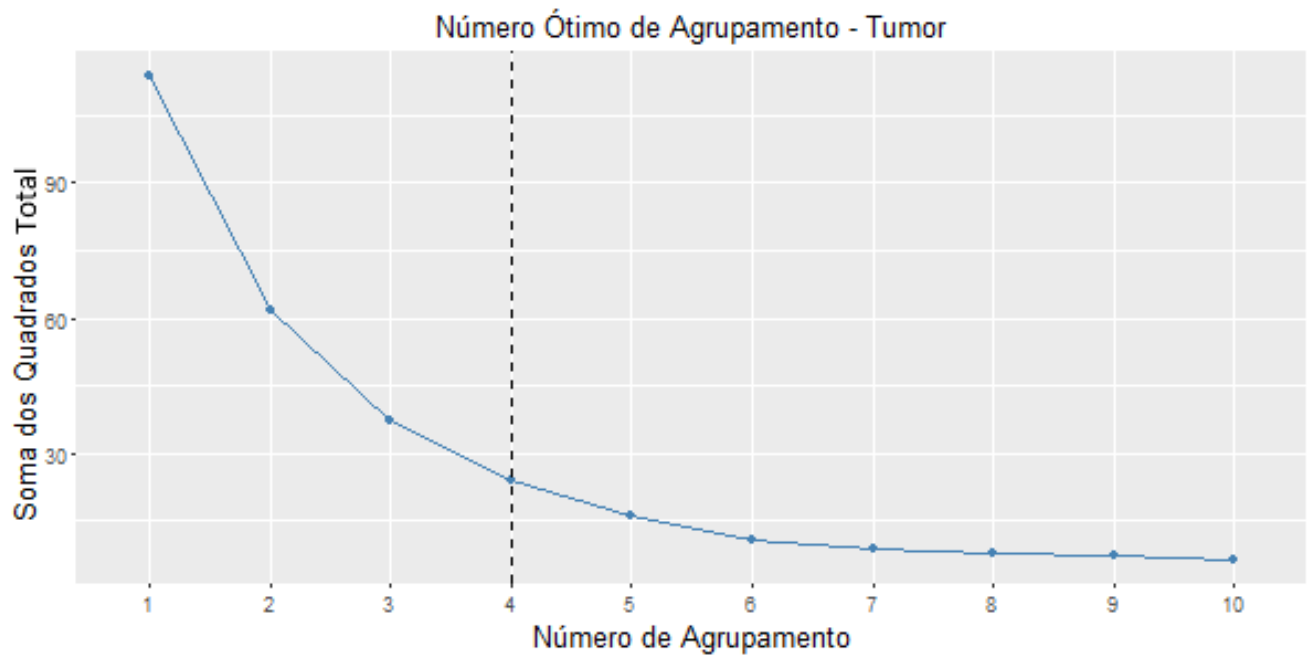


Figura A.12: Número Ótimo de Agrupamentos - Tumor

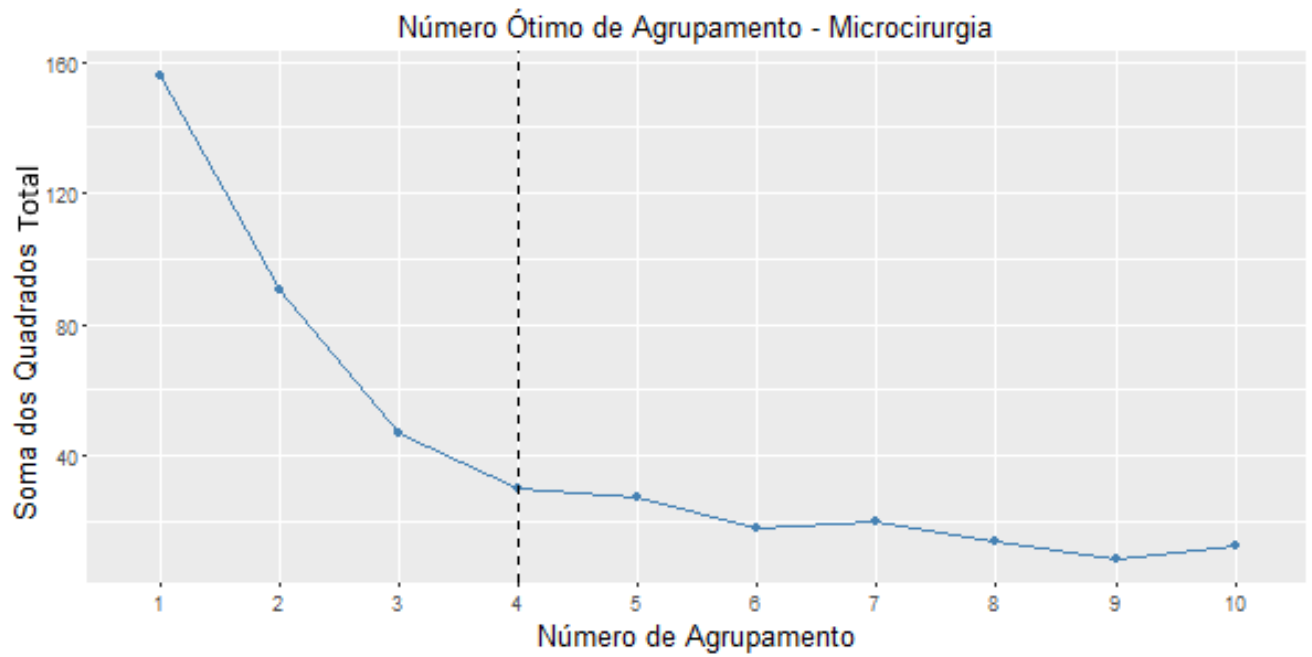


Figura A.13: Número Ótimo de Agrupamentos - Microcirurgia

Apêndice B

Agrupamentos por subespecialidades cirúrgicas - aplicação do algoritmo de agrupamento não hierárquico *k*-médias

