

**EDUARDO ASSUNÇÃO PRAÇA**

**OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICA E  
ESTOCÁSTICA DE UM PROBLEMA DE  
GERAÇÃO DE ESCALAS DE TRABALHO PARA  
MÉDICOS**

São Paulo  
2024



**EDUARDO ASSUNÇÃO PRAÇA**

**OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICA E  
ESTOCÁSTICA DE UM PROBLEMA DE  
GERAÇÃO DE ESCALAS DE TRABALHO PARA  
MÉDICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de Mestre  
em Ciências.

São Paulo  
2024



**EDUARDO ASSUNÇÃO PRAÇA**

**OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICA E  
ESTOCÁSTICA DE UM PROBLEMA DE  
GERAÇÃO DE ESCALAS DE TRABALHO PARA  
MÉDICOS**

Versão Corrigida

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de Mestre  
em Ciências.

Orientador:

Leonardo Junqueira

São Paulo  
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de abril de 2024



Assinatura do Autor



Assinatura do Orientador

#### Catálogo-na-publicação

Praça, Eduardo Assunção

Otimização determinística e estocástica de um problema de geração de escalas de trabalho para médicos / E. A. Praça -- São Paulo, 2024.

141 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos 2.Pesquisa Operacional em Sistemas de Saúde 3.Programação Linear Inteira Mista 4.Programação Estocástica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

*Aos meus amigos e família*





# AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma maneira me apoiaram e acreditaram na minha capacidade, me incentivando a sempre continuar caminhando ao longo dessa jornada.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Junqueira, por todo o empenho e dedicação ao longo da elaboração deste trabalho, sendo fundamental para boa gestão de tempo e para a ampliação de meus conhecimentos, além de todos os comentários que possibilitaram maior entendimento da estrutura e conteúdo que se espera de uma boa produção acadêmica.

Agradeço também à minha família, Renata e Beto, amigos e time (RG), que sempre estiveram ao meu lado e valorizaram minhas qualidades, permitindo com que eu sempre tivesse forças para continuar seguindo firme, mesmo em momentos difíceis.

Agradeço à Ju, que sempre esteve próxima me apoiando e se preocupando com todos os fatores possíveis para que eu me mantivesse calmo e motivado.

Agradeço à Pitty.

Agradeço às Profas. Dras. Débora Pretti Ronconi e Maristela Oliveira dos Santos e ao Prof. Dr. Pedro Munari, que foram membros integrantes das bancas de qualificação e de defesa, e que auxiliaram, por meio de comentários e sugestões, na melhoria do nível deste trabalho.

Agradeço à CAPES pelo apoio dado durante o desenvolvimento dos estudos dentro da linha de pesquisa em questão.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os professores e monitores que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal, fazendo com que eu sempre buscasse por estudar e me aperfeiçoar para me tornar uma pessoa mais completa em todos os níveis.

A eles, toda a minha gratidão.



“Sarai qualcuno se resterai diverso dagli  
altri.”

– Damiano David



# RESUMO

Em virtude da crescente competitividade entre organizações hospitalares, há maior busca pelo uso de aplicações e técnicas que sejam responsáveis por uma melhor gestão e otimização de recursos. Dentre essas técnicas, destaca-se a utilização de conceitos de Pesquisa Operacional, principalmente quando aplicada à gestão da força de trabalho nos hospitais, em virtude dos custos associados ao contingente de trabalho e de manutenção de boa qualidade de atendimento dos pacientes. Como foco deste estudo, tem-se a busca pela geração otimizada de escalas de trabalho para médicos, por meio da criação de modelos matemáticos baseados em programação linear inteira mista, tanto em versão determinística quanto em versão estocástica. A revisão da literatura abrange o estado da arte nas áreas pertinentes e a aplicabilidade dos conceitos, incluindo aspectos como a necessidade de folgas, indisponibilidade de médicos em determinados períodos, sequências de turnos proibidas e preferências dos gestores de equipes médicas em redes hospitalares. Apresenta-se um estudo de caso baseado em informações reais de uma organização hospitalar brasileira, considerando os aspectos mencionados para a maximização da satisfação dos médicos. Tais informações foram fornecidas tanto por gestores quanto por médicos membros da equipe, auxiliando na elaboração da versão determinística do modelo. Além disso, a versão estocástica do modelo incorpora incertezas no parâmetro da demanda, e utiliza conceitos de programação estocástica de dois estágios com recurso, com uma estratégia de agrupamento de demandas para a geração de cenários, considerando cada possível realização de tal parâmetro. Os resultados indicam que, para o modelo determinístico, apesar de se tratar de um problema complexo para cenários realistas de gestão, que possuem relativa indisponibilidade de médicos e poucas localidades a gerir, os tempos computacionais para otimalidade não são elevados. Também para o modelo estocástico, com o uso da estratégia de agrupamento, tempos computacionais não elevados foram obtidos, mesmo com número elevado de variáveis e restrições. Em termos de contribuições para a literatura, destacam-se a elaboração de um modelo determinístico compacto e o uso da estratégia de agrupamento para reduzir a quantidade de variáveis e restrições do modelo estocástico. Entre os principais benefícios para os gestores, destacam-se a praticidade de não ter que dedicar extensas horas para a criação manual das escalas de trabalho e a garantia de que a escala obtida é a que maximiza a preferência da equipe, potencializando melhorias no serviço médico prestado.

**Palavras-chave:** Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos, Pesquisa Operacional em Sistemas de Saúde, Programação Linear Inteira Mista, Programação Estocástica

# ABSTRACT

On account of the increasing competitiveness among hospital organizations, there is a higher demand for the use of applications and techniques responsible for better managerial decisions and optimization of resources. Among these applications, the utilization of concepts of Operational Research stands out, mainly when applied to workforce planning inside healthcare organizations, due to the costs associated with the workforce and an urge to maintain a high quality of patients' satisfaction. The focus of this study is to generate optimized physician rosters, through the creation of mathematical models based on mixed-integer linear programming, both in deterministic and stochastic versions. Literature review presents the state-of-the-art in correlate areas and the applicability of concepts, including aspects such as necessities of day-offs, partial unavailability of physicians, prohibited sequences of working patterns, and the preferences of managers of healthcare organizations. A case study based on real information from a Brazilian healthcare organization is presented, considering the mentioned aspects to maximize physician satisfaction. These information were provided by both managers and physicians, assisting in the development of the deterministic version of the model. In addition, the stochastic version of the model incorporates uncertainties in the demand parameter and uses concepts of two-stage stochastic programming with recourse, employing a demand grouping strategy for scenario generation, considering each possible realization of such parameter. The results indicate that, for the deterministic model, despite being a complex problem, for realistic management scenarios, with relative unavailability of physicians and few locations to manage, computational times for optimality are not high. Also, for the stochastic model, using the grouping strategy, low computational times were achieved, even with a high number of variables and constraints. In terms of contributions to the literature, the development of a compact deterministic model and the utilization of the clustering strategy to reduce the number of variables and constraints in the stochastic model stand out. Among the main benefits for managers, the practicality of not dedicating extensive hours to manual creation of working rosters and the assurance that the obtained schedule maximizes team preference are highlighted, enhancing improvements in the provided medical service.

**Keywords:** Physician Rostering Problem, Operations Research for Healthcare, Mixed Integer Linear Programming, Stochastic Programming

## LISTA DE FIGURAS

1	Esquematização do Capítulo 2. . . . .	26
2	Número de publicações de Pesquisa Operacional relacionadas à temática de saúde por ano. . . . .	27
3	Diagrama de Planejamento de Força de Trabalho. . . . .	33
4	Esquematização do PDCT. . . . .	34
5	Esquematização do Problema de Alocação de Funcionários. . . . .	37
6	Relação entre tópicos abordados no Capítulo 2 para a descrição do problema abordado. . . . .	60
7	Esquematização do agrupamento das alocações de um horizonte de planejamento em grupos. . . . .	78
8	Esquematização do tratamento da demanda como igual para todas as alocações de um mesmo grupo. . . . .	78
9	Relação entre entradas e saídas do programa elaborado. . . . .	83
10	Exemplo de <i>template</i> de coleta de preferências de cada médico para Estudo de Caso. . . . .	90
11	Escala que otimiza cenário observado no Estudo de Caso do trabalho. . . . .	92
12	Escala manual vigente no Estudo de Caso do trabalho. . . . .	93
13	<i>Boxplot</i> do tempo computacional <i>versus</i> Número de Médicos. . . . .	99
14	<i>Boxplot</i> do tempo computacional <i>versus</i> Número de Dias. . . . .	99
15	<i>Boxplot</i> do tempo computacional <i>versus</i> Cenário de Demandas. . . . .	100
16	<i>Boxplot</i> do tempo computacional <i>versus</i> Caso de Restrições de Setores. . . . .	100
17	<i>Boxplot</i> do tempo computacional <i>versus</i> Caso de Restrições Temporais. . . . .	101
18	Resumo da ANOVA realizada a partir do experimento fatorial realizado. . . . .	101
19	Observação das interações entre dois fatores para o experimento fatorial realizado. . . . .	102

20	Resumo dos resultados do experimento realizado em termos dos valores da função objetivo e da penalidade média por número de médicos. . . . .	103
21	Comparação entre tempo computacional e número de dias do horizonte de planejamento para testes adicionais realizados com cenário de demandas “ $C_3$ ” e 2“ $C_3$ ”. . . . .	105
22	Árvore de Cenários para a realização da validação do modelo estocástico. .	108
23	<i>Boxplots</i> de resultados do Modelo Estocástico segmentados por número de grupos representativos. . . . .	114
24	<i>Boxplots</i> de resultados do Modelo Estocástico segmentados por número de médicos. . . . .	115
25	<i>Boxplots</i> de resultados do Modelo Estocástico segmentados por número de dias do horizonte de planejamento. . . . .	115
26	<i>Boxplots</i> de resultados do Modelo Estocástico segmentados por magnitude de pesos. . . . .	116
27	Exemplificação da escala gerada com a ferramenta DoctorID. . . . .	134
28	Exemplificação da substituição de plantões com a ferramenta DoctorID. . .	134
29	Ilustração da interface de usuário da solução Shift Admin. . . . .	135
30	Ilustração minimalista da interface de usuário da solução QGenda. . . . .	136
31	Ilustração da escala gerada pela solução PACE Scheduler. . . . .	137
32	Ilustração de aviso de não satisfação da demanda pela solução PACE Scheduler. . . . .	138
33	Interface do usuário para <i>template</i> de geração de escalas de trabalho em Excel. . . . .	139
34	Interface do usuário para calendário/agenda da empresa Google. . . . .	139



# LISTA DE TABELAS

1	Consolidação esquemática de trabalhos de PO na área de saúde. . . . .	31
2	Relação entre temáticas que compõem o Planejamento de Força de Trabalho. . . . .	33
3	Contabilização de estudos na temática de Alocação de Funcionários. . . . .	40
4	Restrições usuais aplicáveis ao PGETM. . . . .	45
5	Resumo de características levantadas de soluções atuais para a geração de escalas de trabalho. . . . .	50
6	Estrutura de uma matriz de decisão. . . . .	52
7	Estabelecimento de conversão numérica para método AHP. . . . .	53
8	Estrutura da matriz de comparação de critérios do método AHP. . . . .	53
9	Definições adotadas para o PGETM. . . . .	64
10	Restrições contempladas no PGETM deste trabalho. . . . .	65
11	Agrupamento das restrições contempladas no PGETM, categorizadas para facilitação de entendimento. . . . .	65
12	Análise entre modelo deste trabalho e modelo de Wickert et al. (2021). . . . .	67
13	Índices e conjuntos da modelagem determinística do PGETM deste trabalho. . . . .	69
14	Parâmetros da modelagem determinística do PGETM deste trabalho. . . . .	69
15	Variáveis de decisão da modelagem determinística do PGETM deste trabalho. . . . .	70
16	Cenário escolhido para explicação da abordagem adotada para simplificação dos cenários mais representativos. . . . .	77
17	Índices, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão adicionais da modelagem estocástica do PGETM deste trabalho. . . . .	79
18	Relação entre restrições <i>soft</i> contempladas no PGETM e suas siglas. . . . .	84
19	Comparação das importâncias das restrições via AHP e ponderação final dos pesos atribuídos. . . . .	84
20	Constituição das demandas da Validação da Modelagem Determinística. . . . .	86

21	Valores dos parâmetros $\alpha$ no cenário de validação do modelo determinístico.	88
22	Escala feita manualmente para validação do Modelo Determinístico. . . . .	88
23	Escala otimizada para validação do Modelo Determinístico. . . . .	88
24	Caracterização do cenário prático do trabalho. . . . .	91
25	Constituição do Cenário de Demandas determinístico do Estudo de Caso realizado em rede hospitalar de São Paulo. . . . .	91
26	Contabilização das restrições <i>soft</i> violadas na escala que otimiza o Estudo de Caso do trabalho. . . . .	92
27	Contabilização das restrições <i>soft</i> violadas na escala manual de trabalho vigente. . . . .	94
28	Comparação de violações de restrições <i>soft</i> entre as escalas otimizada e manual. . . . .	94
29	Constituição do Cenário de Demandas do Cenário $C_1$ (trazidos apenas os primeiros sete dias, os demais seguem o padrão semanal). . . . .	97
30	Constituição do Cenário de Demandas Cenário $C_2$ (trazidos apenas os primeiros sete dias, os demais seguem o padrão semanal). . . . .	97
31	Constituição do Cenário de Demandas do Cenário $C_3$ (trazidos apenas os primeiros sete dias, os demais seguem o padrão semanal). . . . .	97
32	Determinação do valor dos parâmetros $\alpha$ segundo cada cenário. . . . .	98
33	Esquematização do cenário para validação da modelagem estocástica, com código de cores representando o agrupamento realizado. . . . .	106
34	Relação de níveis de demanda e probabilidade de ocorrência de cada grupo representativo representado na Tabela 33. . . . .	107
35	Relação de cenários para validação do modelo estocástico, com respectivos cálculos de probabilidade de ocorrência. . . . .	107
36	Solução após otimização do problema para validação do modelo estocástico, dividida nos cenários correspondentes. . . . .	109
37	Composição da função objetivo da validação do modelo estocástico. . . . .	110
38	Cenário de Demandas com subdivisão em 3 grupos representativos. . . . .	112

39	Cenário de Demandas com subdivisão em 6 grupos representativos. . . . .	112
40	Cenário de Demandas com subdivisão em 12 grupos representativos. . . . .	113
41	Resultados dos testes adicionais do Modelo Estocástico, alterando valores dos pesos $\omega_{y1}$ e $\omega_{y2}$ . . . . .	117
42	Índices, conjuntos e parâmetros para modelo de PDCT. . . . .	128
43	Variáveis de decisão para modelo de PDCT. . . . .	129
44	Definição de índices, conjuntos, parâmetros e variáveis para modelo genérico de PAF. . . . .	131
45	Demanda, em diferentes níveis, referente a cada grupo para o cenário com 3 agrupamentos. . . . .	140
46	Demanda, em diferentes níveis, referente a cada grupo para o cenário com 6 agrupamentos. . . . .	141
47	Demanda, em diferentes níveis, referente a cada grupo para o cenário com 12 agrupamentos. . . . .	141

## LISTA DE SIGLAS

**AHP** *Analytical Hierarchy Process.*

**ANOVA** Análise de Variância.

**CLT** Consolidação das Leis do Trabalho.

**CREMESP** Conselho Regional de Medicina do Estado de São Paulo.

**EEV** *Effective Expected Value.*

**EMV** *Expected Mean Value.*

**EVPI** *Expected Value of Perfect Information.*

**MDMC** Métodos de Decisão Multicritério.

**PAE** Problema da Alocação de Enfermeiros.

**PAF** Problema da Alocação de Funcionários.

**PAM** Problema de Alocação de Médicos.

**PCMSO** Programa de Controle Médico em Saúde Ocupacional.

**PDCT** Problema de Determinação do Contingente de Trabalho.

**PGETM** Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos.

**PLIM** Programação Linear Inteira Mista.

**RP** *Recourse Policy.*

**VSS** *Value of Stochastic Solution.*

**WS** *Wait-and-See.*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Contextualização sobre Gestão em Organizações Hospitalares . . . . .	20
1.2	Contextualização do Foco de Estudo do Trabalho . . . . .	21
1.3	Posicionamento do Trabalho com relação ao Rigor e Relevância . . . . .	22
1.4	Parcerias e Motivação . . . . .	23
1.5	Contribuições do Trabalho . . . . .	24
1.6	Estrutura do Trabalho . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>26</b>
2.1	Aplicações de Pesquisa Operacional em Sistemas de Saúde . . . . .	27
2.2	Planejamento de Força de Trabalho . . . . .	31
2.2.1	Problema de Determinação do Contingente de Trabalho (PDCT) . . . . .	34
2.2.2	Problema da Alocação de Funcionários (PAF) . . . . .	37
2.3	Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos (PGETM) . . . . .	40
2.3.1	Definições de Variáveis . . . . .	42
2.3.2	Funções Objetivo e Tipos de Problema . . . . .	43
2.3.3	Restrições Contempladas . . . . .	44
2.3.4	Métodos de Resolução do PGETM . . . . .	46
2.4	Contexto de Legislação Vigente para Regulação da Atividade Médica . . . . .	47
2.5	Soluções Atuais de Gestão para Criação de Escalas de Trabalho na Área Médica . . . . .	49
2.6	Aspectos sobre Métodos de Decisão Multicritério (MDMC) . . . . .	50
2.6.1	O Método AHP e sua Aplicação em Problemas de Geração de Escalas . . . . .	52
2.7	Considerações sobre Incorporação de Incertezas em Problemas de Otimização . . . . .	54

<b>3</b>	<b>Descrição do Problema</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>67</b>
4.1	Modelagem Matemática Determinística . . . . .	68
4.1.1	Função Objetivo e Restrições do Modelo Matemático Determinístico	70
4.2	Modelagem Matemática Estocástica . . . . .	76
4.2.1	Função Objetivo e Restrições do Modelo Matemático Estocástico .	79
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>82</b>
5.1	Resultados e Análises do Modelo Matemático Determinístico . . . . .	85
5.1.1	Validação da Modelagem Determinística . . . . .	86
5.1.2	Verificação da Aplicabilidade do Modelo Determinístico a Partir de Estudo de Caso . . . . .	89
5.1.3	Verificação de Escalabilidade do Modelo Determinístico . . . . .	95
5.2	Resultados e Análises do Modelo Matemático Estocástico . . . . .	105
5.2.1	Validação da Modelagem Estocástica . . . . .	106
5.2.2	Verificação de Viabilidade do Modelo Estocástico . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Conclusões e Perspectivas Futuras</b>	<b>119</b>
	<b>Referências</b>	<b>121</b>
	<b>Apêndice A – Um modelo do PDCT</b>	<b>128</b>
	<b>Apêndice B – Um modelo do PAF</b>	<b>131</b>
	<b>Apêndice C – Soluções Atuais de Gerações de Escalas de Trabalho</b>	<b>133</b>
	<b>Apêndice D – Níveis de demanda para cada grupo representativo utilizado no teste de viabilidade do modelo estocástico.</b>	<b>140</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A temática da saúde tem ocupado posição de alto destaque dentro de decisões de investimento em pesquisa, uma vez que é de interesse mundial que cada vez mais haja melhorias na atuação médica e no tratamento de pacientes. O aumento da idade média da população mundial e maior expectativa de vida são fatores que explicam o recente aumento do interesse da temática da saúde dentro de estudos em diversas áreas de otimização de recursos, como a Pesquisa Operacional (RAIS; VIANA, 2010). Além disso, a modernização e incorporação de novas tecnologias em redes hospitalares também abre espaço para novas possibilidades de aplicação de modelos de programação matemática a fim de haver melhorias no serviço prestado.

Há tendência recente, devido à mudança no nível de acesso à informação e maior presença de engajamento dos clientes, de mudança entre lógicas de pensamento de produção. Anteriormente, havia o domínio do modo de pensar centrado em bens, no qual o foco primário era na entrega de bens tangíveis, com serviços sendo apenas um tipo específico e particular de produto, secundário, uma vez que a importância central era o resultado em si. Já o novo pensamento, centrado em serviços, considera que a criação de valor é feita ao longo da cadeia de um produto, podendo haver bens envolvidos, porém centrada nos processos coordenados a fim de se ter um resultado. Nesse sistema, estreita-se a relação entre produtor e consumidor, pois há uma co-criação e integração do cliente na cadeia geradora de valor, incentivando mudanças, por exemplo, por sistemas de *feedbacks* (VARGO; LUSCH, 2008).

Tal modificação tem ampla relação com a importância que o setor terciário adquiriu ao longo das últimas décadas, com destaques para novas características de demanda de desejo de melhor qualidade de vida, público mais jovem e tecnológico, maiores remunerações e tempo de lazer, maior integração econômica e menor escala de tempo para difusão de informação (GIANESI; CORREA, 1994).

Há alguns setores tradicionais, como os Sistemas de Saúde, nos quais as mudanças majoritariamente demoram mais para ocorrer, muitas vezes porque a cultura já enraizada

leva mais tempo para apresentar perdas de valor para o consumidor. A exemplo, a demora para a criação de aplicativo prático para agendamento de consultas em rede hospitalar provavelmente será sentida como um empecilho para o cliente, porém não faz com que este desista de realizar a consulta, uma vez que os exames se tratam de serviços essenciais para a população (APPELBAUM; WOHL, 2000).

Apesar de ter levado maior tempo, em virtude da modernização de redes hospitalares concorrentes, os aspectos econômicos de competitividade entre organizações de saúde ficaram em maior evidência, buscando cada vez maiores vantagens estratégicas e melhorias na gestão de recursos. Juntam-se a isso o fato de que mais de 50% dos custos hospitalares estão relacionados à força de trabalho e o fato de que há uma escassez de médicos e enfermeiros no mercado de trabalho (ERHARD et al., 2018).