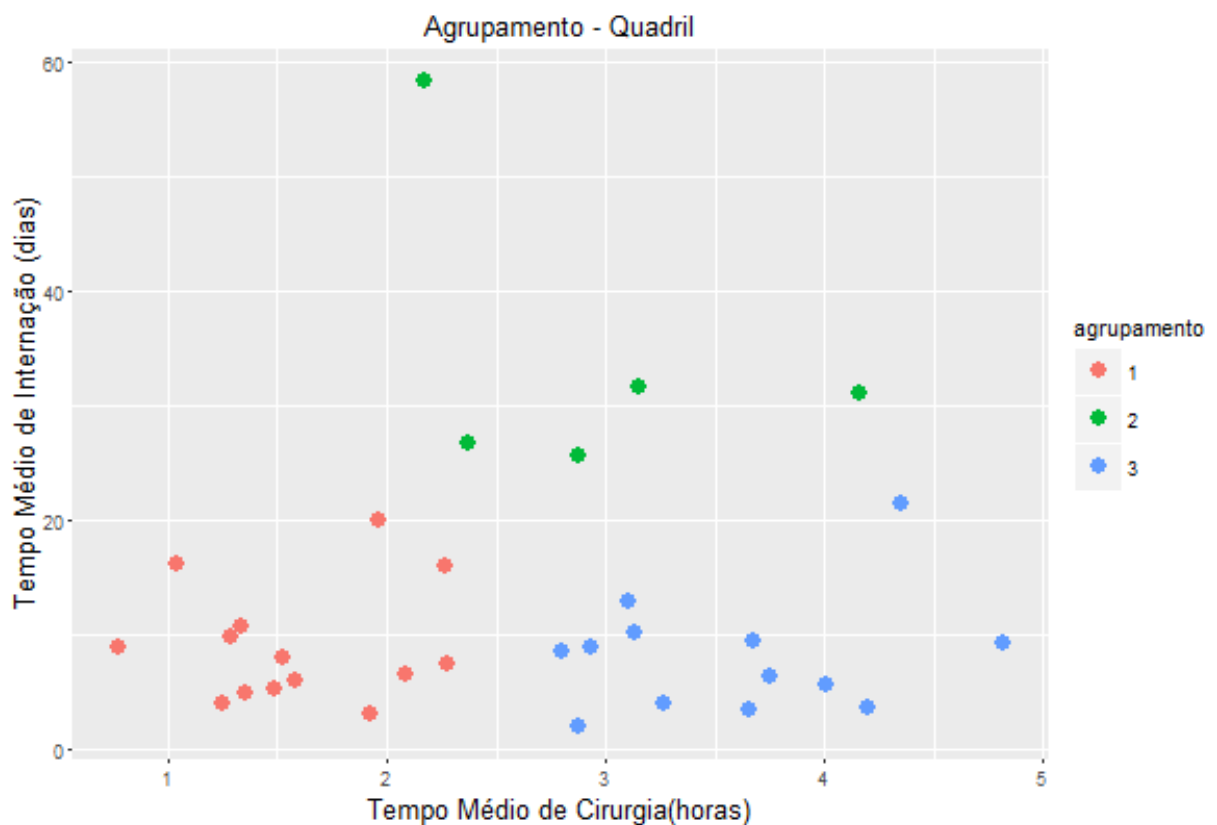


Figura B.1: Agrupamentos - Quadril

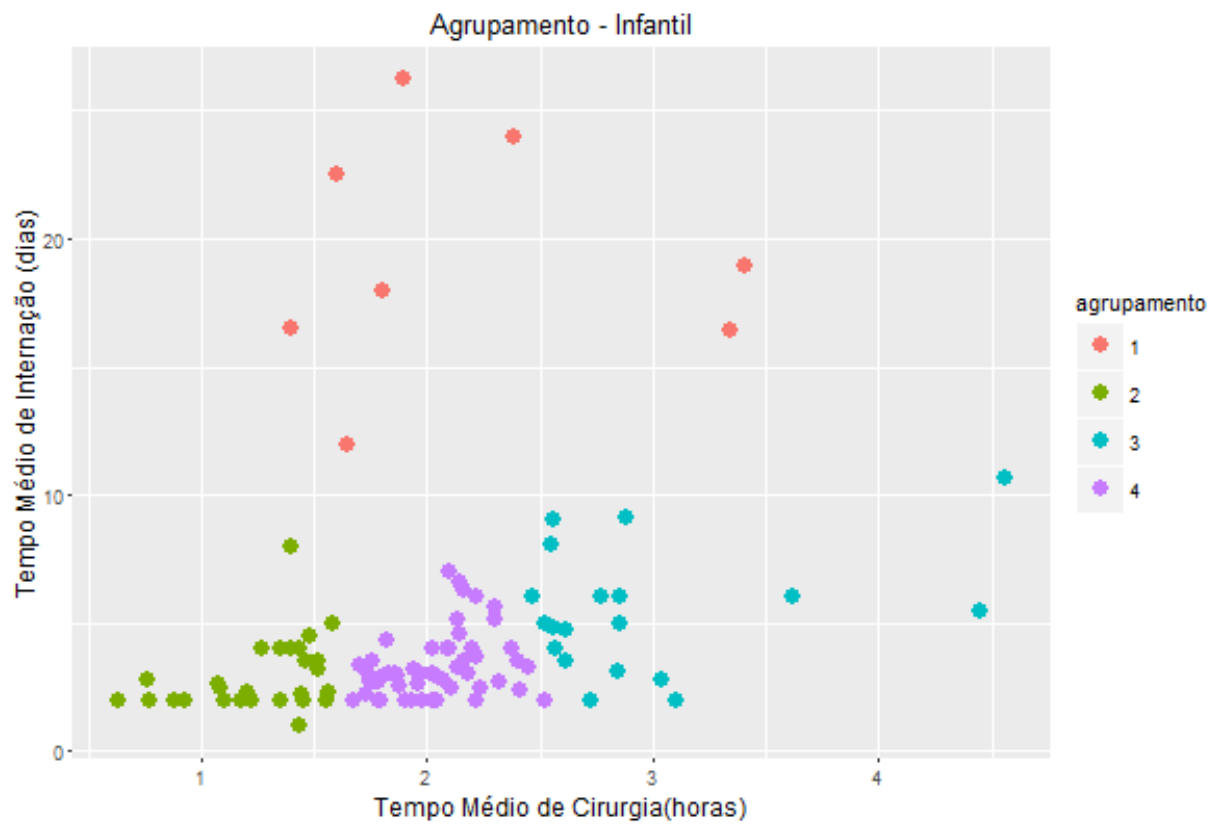


Figura B.2: Agrupamentos - Infantil

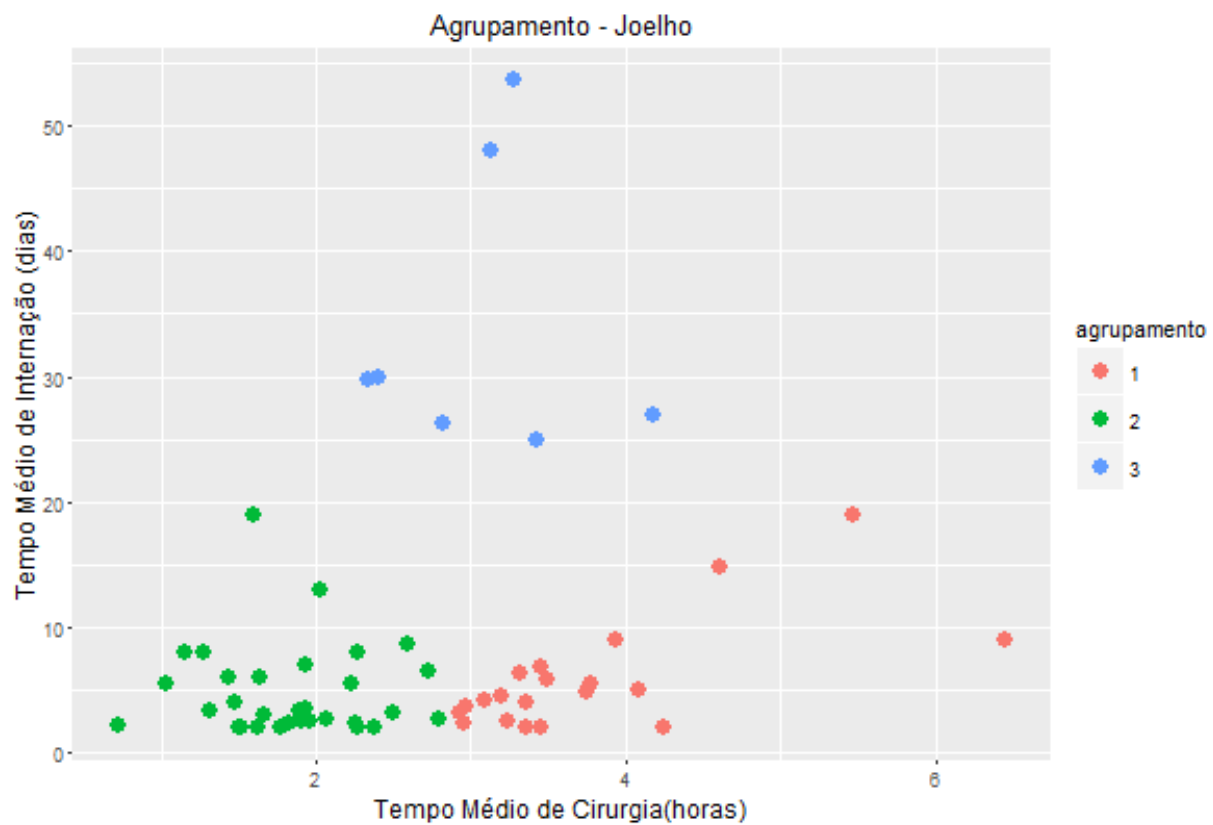


Figura B.3: Agrupamentos - Joelho

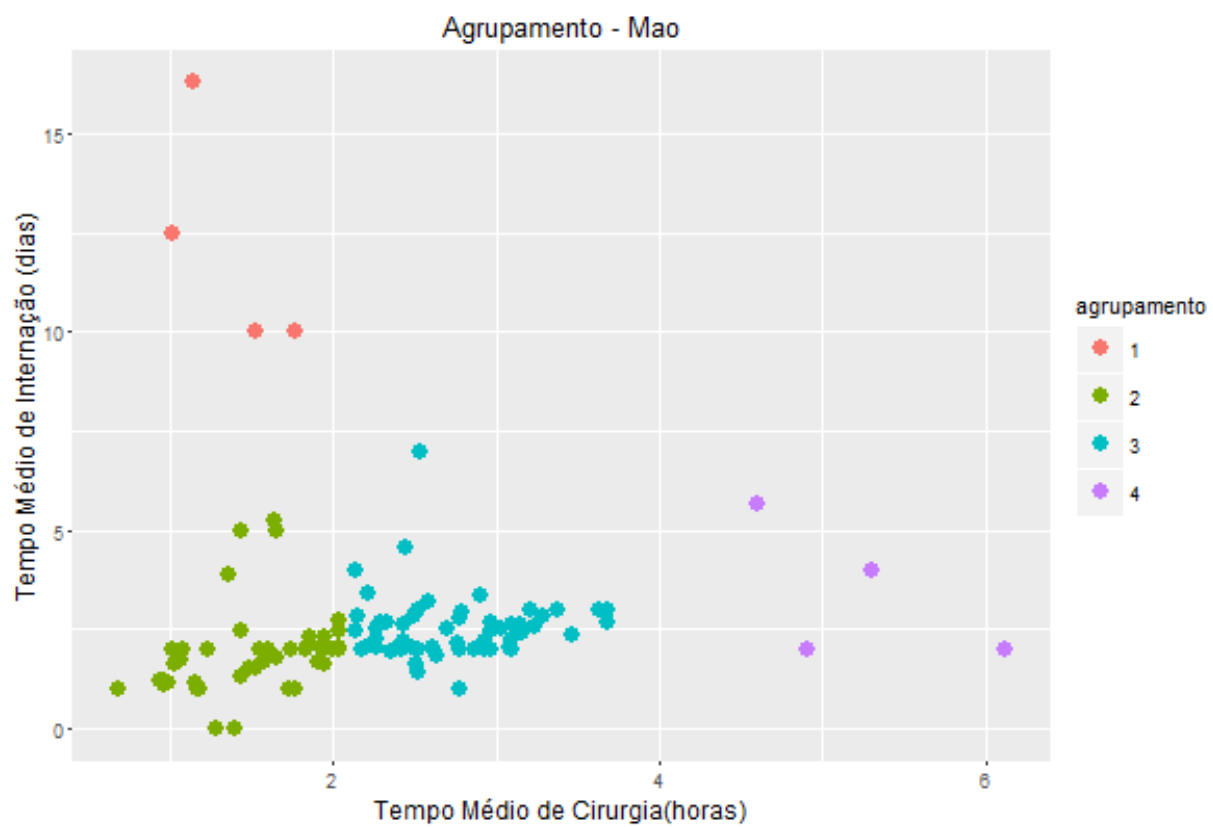


Figura B.4: Agrupamentos - Mão

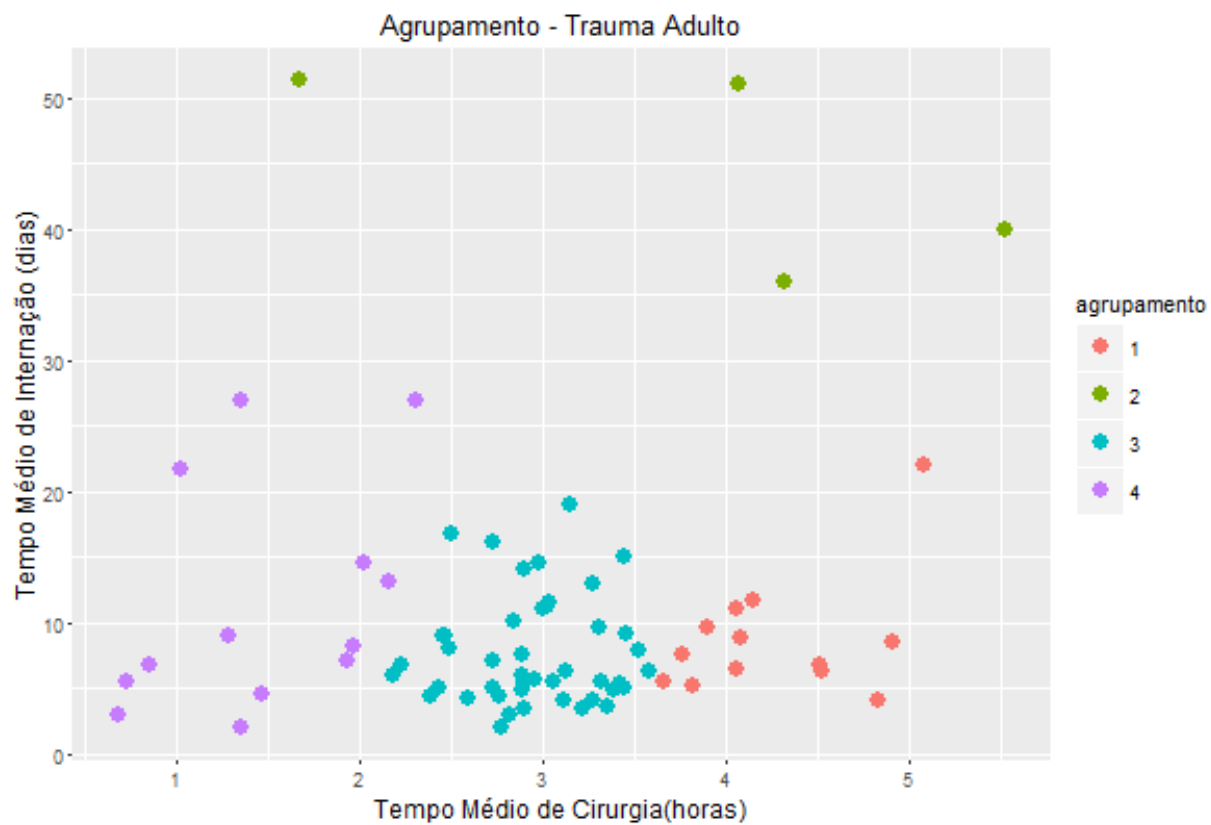


Figura B.5: Agrupamentos - Trauma Adulto