Assim sendo, formas de se otimizar a distribuição tanto temporal quanto em equipes acabam sendo diferenciais importantes na atualidade. Corroboram-se as assertivas acima com a maior busca por publicações na temática de Pesquisa Operacional ligada a Sistemas de Saúde em tempos recentes, principalmente em temáticas de auxílio à gestão, agendamento e geração de escalas de trabalho (ERNST et al., 2004a).

## 1.1 Contextualização sobre Gestão em Organizações Hospitalares

Cerca de 40% dos custos operacionais de organizações hospitalares estão atrelados à cadeia de suprimento e logística, com estimativas de ganhos potenciais de 2 a 8% ao se incorporar uma boa gestão de cadeia de suprimento. Além disso, também como efeitos relacionados a boas práticas de gestão, estão a lealdade e retenção dos profissionais (principalmente médicos e enfermeiros), levando a uma maior qualidade do serviço, que possui potencial de conversão em uma melhor avaliação por parte dos pacientes (MCKONE-SWEET; HAMILTON; WILLIS, 2005). Ainda dentro da temática de retenção de profissionais, o fato de haver uma quantidade limitada de bons médicos no mercado e dificuldade grande na reposição corroboram com a importância de se criarem sistemas que auxiliem na satisfação de preferências desses trabalhadores, a fim de fazer com que a retenção deles seja ampliada (THIELEN, 2018).

Organizações dentro do sistema de saúde são especialmente complexas em termos de gestão, por exemplo, na questão de salas operatórias (DEVESSE et al., 2023) ou na contratação e gerenciamento de médicos (MARCHESI; HAMACHER; FLECK, 2020).



Tal complexidade gera a necessidade de antecipação de novas tecnologias e seleção de como realizar a incorporação considerando objetivos financeiros e demandas por parte de trabalhadores, pacientes, financiadores e organizações reguladoras, o que abre espaços para diversos desafios na área (BAKER, 2001).

Como principais problemas existentes para a implantação de boas práticas de gestão de cadeias de suprimento, encontram-se a falta de clareza de incentivos competitivos, falta de linguagem universal entre a parte administrativa e a operacional, o não entendimento do papel da organização hospitalar como auxiliadora, dificuldade de compartilhamento de informações, processo decisório difuso e falta de consistência/existência de avaliadores de desempenho (MCKONE-SWEET; HAMILTON; WILLIS, 2005).

Apesar dos problemas anteriormente retratados se referirem à cadeia de suprimentos e logística, são justamente essas mesmas problemáticas atuais que motivam grande parte dos estudos de Pesquisa Operacional na área de saúde a buscarem aplicações e desenvolvimento de teoria a fim de melhorar a prestação geral de serviço.

## 1.2 Contextualização do Foco de Estudo do Trabalho

Diante de tais considerações acerca da oportunidade da aplicação de conceitos de Pesquisa Operacional e relevância acadêmica da área, a temática deste presente trabalho é referente ao Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos (PGETM). A título introdutório, o problema consiste em determinar, para uma determinada realidade médica (com equipe já formada, restrições e demandas para cada uma das alocações temporais e espaciais/físicas existentes), qual é a escala de trabalho viável que, segundo objetivos determinados como relevantes (pelos gestores hospitalares), é a melhor possível para ser seguida pelos trabalhadores do grupo médico em questão (ERHARD et al., 2018). Ademais, uma vez que usualmente há a presença de múltiplos objetivos desejáveis, a utilização de aspectos de métodos de decisão multicritério se torna tanto necessária quanto muito interessante (TRANTAPHYLLOU, 2000).

O foco de estudo, dentro do problema em questão, consiste em se utilizar de conceitos de Pesquisa Operacional a fim de se estabelecerem modelagens matemáticas para a descrição da situação em questão a partir do conhecimento de características relativas à organização e à legislação, com o enfoque na maximização de aspectos que possam levar implicitamente a um melhor serviço prestado, como exemplo a satisfação das preferências individuais de cada médico. Inicialmente, de forma determinística, considera-se como

uma informação conhecida a real demanda por médicos em cada um dos turnos, dias e setores considerados e, posteriormente, de forma estocástica, considera-se a incorporação de incerteza no aspecto da demanda por médicos. Este último ponto será desenvolvido por meio da utilização de conceitos de otimização sob incerteza por meio de Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso, enquanto que o primeiro ponto será desenvolvido por meio de Programação Linear Inteira Mista.

### 1.3 Posicionamento do Trabalho com relação ao Rigor e Relevância

Com relação às contribuições acadêmicas de trabalhos dentro da área de Pesquisa Operacional, encontra-se sempre o *trade-off* entre o quanto da realidade se quer abstrair para a construção de um modelo *versus* a capacidade de resolução do cenário descrito (BERTRAND; FRANSOO, 2002). Isto causa dois pontos de atenção para se evitar:

- Grandes abstrações da realidade com muitas simplificações fazem com que o modelo não seja representativo, não tendo relevância;
- Modelos construídos com muita riqueza de detalhes e representações fazem com que a otimização seja muito onerosa do ponto de vista computacional, podendo até mesmo ser impossível de solução.

Assim sendo, há de se conciliar essa questão ao longo do trabalho, principalmente para garantir que haja contribuição teórica, ao mesmo tempo que também há de se garantir que o modelo seja fidedigno e representativo, a fim de não ser meramente uma análise longínqua da realidade.

Outro ponto interessante de se evidenciar é o de que, dentro do problema foco do estudo, há o apontamento de que há um *gap* de publicações que explorem aspectos de incerteza na demanda nos modelos estabelecidos de forma mais extensiva, com os atuais estudos usualmente abordando a variabilidade na demanda por meio do uso de simulação. Assim sendo, em termos tanto de rigor quanto de relevância, tal questão é importante tópico a ser explorado (ERHARD et al., 2018)<sup>1</sup>.

Ainda com relação às lacunas evidenciadas dentro da área de pesquisa, um ponto levantado por Wickert et al. (2021) é o da possibilidade de se desenvolver um modelo mais

---

<sup>1</sup>Segundo Erhard et al. (2018): “*Few publications handle this topic despite its considerable influence on the coverage of demand. Another opportunity for further research lies in the integration of stochastic demand patterns*”

geral de geração de escalas, que englobe restrições de distintas naturezas e, consequentemente, aumente a possibilidade de aplicação prática e adaptabilidade.

Isso se encontra em linha com pontos de integração para aumento da relevância levantados por Gulati (2007), em termos principalmente da motivação para a questão de pesquisa partir tanto de um *gap* da literatura quanto de uma demanda do mundo corporativo. Além disso, também há o aspecto de integração entre as áreas acadêmica e gerencial, uma vez que se torna possível explicar de maneira prática o modelo proposto e mostrar sua aplicabilidade em exemplos reais, ao mesmo tempo que mantém-se nítido seu rigor acadêmico.

## 1.4 Parcerias e Motivação

Para este trabalho em questão, há a parceria com médicos funcionários e coordenadores de equipes médicas das áreas de Ginecologia e Obstetrícia de uma organização hospitalar cujo principal hospital é localizado no bairro da Mooca - São Paulo (SP), a fim de tornar este estudo dentro da área de Pesquisa Operacional aplicável e fornecer informações que auxiliem na escolha da modelagem matemática, considerando as reais necessidades tanto do hospital quanto dos coordenadores e equipes médicas. Vale ressaltar que essas informações enriquecem consideravelmente o trabalho uma vez que será possível realizar uma comparação entre as modelagens propostas de maneira teórica e limitações pontuais dentro da realidade de gestão de grupos médicos.

Como motivadores adicionais, têm-se os fatores de maximização da satisfação dos trabalhadores, potencializando implicitamente um melhor serviço prestado e de evidenciar que a utilização da Pesquisa Operacional e conceitos de Engenharia de Produção podem auxiliar em questões de gestão em ambientes hospitalares, resolvendo um problema real, mensurável, aprimorável e potencialmente adaptável para realidades de outras organizações médicas.

Por fim, se encontra como uma motivação do ponto de vista acadêmico a continuação da exploração dentro do tema de apoio aos gestores por meio da criação de Escalas de Trabalho, tanto por aproximar os universos acadêmico e gerencial quanto por expandir o conhecimento em termos do estabelecimento de modelos que possuam capacidade de aplicabilidade para diversas realidades médicas considerando contextos similares. Por meio de considerações acerca da flutuação de demanda, abordagens de Programação Estocástica também são possibilidades de exploração com grande valor acadêmico que motivam o

desenvolvimento do trabalho.

## 1.5 Contribuições do Trabalho

Este trabalho tem, portanto, como principais contribuições:

- a) Elaborar modelagem matemática determinística compacta utilizando-se da Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o PGETM, a fim de auxiliar na satisfação dos colaboradores e potencialmente melhorar a atuação do serviço da equipe como um todo;
- b) Incorporar conceitos de métodos de decisão multicritério para lidar com os múltiplos objetivos desejáveis do problema em questão;
- c) Estender o modelo matemático determinístico por meio da incorporação de aspectos de incerteza, utilizando-se da Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso a fim de retratar de maneira mais fidedigna cenários nos quais não se há certeza, a priori, na demanda por médicos;
- d) Estabelecer uma estratégia para lidar com a incorporação de incertezas que seja adaptável para outras realidades médicas de complexidade compatível, a fim de que haja possibilidade de extensão dos conhecimentos gerados ao longo do trabalho apresentado;
- e) Realizar, por meio de dados reais e realistas, a verificação de eficácia com os modelos propostos, para averiguar quais as soluções ótimas de acordo com o conjunto de restrições consideradas, para que isso possa servir de *insight* para que o gestor da área médica possa ter novas ideias sobre a maneira de organização e divisão de seu grupo;
- f) Realizar, por meio de testes computacionais, a verificação de eficiência com os modelos propostos, a fim de averiguar se a estrutura do problema em termos de conjuntos, variáveis e restrições é capaz de oferecer boas soluções, mesmo para cenários mais complexos, com tempos satisfatórios.

## 1.6 Estrutura do Trabalho

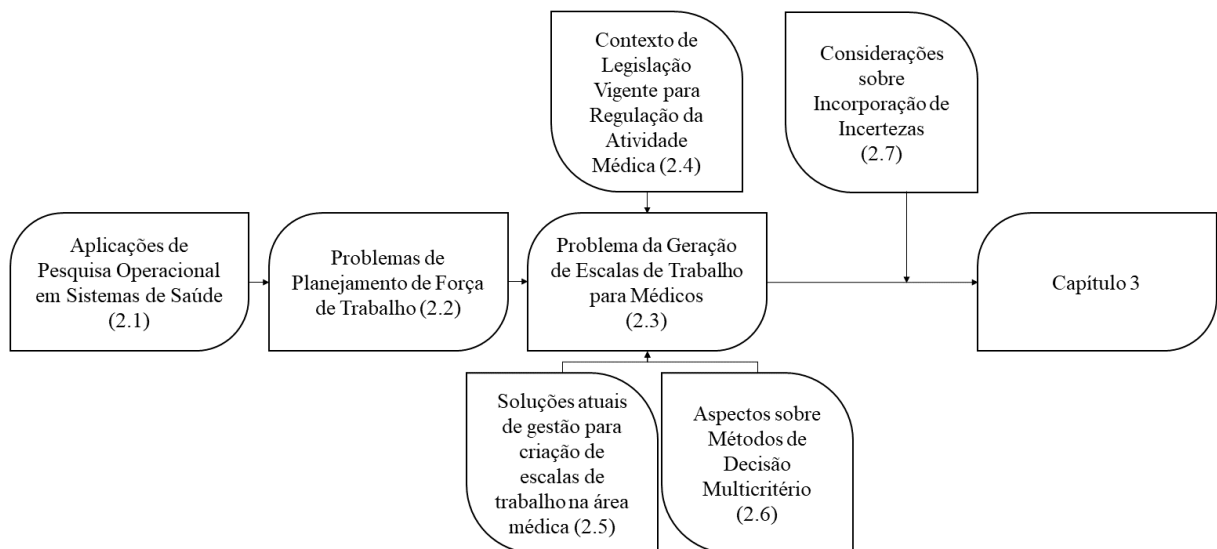
Este trabalho é composto dos seguintes seis capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução – Apresentação inicial da temática do trabalho, motivações e objetivos (gerenciais e acadêmicos), além de trazer prévia da estrutura que o compõe;
- Capítulo 2 – Fundamentação Teórica – Considerações relevantes para base da modelagem, abrangendo desde temáticas amplas de Pesquisa Operacional em Sistemas de Saúde até chegar ao problema específico desta obra e abordagens que incorporem incertezas dentro de Otimização;
- Capítulo 3 – Descrição do Problema – Explicitação e definição das especificidades do Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos deste trabalho;
- Capítulo 4 – Modelagem Matemática – Elaboração de modelos matemáticos determinístico e estocástico para descrever o problema, definindo variáveis, parâmetros, conjuntos utilizados, funções objetivo e restrições, tal como premissas adotadas no modelo estocástico para elaboração de seu equivalente determinístico;
- Capítulo 5 – Resultados e Discussão – Apresentação e análise dos resultados das abordagens desenvolvidas e comparação com as soluções atualmente utilizadas pelos coordenadores de equipes médicas que auxiliaram no estudo de caso, além de verificação de tempos computacionais em função do aumento da complexidade de cenários gerados e levantamento de resultados relevantes no que concerne a incorporação de incertezas;
- Capítulo 6 – Conclusões e Perspectivas Futuras – Fechamento dos elementos textuais, com considerações dos objetivos alcançados e apontamentos de focos de estudo relacionados ao trabalho que podem ser explorados em outros estudos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é dado foco na discussão de estudos com temática relacionada à área de saúde dentro da Pesquisa Operacional, abrangendo desde temas amplos até focalizar na geração de escalas de trabalho para profissionais da área médica. Além disso, são trazidas seções de apoio nas áreas jurídica, gerencial e de considerações sobre decisões com múltiplos critérios, que servirão de auxílio para a definição do modelo matemático determinístico do trabalho. Por fim, fazem-se considerações sobre incorporação de incertezas, com foco em Programação Estocástica. Com isso, prepara-se todo o referencial para a descrição do problema específico deste trabalho. A Figura 1 traz de forma esquemática a relação dos assuntos tratados no capítulo, com suas respectivas seções.

Figura 1: Esquematização do Capítulo 2.

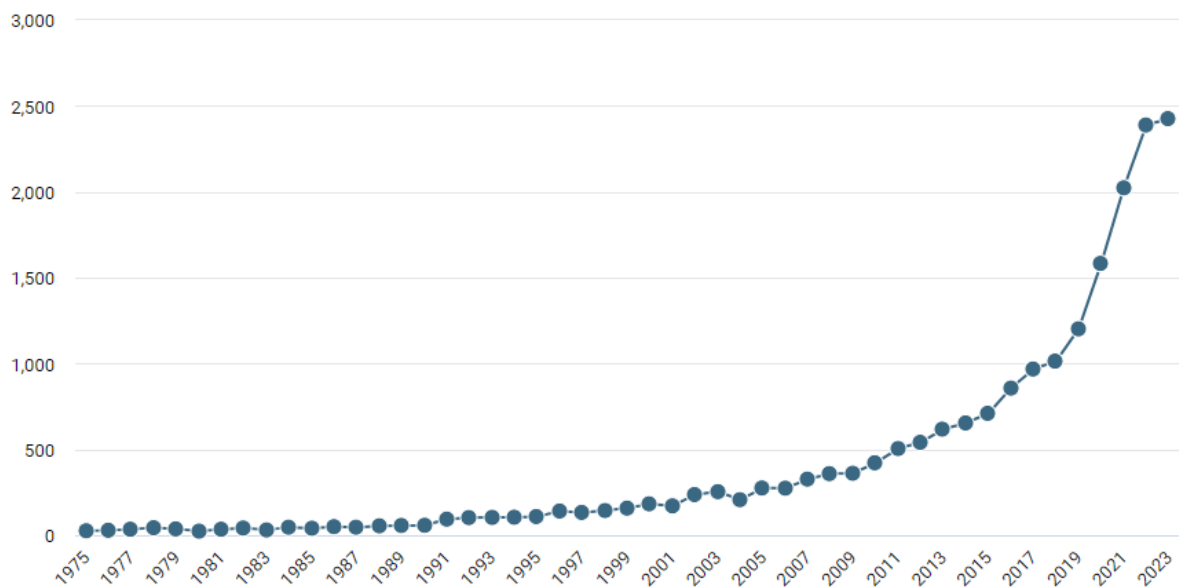


Fonte: O autor.

## 2.1 Aplicações de Pesquisa Operacional em Sistemas de Saúde

Conforme discutido na introdução, apesar de, desde a década de 50, haver publicações de Pesquisa Operacional relacionadas à área de saúde, em anos recentes, houve grande aumento desse número devido à observação de benéficos resultados em termos de melhorias na área (ROYSTON, 2009). A Figura 2 traz gráfico com levantamento de publicações nessa temática entre os anos de 1975 e 2023, na plataforma Dimensions.ai (2024). A partir disso, tornam-se claros tanto a tendência de grande aumento no número de publicações observadas quanto o fato de que a temática já tem relevância desde longa data, em linha com o que se observa em Royston (2009).

Figura 2: Número de publicações de Pesquisa Operacional relacionadas à temática de saúde por ano.



Fonte: Dimensions.ai (2024).

A principal diferença entre os trabalhos de Pesquisa Operacional na área da saúde em relação aos estudos aplicados em outros tipos de segmentos é o fato de que há diversas circunstâncias sempre presentes, como probabilidade de morte, possibilidade de melhoria na qualidade de vida dos pacientes, preocupação com qualidade dos trabalhadores e equipamentos, e dimensionamento de maquinário e força de trabalho (PIERSKALLA; BRAILER, 1994).

Dentre os temas de maior relevância acadêmica relacionados a estudos dentro dessa

área em período recente, encontram-se os seguintes, categorizados dentro de três macrotemas a fim de facilitação de organização (RAIS; VIANA, 2010; PIERSKALLA; BRAILER, 1994):

- Macrotema de planejamento e estratégia - decisões de horizonte mais longo, buscando entendimento melhor do conjunto de pacientes a serem atendidos, localização e capacidade (número de salas de cada tipo de procedimento e quantidade de leitos). Apresentam importância principalmente devido à limitação de recursos, à vontade de maximizar a satisfação dos pacientes e ao aumento da complexidade das organizações hospitalares (PERERA; PEIRO, 2012).
  - Previsão de demanda, a fim de orientar as demais decisões estratégicas de uma organização de saúde, por meio de modelagens matemáticas como utilização de média móvel ou consideração de tendências e sazonalidades de acordo com o setor considerado. Exemplo de estudo é apresentado por Cote e Tucker (2001), ao comparar quatro métodos de se realizar previsão de demanda, com as devidas vantagens e desvantagens.
  - Problema de localização, considerando tanto a quantidade de centros de tratamento quanto o posicionamento desses centros, a fim de otimizar a máxima cobertura de regiões e o menor deslocamento de pacientes, de profissionais da área de saúde e de equipamentos hospitalares. Exemplo de estudo é apresentado por Or e Pierskalla (1979), ao discutir sobre modelagem para determinação de posicionamento de bancos de sangue.
  - Planejamento de capacidade em organizações hospitalares, considerando decisões estratégicas como qual deve ser o número de pacientes que podem ser atendidos simultaneamente, o tempo médio de espera em fila de acordo com o grau de severidade da doença, a utilização média dos profissionais da área de saúde e a quantidade de equipamentos existentes para cada operação. Exemplo de estudo é apresentado por Isken (2002), trazendo considerações sobre o número de leitos necessários com base em simulação de demanda.
  - Utilização de programação linear para diagnóstico de doenças, aumentando a eficácia dos diagnósticos e prognósticos. Exemplo de estudo é Mangasarian, Street e Wolberg (1995), baseando-se em uma ferramenta desenvolvida e validada para auxiliar na detecção de câncer de pulmão em pacientes de hospitais da Universidade de Wisconsin.



- Macrotema de procedimentos e prevenção na área de saúde - relacionado principalmente aos temas de determinação de diagnóstico, de tratamento e de maneiras de prevenir doenças. Geralmente trata de temas no nível operacional (RAIS; VIANA, 2010).
  - Auxílio no planejamento de tratamentos, com base na minimização do desvio da dose de exposição de tecidos em tratamentos intensivos de radioterapia. Exemplo de estudo neste tema é Freitas et al. (2020), tratando de resolução de problemas com o uso de meta-heurísticas e aplicando o modelo para auxílio na radioterapia.
  - Auxílio para decisão de doação e transplante de órgãos, alocando recursos a pacientes em filas de espera, de acordo com a urgência, disponibilidade e probabilidade de não rejeição, a fim de maximizar o bem-estar do receptor e o número de receptores. Exemplo de estudo no tema é Segev et al. (2005), com uso de metodologia para pareamento de pares doador-receptor para transplante de rins.
  - Problema da seleção de vacinas, considerando aspectos econômicos, principais patologias existentes e combinações de vacinas, a fim de se maximizar a quantidade de imunizados (caso governamental) ou maximizar a atração de mercado segundo o preço (caso de fabricantes de vacina). Exemplo de estudo é Weniger et al. (1998), trazendo programação linear para otimizar quais vacinas a serem fornecidas (por exemplo, pelo governo) com base em custos, probabilidades de certas doenças e severidade delas.
- Macrotema de gestão operacional e logística - maior dos macrotemas apresentados em termos de relevância acadêmica e número de publicações, caracterizado por modelagens matemáticas a fim de otimizar a gestão de atendimentos, de estoques, de informação e de utilização de recursos como equipamentos, salas e funcionários (PIERSKALLA; BRAILER, 1994).
  - Problema de gestão de salas operatórias e especialistas, tratando tanto de cirurgias eletivas quanto de emergenciais, envolvendo aspectos de balanceamento de carga de trabalho e disponibilidade de salas operatórias. Exemplo de estudo no tema é Devesse et al. (2023), com modelagem de programação quadrática de custos e aproximações lineares a fim de minimizar tais custos, por exemplo, o de horas extras.
  - Otimização de dimensionamento de estoques, considerando a importância de