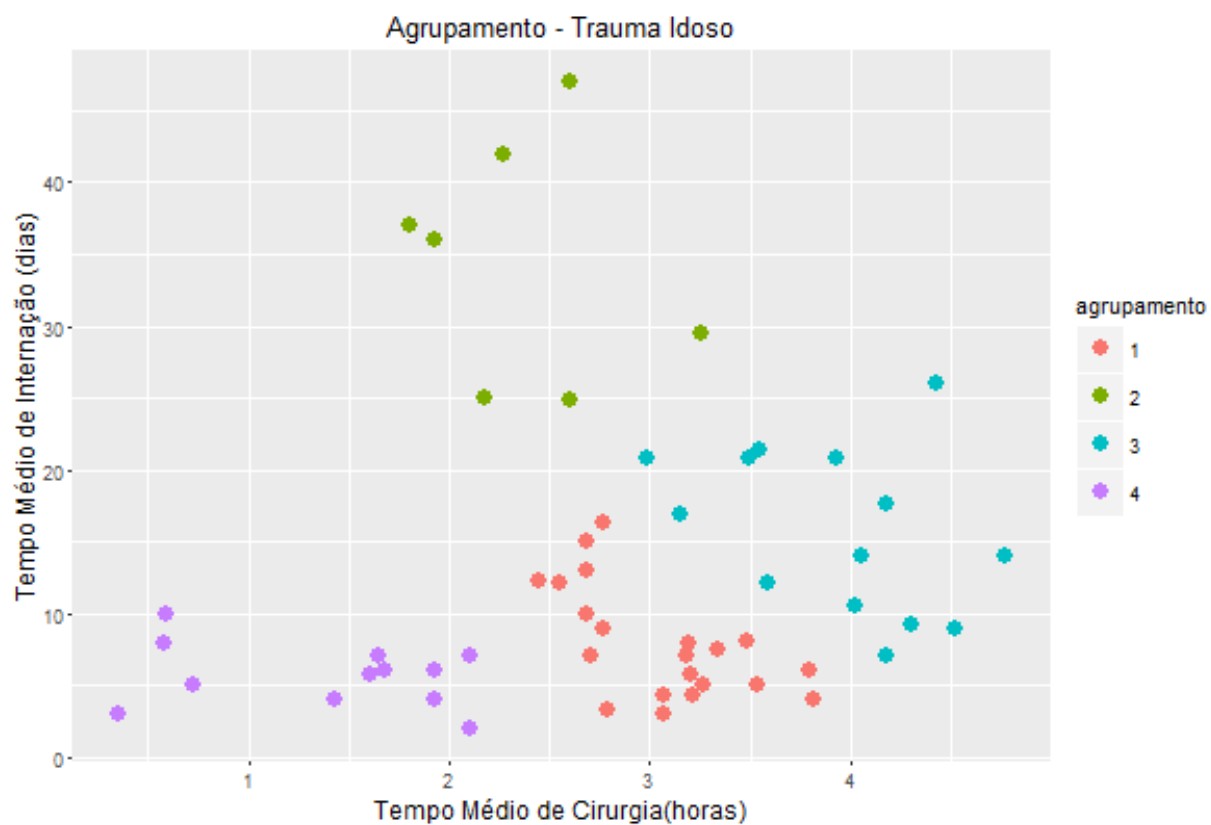


Figura B.6: Agrupamentos - Trauma Idoso

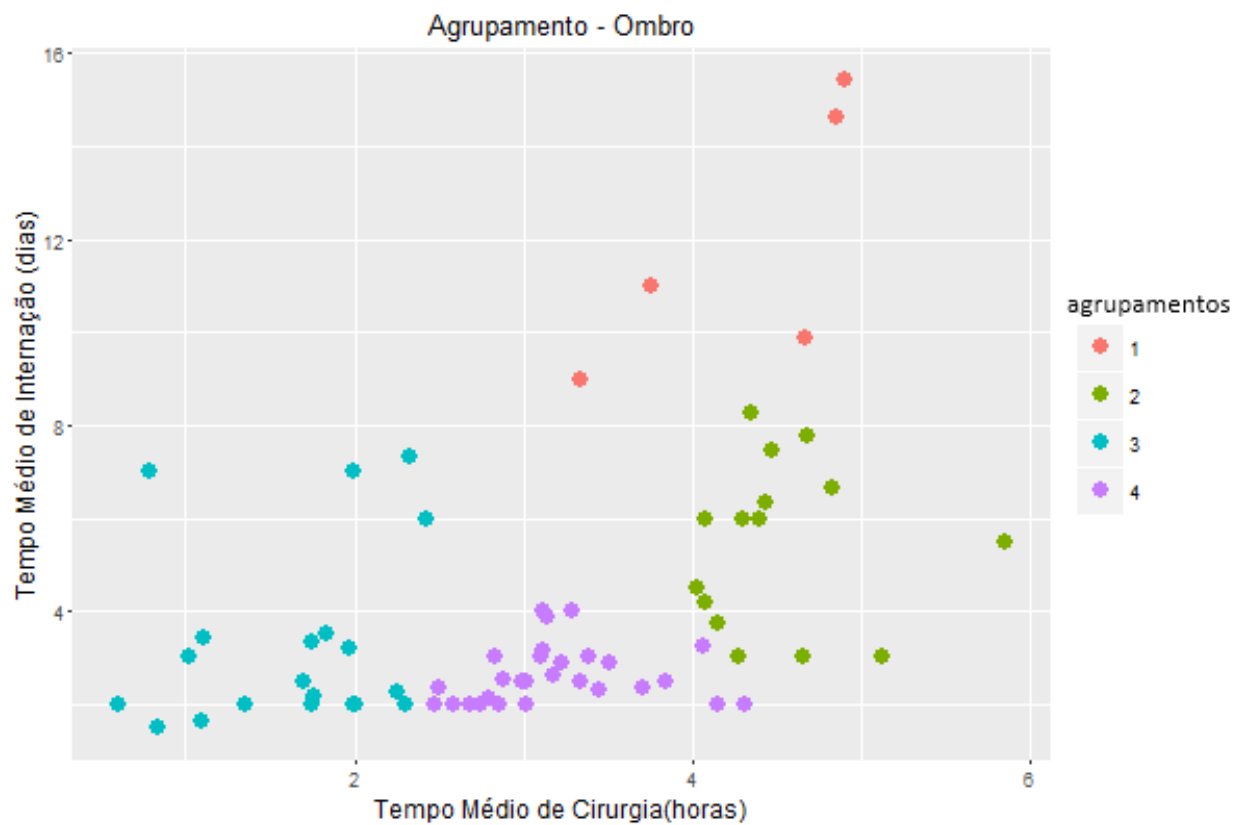


Figura B.7: Agrupamentos - Ombro