- determinados produtos, tal como o nível de serviço desejado, tempo de reposição, espaço ocupado e previsão de demanda calculada, assim resultando no ponto ótimo de estoque de segurança a se ter. Caunhye, Nie e Pokharel (2012) apresentam estudo de revisão sobre trabalhos relacionados a esse tema.
- Programação de consultas e procedimentos, envolvendo a melhor sequência de pacientes a serem atendidos dentro de cada especialidade médica a fim de maximizar a satisfação do paciente, diminuindo tempo de espera. Exemplo de estudo no tema é dado por Garg et al. (2012), buscando minimização do tempo de estadia de pacientes em determinado hospital.
  - Problema de roteamento e agendamento de atendimento de saúde em domicílio, definido como um caso particular do problema de roteamento de veículos (LAPORTE, 1992), no qual um conjunto de pacientes se encontra espalhado em área geográfica, com necessidades de serviços de cuidados médicos, como exemplo, visitas em domicílio, e precisam ser visitados por um profissional dessa área. Como complicadores, há restrições de continuidade de cuidados, implicando em quantidade restrita de cuidadores que podem atender cada paciente, dependências temporais, restrições impostas pelo paciente por características de afinidade e restrições de conjunto de habilidades dos médicos envolvidos nos serviços (CISSÉ et al., 2017).
  - Apoio a decisões em cadeias de suprimento, por meio de modelos que se assemelham a um problema de transbordo, no qual têm-se pontos de suprimento (que apenas podem enviar recursos), pontos de demanda (que apenas recebem recursos) e pontos de transbordo (que tem dupla atuação) (WINSTON; GOLDBERG, 2004). Exemplo de estudo no tema é dado por Hamdan e Diabat (2020), com modelagem buscando maneira ótima de *design* de cadeias de suprimento de sangue para conseguir absorver impactos de desastres como furacões, tornados, terremotos, guerras, pandemias e enchentes, otimizando o tempo de entrega para áreas necessitadas e considerando a variabilidade da doação de sangue durante esses períodos e minimizando custos.
  - Temática relacionada a problemas de planejamento de força de trabalho, tratando da melhor alocação e dimensionamento de equipes a fim de se realizarem tarefas específicas relacionadas a sistemas de saúde (BRUECKER et al., 2015). Por ser foco deste presente trabalho, dar-se-á maior evidência a esse tema na próxima seção do capítulo, apresentando diferentes estudos e particularidades dessa área. A Tabela 1 consolida as considerações acerca da seção em questão.

Tabela 1: Consolidação esquemática de trabalhos de PO na área de saúde.

Macrotema	Temáticas envolvidas	Exemplo de estudo sobre a temática
Planejamento e estratégia	Previsão de demanda	Cote e Tucker (2001)
	Problema de localização	Or e Pierskalla (1979)
	Planejamento de capacidade	Isken (2002)
	Diagnósticos de doenças	Mangasarian, Street e Wolberg (1995)
Procedimentos e prevenção	Planejamento de tratamento	Freitas et al. (2020)
	Decisão de doação e transplante de órgãos	Segev et al. (2005)
	Seleção de vacinas	Weniger et al. (1998)
Gestão operacional e logística	Gestão de salas operatórias e de especialistas	Devesse et al. (2023)
	Otimização de dimensionamento de estoques	Caunhye, Nie e Pokharel (2012)
	Programação de consultas e procedimentos	Garg et al. (2012)
	Apoio a decisões em cadeias de suprimentos	Hamdan e Diabat (2020)
	Planejamento de força de trabalho	Bruecker et al. (2015)

Fonte: O autor.

## 2.2 Planejamento de Força de Trabalho

A temática abordada neste trabalho é um caso particular, aplicado à área médica, de um dos problemas tratados no tema de Planejamento de Força de Trabalho<sup>1</sup>, de modo que é interessante apresentar inicialmente as definições e motivações do caso mais geral para posteriormente discutir as especificidades e aplicações dentro de organizações hospitalares, particularizando até chegar ao Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos (PGETM), o qual será o ponto focal deste estudo.

A motivação de se realizarem estudos nessa área se dá principalmente por fatores econômicos, como a existência de limitação de recursos por parte das organizações e busca por máxima competitividade, obtida pela otimização de decisões gerenciais nessa área. Uma pequena redução nos custos com mão de obra pode ser decisiva para a longevidade de uma organização (BERGH et al., 2013). Além disso, preocupações com um bom nível de serviço e o fato de que a complexidade de decisões gerenciais sobre o assunto aumenta vertiginosamente quando se aumentam o conjunto de atividades a serem exercidas e requisitos de habilidade, são fatores que também motivam a produção acadêmica nessa área (BRUECKER et al., 2015).

Em termos de gestão, o Planejamento de Força de Trabalho se insere na esfera de gestão de recursos humanos e melhoria contínua, possuindo suporte em *softwares* de Planejamento de Recursos da Empresa<sup>2</sup> e considerando principalmente os seguintes fatores (ANDERSON, 2004):

<sup>1</sup>Tradução para o termo *Workforce Planning*.

<sup>2</sup>Tradução para o termo *Enterprise Resource Planning*.

- Entendimento do perfil dos trabalhadores atuais da organização, potencial de crescimento e aprimoramento de habilidades e de maturidade;
- Previsão das necessidades futuras considerando o ecossistema no qual a empresa se insere;
- Identificação de *core competences* e estratégias a serem aprimoradas e desenvolvidas;
- Alinhamento dos interesses da organização com os funcionários, a fim de aumento de engajamento e melhoria de comunicação;
- Conversão das estratégias em contratações, demissões e treinamentos a serem realizados.

A Figura 3 retrata, do ponto de vista gerencial, a aplicabilidade do Planejamento de Força de Trabalho e sua inserção no contexto de melhoria contínua em uma organização (COTTEN, 2007).

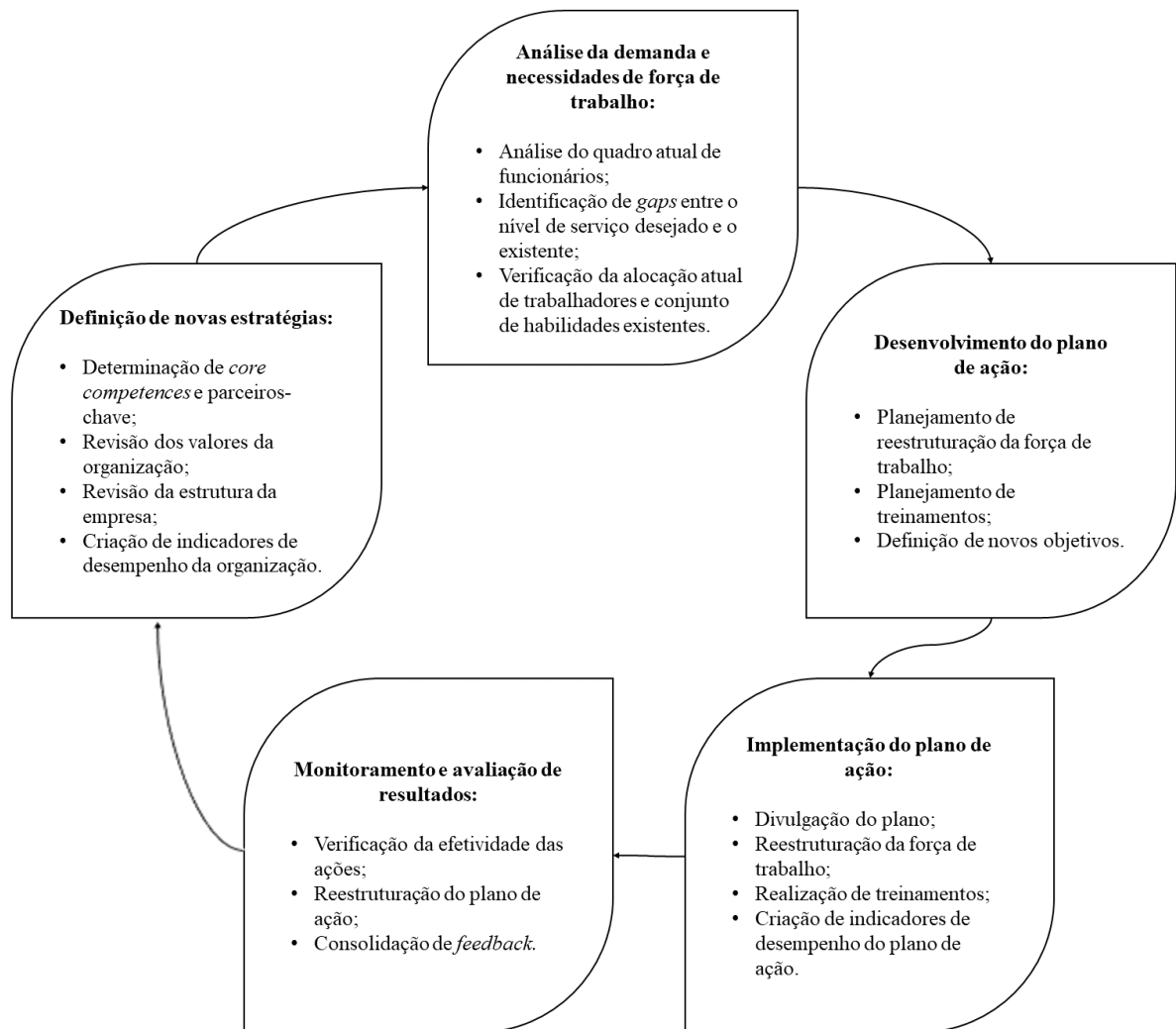
Com relação ao objeto de estudo para a Pesquisa Operacional, tem-se o foco em dois aspectos: a Determinação do Contingente de Trabalho<sup>3</sup> e a Alocação de Funcionários<sup>4</sup> (BRUECKER et al., 2015). O primeiro aspecto trata da decisão estratégica do tamanho e composição da equipe de trabalho, geralmente com foco em grandes horizontes temporais. Já o segundo trata da determinação de turnos de trabalho de cada profissional, pressupondo determinação temporal e conjunto de atividades a serem executadas, geralmente com foco em horizontes menores de tempo, como semanas ou meses. Apesar de serem potencialmente tratados de forma conjunta, esses dois aspectos são independentes, cada qual com suas particularidades na modelagem e utilidade para apoio em decisões gerenciais (BELIËN et al., 2013).

---

<sup>3</sup>Tradução para o termo *Staffing*.

<sup>4</sup>Tradução para os termos *Scheduling/Rostering*.

Figura 3: Diagrama de Planejamento de Força de Trabalho.