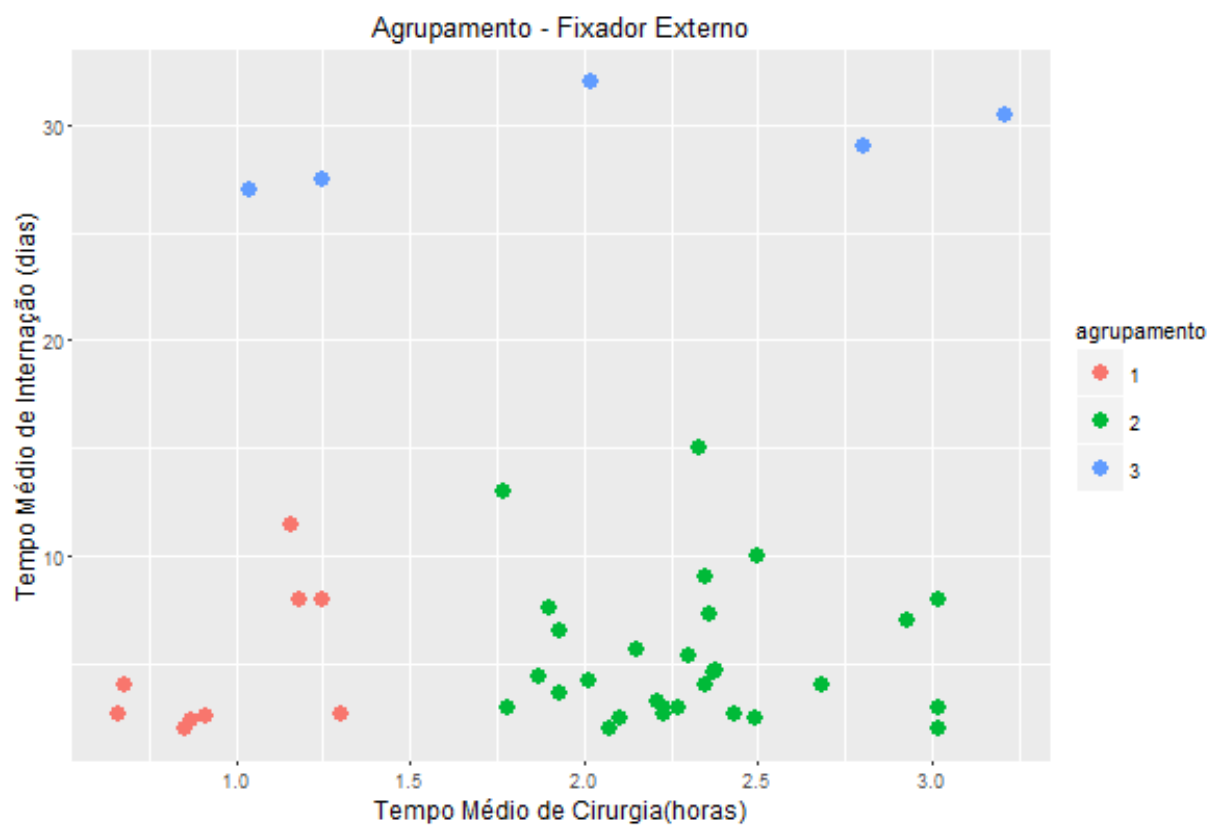


Figura B.8: Agrupamentos - Fixador Externo

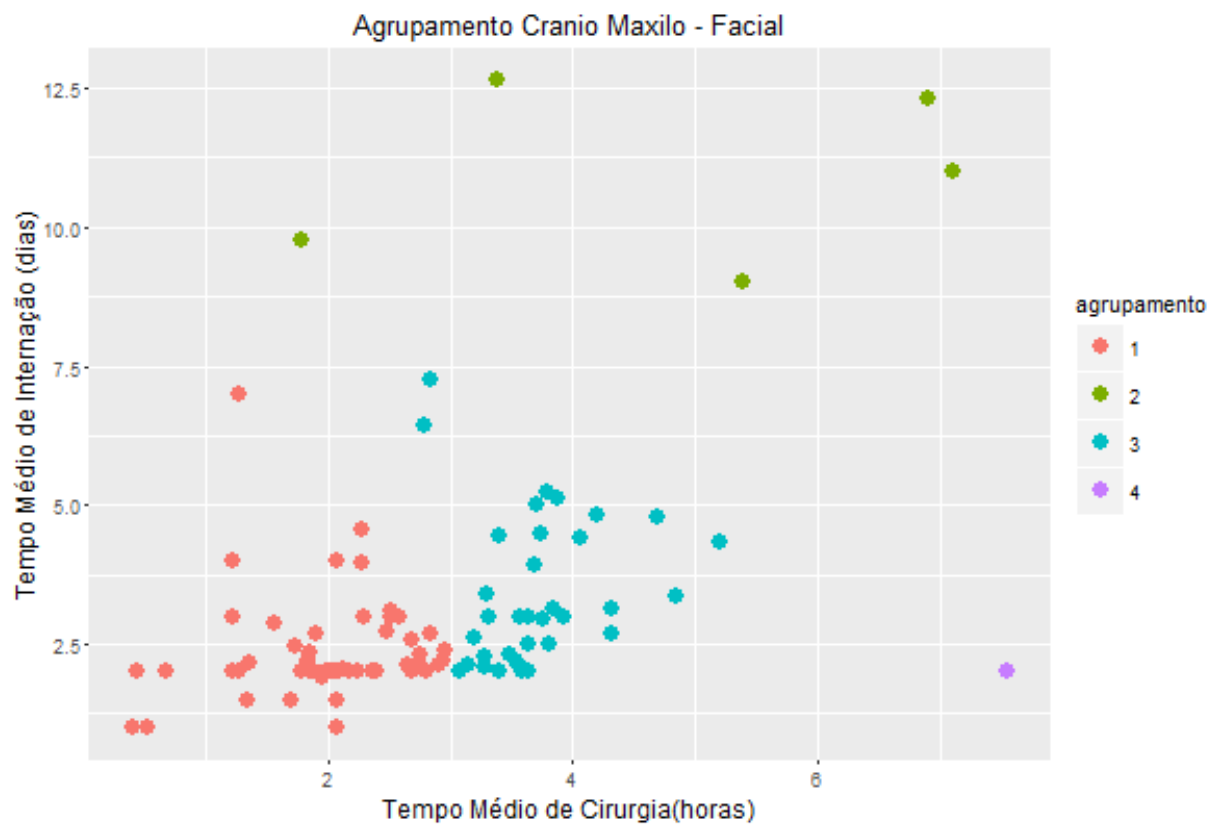


Figura B.9: Agrupamentos - Crânio Maxilo-Facial

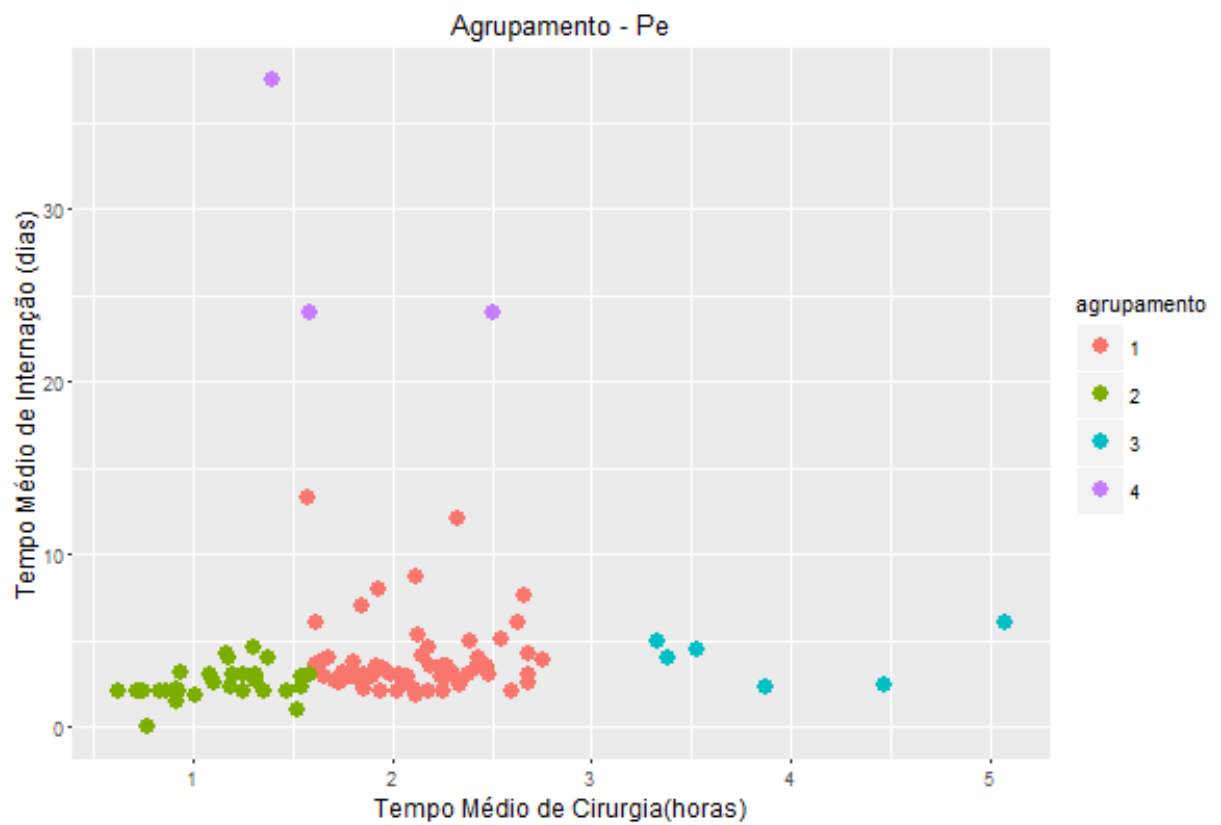