Fonte: Cotten (2007) p.54.

Tabela 2: Relação entre temáticas que compõem o Planejamento de Força de Trabalho.

Foco	Nível de atuação	Horizonte temporal
Determinação de Contingente de Trabalho	Estratégico	Semestres/Anos
Alocação de Funcionários*	Tático	Semanas/Meses
Realocação Ocasional de Turnos	Operacional	Horas/Dias

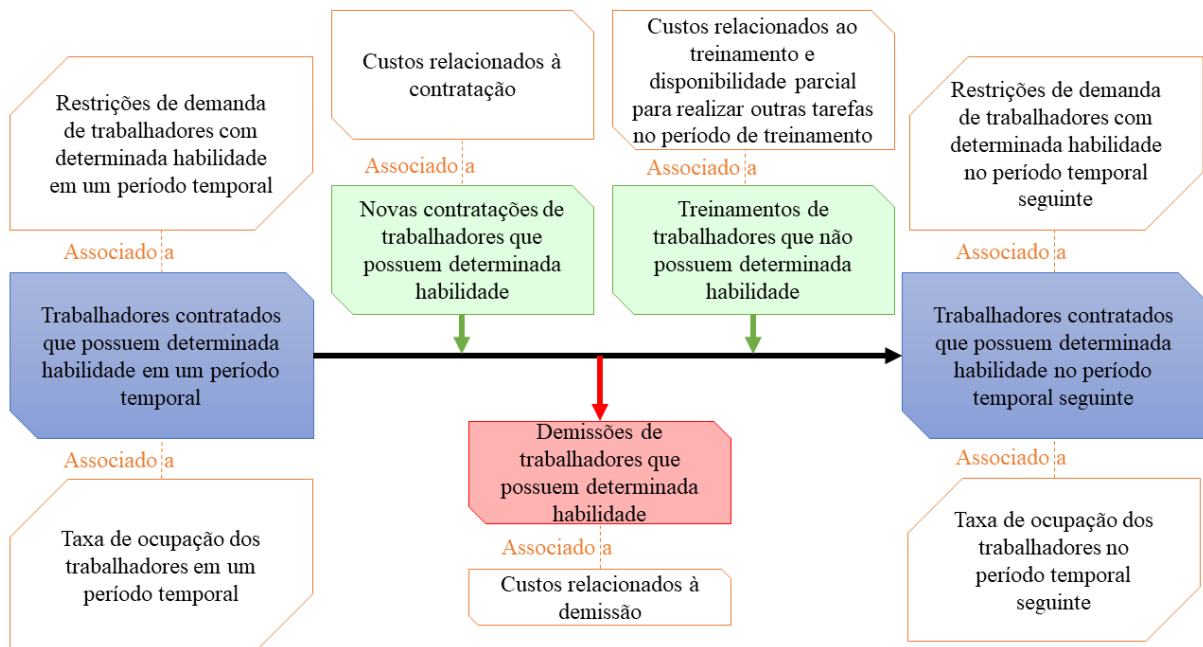
Fonte: Mundschenk e Drexel (2007).

Com a finalidade de manter a clareza e concisão deste trabalho, serão enfatizadas apenas as duas primeiras temáticas, e considerações acerca de realocações serão, se necessário, tratadas junto com a criação de turnos de trabalho. As duas próximas subseções têm por objetivo apresentar as peculiaridades desses dois problemas, como também as considerações sobre a modelagem geral e aplicabilidade.

### 2.2.1 Problema de Determinação do Contingente de Trabalho (PDCT)

Conforme mencionado previamente, o PDCT trata da decisão estratégica de contratações, demissões, gestão de funcionários e aprimoramento de habilidades via treinamento ou *job rotation*, a fim de otimizar o dimensionamento do quadro de funcionários de uma organização para que todas as atividades necessárias sejam realizadas com um bom desempenho (BRUECKER et al., 2015). Uma esquematização simplificada das considerações que guiam a definição do problema é apresentada na Figura 4, com as interações entre variáveis e restrições, evidenciando o fluxo de informações relevantes.

Figura 4: Esquematização do PDCT.



Fonte: O autor.

Em termos de modelagem genérica do problema, estudos mais recentes da literatura

\*Assunto abordado nesta dissertação.

trazem modelos de programação linear inteira mista considerando aspectos econômicos de contratação, demissão, níveis de habilidade para cada necessidade de atividade e tempo de treinamento para aprimoramento dessas habilidades, buscando minimização de custos, sujeito a restrições de demanda e requisitos de habilidade para desempenho das atividades a cada período definido (WIROJANAGUD et al., 2007). As decisões giram em torno de quantos trabalhadores devem ser contratados, demitidos, treinados para aprimoramento de habilidades a cada período de tempo. Para finalidades de ilustração do problema, encontra-se, no Apêndice A, um modelo que traduz a situação apresentada, desenvolvida no contexto de sistemas de manufatura.

Por fim, como aplicabilidade de modelos de PDCT, a título de ilustração e revisão da literatura sobre o problema, têm-se as publicações nas seguintes áreas:

- PDCT aplicado a indústria de impressões – artigo de Mundschenk e Drexl (2007) que trata de caso prático na Alemanha sobre o setor de impressões de uma organização, minimizando custo total anual com salários, sujeito à satisfação da demanda de diversas atividades a serem realizadas. O estudo aborda que nem todo trabalhador sabe realizar todas as atividades e há um diferencial no salário caso o trabalhador faça mais de um tipo de tarefa. Não há, porém, consideração do nível de habilidade do trabalhador em cada uma dessas tarefas, simplificando o modelo;
- PDCT aplicado a *call centers* – publicação de Atlason, Epelman e Henderson (2008) que envolve modelo tratando de minimização de custo total associado à alocação de atendentes dessa área em diferentes períodos temporais, sujeito a satisfazer o nível de serviço do atendimento em cada um dos períodos temporais. O nível de serviço é tratado como variável associada ao tempo máximo que se deseja para a finalização de ao menos 80% das ligações realizadas, que pode variar de acordo com o horário, dia da semana e se é ou não feriado, por exemplo;
- PDCT aplicado a projetos de desenvolvimento de *software* – estudo de Barreto, Barros e Werner (2008) que trata de dimensionamento de grupo de programadores de *software*, trabalhadores que possuem características peculiares que os diferenciam dos outros grupos anteriormente citados, uma vez que há uma flexibilidade e rotatividade maior nessa atividade. O modelo trazido nesse estudo traz diferentes opções de função objetivo, observando as alterações em soluções factíveis de acordo com a escolha feita da função, como exemplo, a minimização de custo total com salário no período de desenvolvimento, a máxima qualificação da equipe, o menor tempo para finalização de um projeto ou o máximo balanceamento de habilidades

dentro de membros da equipe. No estudo, restrições consideram que cada tarefa a ser realizada e cada programador tem um determinado nível de habilidade, sendo que um trabalhador só pode ser alocado para uma tarefa caso tenha, no mínimo, o nível de habilidade que a tarefa requer;

- PDCT aplicado à área da saúde – aproximando-se mais da temática deste trabalho, a aplicação desse problema em sistemas de saúde é bastante rica, uma vez que tem-se correlação entre a quantidade de profissionais da saúde contratados, nível de serviço e menor taxa de mortalidade dentro de organizações hospitalares (WEST et al., 2014). Como exemplos de estudos e peculiaridades de cada um, têm-se os seguintes:
  - Modelagem do PDCT na área de enfermagem considerando contratações de período integral, meio-período, diferentes habilidades/especializações e possibilidade de horas extras para trabalhadores de período integral, sujeito a restrições de demanda de cuidado de cada paciente, considerando diferentes necessidades de cuidado (BRUSCO; SHOWALTER, 1993).
  - Aplicação de modelagem matemática do PDCT para determinação de número ideal de enfermeiros de dois hospitais brasileiros e criação de *software* de apoio associado ao modelo. A publicação traz considerações de legislação local e de importância e benefícios de se ter uma margem para satisfação da demanda e garantia de boa qualidade de serviço prestado (RESPICIO et al., 2018).
  - Dimensionamento de médicos considerando abstenções e demanda como variáveis probabilísticas, em contraposição à aplicação de modelos determinísticos. A temática aborda a minimização do custo de contratação de profissionais adicionais temporários considerando ganhos potenciais, que são trazidos por se ter maior força de trabalho disponível, associados à probabilidade de serem necessários para atender a demanda (RYU; JIANG, 2022). É interessante notar a possibilidade de tratar o assunto de dimensionamento de força de trabalho junto à programação estocástica, uma vez que a incerteza de fato permeia essas decisões.

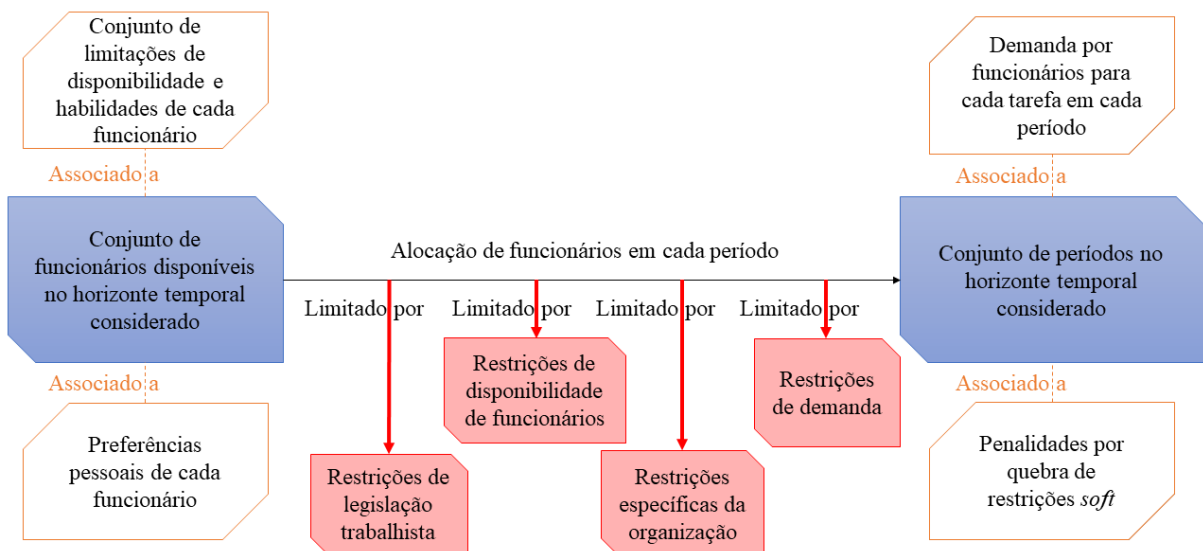
Como comentário do PDCT, é interessante notar que simplificações ou mesmo casos de pouca complexidade (em termos de números de trabalhadores, demanda e períodos temporais considerados) podem ser resolvidos com técnicas de programação inteira e métodos heurísticos (FOWLER; WIROJANAGUD; GEL, 2008).