Figura B.10: Agrupamentos - Pé

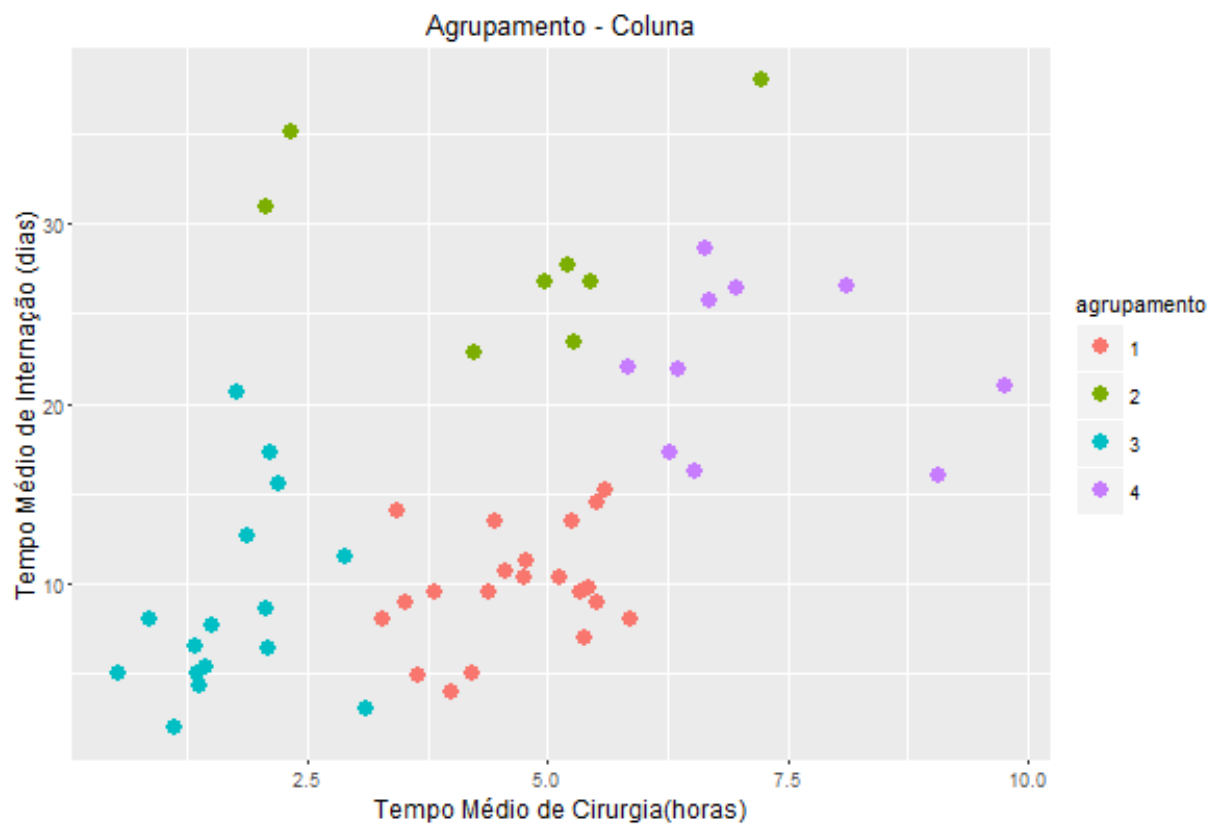


Figura B.11: Agrupamentos - Coluna

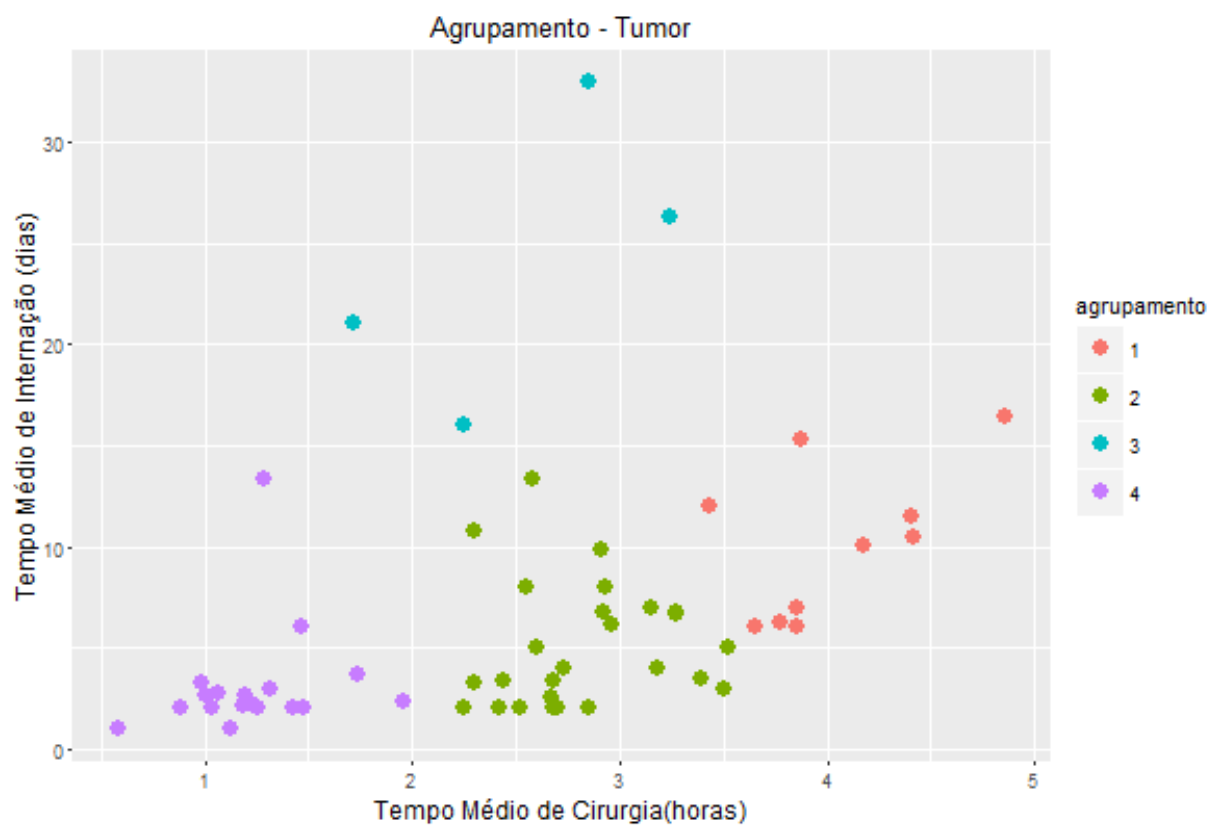


Figura B.12: Agrupamentos - Tumor