## 2.2.2 Problema da Alocação de Funcionários (PAF)

Conforme introduzido anteriormente, a temática do PAF está inserida no nível tático, com decisões que impactam semanas ou meses, no que diz respeito à criação de turnos de trabalho e à alocação temporal de funcionários dentro desses. O problema trata de satisfazer restrições de necessidade de cumprimento da demanda em cada um desses períodos e restrições relacionadas a aspectos legislatórios e específicos de acordo com cada tipo de organização, além de buscar a máxima satisfação de funcionários com relação aos turnos gerados, o que faz com que, dependendo do ramo da organização, a modelagem apresente particularidades em relação a um modelo geral do problema (ERNST et al., 2004b). Tal modelo geral basicamente busca garantir a alocação de funcionários em cada período temporal, sujeito a restrições que variam conforme legislação e contexto organizacional. Ressalta-se que há o pressuposto de que a organização já tenha o conjunto de trabalhadores contratados definido, processo esse tratado na última subseção. A Figura 5 apresenta esquematização simplificada dos atributos que guiam o modelo genérico do PAF.

Figura 5: Esquematização do Problema de Alocação de Funcionários.



Fonte: O autor.

Vale como adendo, uma vez que se menciona pela primeira vez neste presente trabalho, definir a diferença entre restrições *hard* e *soft*. A primeira é caracterizada pelo seu caráter mandatório, de modo que a não satisfação de uma restrição desse tipo implica

infectibilidade da solução. Já a segunda é caracterizada não por gerar infectibilidade, mas por associar uma penalidade ao seu não cumprimento, de forma que o objetivo busque minimizar essas penalidades associadas.

Por ser um problema bem amplo, diversas divisões de classificação para o PAF são possíveis de acordo com o foco que se quer fornecer ao se tratar do assunto. Nas publicações de revisão de Bergh et al. (2013), Ernst et al. (2004a) e Ernst et al. (2004b), as seguintes divisões de classificação são trazidas:

- a) Divisão segundo tipo de atividade - criando quatro categorias ligadas ao fato das atividades terem características de serem:
  - Previamente planejadas, como em hospitais e centros policiais;
  - Dependentes de flutuação de demanda, como em centros de distribuição e serviço de atendimento a clientes;
  - Centradas em mobilidade, como em transportadores de carga;
  - Centradas em projeto, como em consultorias e desenvolvimento de *softwares*.
- b) Divisão segundo características dos funcionários e tipos de turno - diferenciando problemas que envolvem trabalhadores de meio período e turnos de estabelecimentos que devem funcionar de forma contínua, por exemplo;
- c) Divisão segundo conjunto de restrições abordadas - relacionando com amplo conjunto de restrições do tipo *hard* e *soft* para o enriquecimento do modelo e aproximação da realidade;
- d) Divisão segundo métodos de solução empregados - variando desde programação linear e inteira até heurísticas e simulações;
- e) Divisão segundo área de aplicação - levando em conta peculiaridades com relação às áreas de atuação como vendas, *call centers*, aviação e área médica, por exemplo.

Em termos de modelagem genérica, sem inclusão de restrições específicas do tipo de organização, tem-se na literatura exemplo de modelo proposto por Smet et al. (2016), considerando divisão do horizonte de planejamento em diversos sub-períodos, disponibilidade parcial de trabalhadores, satisfação da demanda e incorporação de penalidades associadas ao custo de alocação de um funcionário para determinada tarefa em determinado turno. Com finalidade de máxima clareza do texto, tal modelo encontra-se no Apêndice B.

Uma vez que a finalidade deste trabalho é tratar um caso particular de PAF aplicado à área médica, adotar-se-á a classificação e) (mencionada anteriormente), utilizada também por Bergh et al. (2013), ideal para discutir diferenças na construção do modelo e incorporação de restrições de acordo com o segmento considerado. Assim como feito na subseção anterior, escolheu-se por apresentar estudos para demonstrar a peculiaridade de alguns desses segmentos, até se chegar às áreas mais próximas do presente trabalho (médicos/enfermeiros). Além da área foco, foram observadas as áreas de *call centers*, vendas e manufatura, por apresentarem diferenças interessantes a serem discutidas.

Dentro do segmento de *call centers*, há a incorporação de modelo de previsão de demanda e busca por manutenção de mínimo nível de serviço, considerando a variabilidade tanto da disponibilidade de funcionários quanto do tempo esperado para um atendimento, além do tempo esperado máximo no qual um cliente espera na fila até que desligue a ligação. O modelo contempla minimização de custos, sujeito ao atendimento da demanda, considerando o nível de serviço desejado e restrições trabalhistas, de habilidades e de disponibilidade dos trabalhadores (AVRAMIDIS et al., 2010).

Dentro do segmento de vendas, há a incorporação de modelos de previsão não de demanda, mas sim de receita gerada, fator influenciado pelo número de funcionários alocados, tráfego de clientes no interior da loja e propensão a compras (por exemplo, em feriados comemorativos, há maior propensão). A função objetivo desse modelo trata da maximização de receita, com restrições de legislação trabalhista e de requisitos de habilidades e disponibilidade dos trabalhadores (CHAPADOS; JOLIVEAU; ROUSSEAU, 2011).

Dentro da área de manufatura, na publicação de Azmat, Hürlimann e Widmer (2004), são apresentadas restrições mais específicas de legislação de máximo de horas possíveis de trabalho, máximo número de horas extras e incorporação de feriados e férias de ao menos 15 dias. Além disso, a função objetivo difere das anteriores por não se preocupar diretamente com quantias financeiras, mas sim com o máximo balanceamento de carga total entre os trabalhadores. Outra diferença observada foi o horizonte de planejamento de um ano, consideravelmente superior ao usual para o PAF.

Finalmente, para a área de saúde, um caso específico do PAF é o PGETM, foco deste trabalho, que será devidamente definido e especificado na próxima seção. Para se ter uma dimensão da importância desse assunto, a Tabela 3, feita a partir da revisão de Bergh et al. (2013), apresenta a proporção das diversas áreas de aplicação das publicações levantadas nessa revisão. Observa-se que 26% dos estudos tratam do assunto, sendo o de

maior número de publicações dentro do tema, com mais do que o dobro de publicações do que o segundo maior.

Tabela 3: Contabilização de estudos na temática de Alocação de Funcionários.

Área de aplicação	Publicações revisadas	Porcentagem
Médicos/Enfermeiros	64	26%
Serviços em geral	25	10%
Modelagem em geral	25	10%
Manufatura	24	10%
Outros na área de saúde	23	9%
<i>Call centers</i>	22	9%
Transportes - aviação	16	7%
Outros	13	5%
Transportes em geral	10	4%
Transportes - ferroviário	6	2%
Proteção/Emergência	6	2%
Vendas	5	2%
Militar	4	2%
Transportes - ônibus	2	1%
<b>Total</b>	<b>245</b>	<b>100%</b>

Fonte: Bergh et al. (2013).

## 2.3 Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos (PGETM)

O Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos, conforme mencionado na seção anterior, tem enorme relevância dentro do Planejamento de Força de Trabalho, principalmente pela preocupação com a retenção de profissionais na área, melhoria da percepção de qualidade do serviço por parte dos clientes, e auxílio à gerência na medida em que grande parte dos turnos de trabalho são gerados manualmente pelos gestores e a primeira solução manual encontrada é em geral adotada sem garantia de otimalidade (BURKE et al., 2004).

Torna-se importante uma consideração inicial sobre as diversas classificações dentro dessa área, na medida em que diversos autores fazem a distinção entre o Problema de

Alocação de Médicos (PAM)<sup>5</sup> e o Problema da Alocação de Enfermeiros (PAE)<sup>6</sup>. Tal divisão se dá principalmente por considerar que os turnos de médicos estão limitados por questões mais de preferência pessoal, enquanto que os turnos de enfermeiros são mais sujeitos a resoluções que valem para o grupo como um todo. Além disso, a divisão também se dá por ter-se usualmente mais restrições *soft* em estudos com médicos (GUNAWAN; LAU, 2013).

Apesar disso, encontram-se diversos estudos dentro da área de enfermagem com considerações de preferência pessoal de trabalhadores e grande conjunto de restrições presentes (BURKE et al., 2004), além de existirem estudos com foco no planejamento de médicos que consideram os temas similares a ponto de serem revisados de maneira conjunta ao planejamento de enfermeiros, ou de possuírem grande parte de suas restrições em comum (ERHARD et al., 2018; WICKERT et al., 2021).

Embora este trabalho se concentre na alocação de médicos, uma vez postos os argumentos anteriores, e considerando que a temática aplicada à enfermagem tem uma quantidade muito maior de publicações e estudos de revisão, conforme citado por Gunawan e Lau (2013), até mesmo já havendo propostas mais sólidas de categorização de problemas em estudo de Causmaecker e Berghe (2011), optou-se, com o objetivo de completude do trabalho, por tratar aspectos tanto do planejamento de enfermeiros quanto de médicos nesta seção e na formulação do PGETM. Além disso, torna-se difícil apresentar modelagem matemática do problema em sua instância mais genérica, devido ao fato de que cada país e instituição médica têm diferentes conjuntos de legislação, de padrões culturais de trabalho e de definições de qualidade de serviço.

Ainda assim, há estudos que se dedicaram a modelar o problema de maneira genérica, apresentando basicamente uma estrutura na qual tem-se uma esquematização básica do problema e possibilidade de inclusão de mais restrições conforme houver necessidade, como visto em Wickert et al. (2021), e até mesmo múltiplas opções de função objetivo, como visto em Rousseau, Pesant e Gendreau (2002). Com a finalidade de manter boa coesão e evitar repetitividade, não se apresentará nesta seção modelagem genérica de PGETM, uma vez que o Capítulo 4 será destinado a tratar especificamente da sua modelagem.

Por questões de clareza, as Subseções 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 e 2.3.4 trazem considerações acerca das definições de variáveis, escolha de função objetivo, restrições mais usuais do PGETM e métodos de resolução, segundo estudos no tema elaborados por Cheang et al. (2003), Burke et al. (2004) e Erhard et al. (2018).

---

<sup>5</sup>Tradução para o termo *Physician Rostering Problem (PRP)*.

<sup>6</sup>Tradução para o termo *Nurse Rostering Problem (NRP)*.

### 2.3.1 Definições de Variáveis

Inicialmente, é importante realçar que o conjunto de variáveis é de suma importância para uma boa modelagem e que a motivação que guia a escolha de variáveis para o PGETM se dá, segundo Burke et al. (2004), pela consideração de cinco fatores decisórios:

- Alcance - quão diferentes são as soluções em relação ao desejado;
- Qualidade - quão bem balanceados estão as distribuições de trabalho e turnos indesejáveis;
- Precisão - com que frequência são necessárias mudanças em relação ao proposto;
- Flexibilidade - qual a facilidade de se realizarem mudanças extraordinárias na solução proposta;
- Custos - quais os gastos em termos gerenciais para que se criem os turnos.

Com relação à definição de variáveis e conjuntos a serem utilizados para um problema, tem-se usualmente duas possíveis abordagens: uma focada no profissional e outra focada no padrão de turnos (CHEANG et al., 2003).