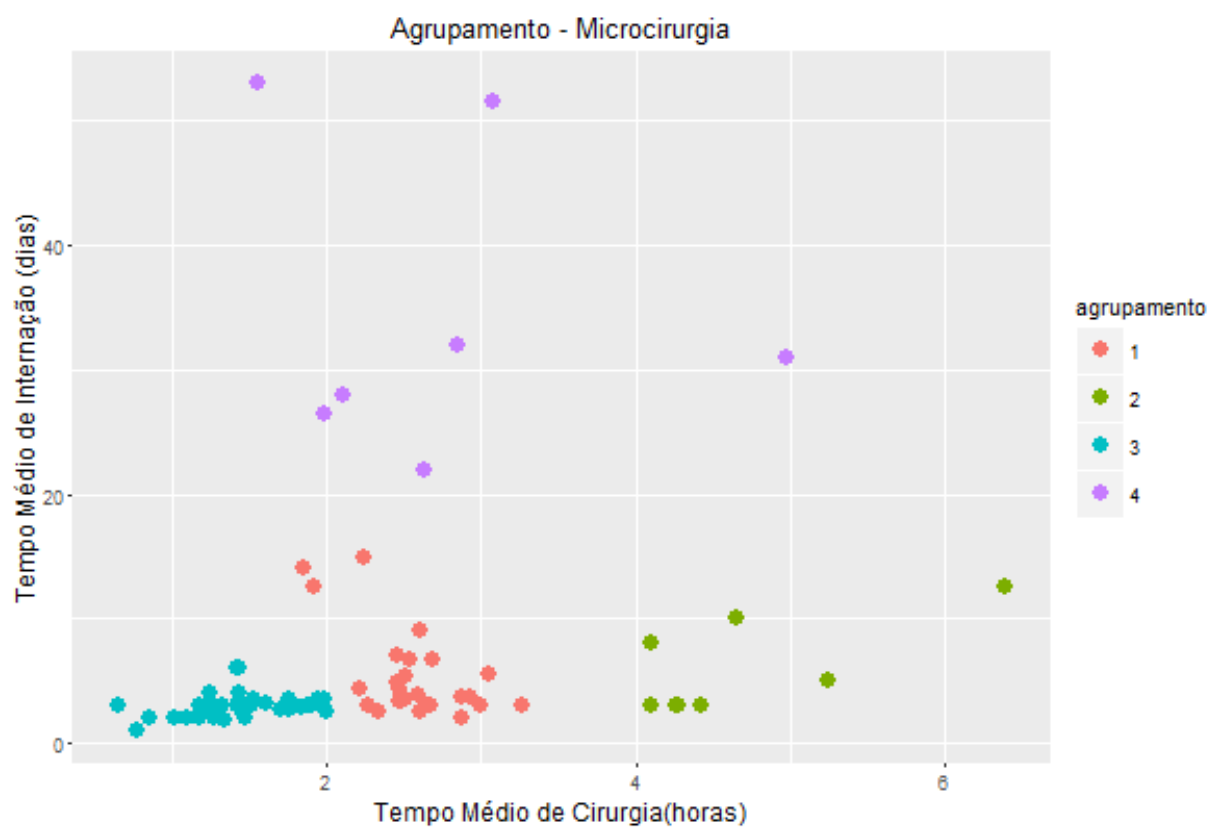


Figura B.13: Agrupamentos - Microcirurgia

Apêndice C

Escalonamento semanal de cirurgias - modelagem sem taxa de cancelamento de cirurgias

Tabela C.1: Escalonamento INTO - 3ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna			
2º	Coluna			
3º	Coluna			
4º	Coluna			
5º	Crânio Maxilo-Facial	Crânio Maxilo-Facial		
6º	Joelho	Joelho		
7º	Joelho	Joelho		
8º	Joelho	Joelho		
9º	Microcirurgia	Microcirurgia	Microcirurgia	
10º	Microcirurgia	Microcirurgia	Microcirurgia	
11º	Pé	Pé	Pé	
12º	Quadril	Quadril		
13º	Quadril	Quadril		
14º	Trauma Idoso	Trauma Idoso		
15º	Trauma Idoso	Trauma Idoso		

Tabela C.2: Escalonamento INTO - 4ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Crânio Maxilo-Facial	Crânio Maxilo-Facial		
2º	Fixador Externo	Fixador Externo		
3º	Infantil	Infantil		
4º	Infantil	Infantil		
5º	Joelho	Joelho		
6º	Joelho	Joelho		
7º	Joelho	Joelho		
8º	Ombro	Ombro	Ombro	
9º	Ombro	Ombro	Ombro	
10º	Ombro	Ombro	Ombro	
11º	Quadril	Quadril		
12º	Quadril	Quadril		
13º	Trauma Adulto	Trauma Adulto		
14º	Trauma Adulto	Trauma Adulto		
15º	Tumor	Tumor	Tumor	Tumor

Tabela C.3: Escalonamento INTO - 5ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna			
2º	Coluna			
3º	Coluna			
4º	Coluna			
5º	Crânio Maxilo-Facial	Crânio Maxilo-Facial		
6º	Joelho	Joelho		
7º	Joelho	Joelho		
8º	Joelho	Joelho		
9º	Ombro	Ombro	Ombro	
10º	Pé	Pé	Pé	
11º	Quadril	Quadril		
12º	Quadril	Quadril		
13º	Quadril	Quadril		
14º	Trauma Adulto	Trauma Adulto		
15º	Tumor	Tumor	Tumor	Tumor

Tabela C.4: Escalonamento INTO - 6ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna			
2º	Coluna			
3º	Coluna			
4º	Infantil	Infantil	Infantil	
5º	Joelho	Joelho		
6º	Joelho	Joelho		
7º	Joelho	Joelho		
8º	Ombro	Ombro	Ombro	
9º	Ombro	Ombro	Ombro	
10º	Ombro	Ombro	Ombro	
11º	Pé	Pé	Pé	
12º	Quadril	Quadril		
13º	Quadril	Quadril		
14º	Quadril	Quadril		
15º	Trauma Adulto	Trauma Adulto		

Tabela C.5: Escalonamento Hospital DIA - 3ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Mão	Mão	Mão	Mão
2º	Mão	Mão	Mão	Mão

Tabela C.6: Escalonamento DIA - 4ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Mão	Mão	Mão	Mão

Tabela C.7: Escalonamento Hospital DIA - 5ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Mão	Mão	Mão	Mão
2º	Mão	Mão	Mão	Mão

Tabela C.8: Escalonamento DIA - 6ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Mão	Mão	Mão	Mão
2º	Pé	Pé	Pé	

Apêndice D

Escalonamento semanal de cirurgias - modelagem com taxa de cancelamento de cirurgias de 16%

Tabela D.1: Escalonamento INTO - 3ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Crânio Maxilo-Facial 2	Crânio Maxilo-Facial 3		
2º	Joelho 1	Joelho 1		
3º	Joelho 1	Joelho 1		
4º	Joelho 1	Joelho 1		
5º	Joelho 1	Joelho 1		
6º	Joelho 1	Joelho 1		
7º	Joelho 2	Joelho 2	Joelho 3	
8º	Mão 3	Mão 4		
9º	Mão 3	Mão 4		
10º	Microcirurgia 2	Microcirurgia 3	Microcirurgia 3	
11º	Microcirurgia 1	Microcirurgia 1	Microcirurgia 4	
12º	Pé 1	Pé 1	Pé 2	Pé 2
13º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
14º	Trauma Adulto1	Trauma Adulto1		
15º	Tumor 1	Tumor 3	Tumor 4	

Tabela D.2: Escalonamento INTO - 4ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Fixador Externo 2	Fixador Externo 2	Fixador Externo 3	
2º	Infantil 2	Infantil 3	Infantil 3	
3º	Infantil 2	Infantil 3	Infantil 3	
4º	Joelho 1	Joelho 1		
5º	Joelho 1	Joelho 1		
6º	Joelho 1	Joelho 1		
7º	Mão 3	Mão 4		
8º	Ombro 3	Ombro 4		
9º	Ombro 3	Ombro 4		
10º	Ombro 3	Ombro 4		
11º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
12º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
13º	Trauma Adulto 3	Trauma Adulto 3	Trauma Adulto 4	
14º	Trauma Adulto 1	Trauma Adulto 1		
15º	Tumor 2	Tumor 2	Tumor 4	

Tabela D.3: Escalonamento INTO - 5ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 3	Coluna 3
2º	Coluna 1	Coluna 3		
3º	Crânio Maxilo-Facial 2	Crânio Maxilo-Facial 3		
4º	Joelho 1	Joelho 1		
5º	Joelho 1	Joelho 1		
6º	Joelho 1	Joelho 1		
7º	Joelho 1	Joelho 1		
8º	Joelho 1	Joelho 1		
9º	Mão 3	Mão 4		
10º	Mão 2	Mão 4		
11º	Ombro 1	Ombro 4		
12º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
13º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
14º	Trauma Adulto 1	Trauma Adulto 2		
15º	Trauma Idoso 1	Trauma Idoso 2		

Tabela D.4: Escalonamento INTO - 6ª Feira

Sala de Cirúrgico	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Coluna 1	Coluna 3		
2º	Coluna 2	Coluna 3		
3º	Infantil 1	Infantil 3		
4º	Joelho 1	Joelho 1		
5º	Joelho 1	Joelho 1		
6º	Joelho 1	Joelho 1		
9º	Mão 3	Mão 4		
10º	Mão 3	Mão 4		
10º	Mão 3	Mão 4		
11º	Ombro 1	Ombro 4		
11º	Ombro 2	Ombro 3	Ombro 3	
12º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
13º	Quadril 1	Quadril 3	Quadril 3	
14º	Trauma Adulto 1	Trauma Adulto 1		
15º	Trauma Idoso 3			

Tabela D.5: Escalonamento Hospital DIA - 3ª Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1º	Mão 3	Mão 4		
2º	Mão 3	Mão 4		
3º	Pé 3	Pé 3		

Tabela D.6: Escalonamento Hospital DIA - 4^a Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1 ^o	Mão 3	Mão 4		
2 ^o	Mão 3	Mão 4		
3 ^o	Fixador Externo 1	Fixador Externo 2		

Tabela D.7: Escalonamento Hospital DIA - 5^a Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1 ^o	Mão 3	Mão 4		
2 ^o	Mão 3	Mão 4		
3 ^o	Pé 3	Pé 3		

Tabela D.8: Escalonamento Hospital DIA - 6^a Feira

Sala de Cirurgia	Cirurgia 1	Cirurgia 2	Cirurgia 3	Cirurgia 4
1 ^o	Pé 3	Pé 3		
2 ^o	Pé 3	Pé 3		
3 ^o	Pé 3	Pé 3		