Com relação à visão focada no profissional, as variáveis de decisão utilizadas se relacionam com o médico, dia e turno a ser alocado (se houver), podendo ser a variável inteira ou binária dependendo da formulação, conforme observa-se em (2.1) e (2.2), respectivamente (CHEANG et al., 2003):

$$x_{n,d} = \begin{cases} 0, & \text{caso o médico } n \text{ não trabalhe no dia } d \\ 1, & \text{caso o médico } n \text{ trabalhe no turno da manhã do dia } d \\ 2, & \text{caso o médico } n \text{ trabalhe no turno da tarde do dia } d \\ 3, & \text{caso o médico } n \text{ trabalhe no turno da noite do dia } d \end{cases} \quad (2.1)$$

$$x_{n,d,k} = \begin{cases} 0, & \text{caso o médico } n \text{ não trabalhe no turno } k \text{ do dia } d \\ 1, & \text{caso o médico } n \text{ trabalhe no turno } k \text{ do dia } d \end{cases} \quad (2.2)$$

$n \in N$ , sendo  $N$  o conjunto de médicos;

$d \in D$ , sendo  $D$  o conjunto de dias no horizonte de planejamento;

$k \in K$ , sendo  $K$  o conjunto de turnos.

Já para a visão focada em turnos, tem-se a determinação prévia de conjuntos de turnos estabelecidos (padrões) e apenas se alocam funcionários dentro desses padrões (BRUCKER; QU; BURKE, 2011). Assim sendo, a variável de decisão é do tipo binária, relacionando os trabalhadores e padrões, conforme visto em (2.3) (CHEANG et al., 2003).

$$x_{n,p} = \begin{cases} 0, & \text{caso o médico } n \text{ não trabalhe segundo o padrão } p \\ 1, & \text{caso o médico } n \text{ trabalhe segundo o padrão } p \end{cases} \quad (2.3)$$

$n \in N$ , sendo  $N$  conjunto de médicos;

$p \in P$ , sendo  $P$  o conjunto de padrões previamente decididos.

Vale o comentário de que esse tipo de definição não possibilita tanta flexibilidade ou incorporação de preferências dos trabalhadores quanto à definição que focaliza o funcionário na decisão. Ademais, o número de padrões envolvidos pode ser muito grande, por ser função do número de dias e número de turnos. Por fim, em todos os tipos de definição propostos, é possível a inclusão de mais subíndices dependendo da situação em questão, por exemplo, se o modelo contemplar mais de um local ou setor hospitalar.

### 2.3.2 Funções Objetivo e Tipos de Problema

Apesar de o PAF usualmente ter como objetivo a minimização de custos, diversas funções objetivo são possíveis para o PGETM, justamente pelas considerações de busca por nível de serviço, manutenção de bons funcionários e estratégia da gestão hospitalar. Há exemplos de trabalhos que visam benefícios puramente econômicos, como o estudo de Lan et al. (2022), que apresenta utilização de heurística e junção dos problemas de *planning* e *rostering*. Ainda assim, não necessariamente esse problema é modelado visando estritamente a redução de custos, mas abrindo a possibilidade para as seguintes necessidades potenciais (BURKE et al., 2004; CHEANG et al., 2003):

- Minimização do sub-atendimento da demanda;
- Minimização do desvio em relação ao atendimento da demanda;
- Minimização do número de funcionários;
- Minimização dos custos com mão de obra;
- Maximização do balanceamento da alocação de funcionários em turnos em finais de semana e feriados;

- Maximização do balanceamento da carga de trabalho entre funcionários;
- Maximização do atendimento das preferências de funcionários;
- Minimização da penalidade por quebra de restrições *soft*.

Com base na escolha da função objetivo e nos objetivos gerenciais do problema, pode-se modelar o PGETM de três maneiras distintas, a saber: Problema de Satisfação de Restrições<sup>7</sup>, Problema de Otimização<sup>8</sup> ou Problema de Otimização de Restrições<sup>9</sup> (CHEANG et al., 2003).

A abordagem como Problema de Satisfação de Restrições tem o enfoque em encontrar soluções factíveis para o problema, alterando as variáveis existentes dentro dos valores delimitados e a factibilidade estando sujeita à satisfação de todas as restrições impostas.

Já a abordagem como Problema de Otimização se relaciona mais com os objetivos de minimização ou maximização de fatores sem que haja restrições *soft* na modelagem, como a minimização do sub-atendimento da demanda ou a minimização do número de funcionários, por exemplo.

Finalmente, o Problema de Otimização de Restrições combina ambos os tipos anteriores, na medida em que têm-se restrições a serem satisfeitas, porém podem-se atribuir penalidades pela não satisfação de certas restrições e, assim, minimizar essas penalidades. Vale dizer que essa abordagem é especialmente interessante quando um problema possui grande número de restrições que são conflitantes entre si, como é o caso em situações da realidade hospitalar.

### 2.3.3 Restrições Contempladas

O aspecto principal que diferencia os estudos dentro do PGETM é o conjunto de restrições a serem abordadas, tal como a divisão entre quais dessas restrições serão *hard* e quais serão *soft*. Conforme já citado anteriormente, reitera-se que as restrições *hard* não podem ser descumpridas e as *soft* podem ser, porém havendo uma penalidade associada que deve ser levada em consideração na modelagem (BURKE et al., 2010).

Isso se relaciona bastante com os diferentes tipos de função objetivo abordados na subseção anterior, na medida em que problemas sem diferenciação de categoria entre

<sup>7</sup>Tradução para o termo *Constraint Satisfaction Problem*.

<sup>8</sup>Tradução para o termo *Optimization Problem*.

<sup>9</sup>Tradução para o termo *Constraint Satisfaction Optimization Problem*.



restrições não podem atribuir peso por quebra de restrições, e torna-se difícil realizar comparação entre duas soluções factíveis caso o problema seja um Problema de Satisfação de Restrições e não haja boa hierarquização da importância das restrições contempladas.

Assim, com base nos conjuntos mais usuais de restrições apresentados, tem-se a consolidação da Tabela 4, com exemplificação de estudos que mencionaram ou utilizaram as restrições listadas.

Tabela 4: Restrições usuais aplicáveis ao PGETM.

Nº	Restrição	Exemplo de estudo que menciona
1	Satisfação da demanda	Erhard et al. (2018)
2	Não simultaneidade de alocações	Erhard et al. (2018)
3	Descanso após turnos da noite	Erhard et al. (2018)
4	Descanso após certos padrões de turnos	Erhard et al. (2018)
5	Limite máximo de alocações em turnos da noite	Erhard et al. (2018)
6	Máximo de alocações no horizonte de planejamento	Erhard et al. (2018)
7	Mínimo de alocações no horizonte de planejamento	Erhard et al. (2018)
8	Estabilidade da rotina	Erhard et al. (2018)
9	Preferências pessoais	Erhard et al. (2018)
10	Limite máximo de dias seguidos de trabalho	Erhard et al. (2018)
11	Mínimo de finais de semana sem alocação	Erhard et al. (2018)
12	Mínimo de dias sem alocação após alocações em finais de semana	Erhard et al. (2018)
13	Alocações de tarefas intensivas	Erhard et al. (2018)
14	Máximo de alocação de turnos em um mesmo dia	Wickert et al. (2021)
15	Máximo número de funcionários alocados para um turno	Wickert et al. (2021)
16	Satisfação de desejos de folgas	Wickert et al. (2021)
17	Habilidade mínima para realização de tarefa	Wickert et al. (2021)
18	Máximo de alocações em finais de semana e feriados	Wickert et al. (2021)
19	Não permissão de certos pares (funcionário, localidade)	Wickert et al. (2021)
20	Sequências em localidades diferentes	Wickert et al. (2021)
21	Mínimo de tempo de folga entre duas alocações	Cheang et al. (2003)
22	Mínimo de dias seguidos sem alocação	Cheang et al. (2003)
23	União de alocações nos finais de semana	Cheang et al. (2003)
24	Manutenção de histórico prévio de alocações	Cheang et al. (2003)
25	Balanceamento da carga de trabalho	Adams, O'Sullivan e Walker (2019)

Fonte: Erhard et al. (2018); Wickert et al. (2021); Cheang et al. (2003) e Adams, O'Sullivan e Walker (2019).

Vale o comentário de que, como as restrições presentes podem ser classificadas como *hard* ou *soft* de acordo com o contexto de uso, optou-se por não incluir essa informação na tabela anterior, mesmo que algumas delas, na maioria das vezes, sejam obrigatórias, como satisfação da demanda e não simultaneidade de alocações, por exemplo.

Cabe à realidade médica e ao contexto gerencial a definição de quais restrições priorizar, sendo esta priorização a atividade mais importante ao se definir um PGETM e também um dos principais *gaps* existentes na área, o de se caminhar na direção de um modelo que tenha maior flexibilidade para se adaptar a distintas realidades médicas e aproximar a teoria da prática para essa linha de pesquisa (PETROVIC; BERGHE, 2012).

### 2.3.4 Métodos de Resolução do PGETM

Com relação aos métodos de solução, inicialmente, faz-se uma importante distinção entre três conceitos acerca de maneiras de se trabalhar problemas de otimização: algoritmos exatos, meta-heurísticas e matheurísticas (SÖRENSEN; GLOVER, 2013).

Algoritmos exatos tratam de métodos exatos que buscam, dentre todas as opções possíveis, aquela que maximiza ou minimiza a função objetivo apresentada, de modo que uma solução ótima encontrada seja, comprovadamente, a melhor possível, por exemplo o método *Simplex*. Segundo Winston e Goldberg (2004), uma solução otimizada para um modelo de programação matemática é qualquer ponto na região factível que, com garantia, otimiza a função objetivo.

Já métodos meta-heurísticos não possuem o objetivo de encontrar, dentre todas as opções possíveis, necessariamente aquela que apresenta valor otimizado, mas sim uma solução suficientemente boa em um tempo computacional aceitável (SÖRENSEN; GLOVER, 2013). Assim sendo, este método não se sujeita à explosão de possibilidades e tempo computacional que há em algoritmos otimizantes caso o problema seja do tipo *NP-hard*, isto é, problemas nos quais um aumento no conjunto de entradas ocasiona acentuado aumento na combinatória do problema, complexidade e tempo para resolução.

Finalmente, métodos matheurísticos têm por finalidade a operação conjunta dos dois métodos anteriores, incorporando ora aspectos otimizantes e ora aspectos que se beneficiem da velocidade das heurísticas. Há distintas classificações possíveis de matheurísticas, de acordo com as interações entre esses dois métodos (SÖRENSEN; GLOVER, 2013).

O PGETM é, segundo Brucker, Qu e Burke (2011), um problema do tipo *NP-hard* quando trata de conjunto grande de restrições e necessidades de períodos de pausa pós alocação. Ainda assim, há a presença de modelos de PGETM que apresentam complexidade polinomial, abrindo espaço para discussão de quais aspectos existentes na literatura fazem com que o problema abordado se torne mais complexo (SMET et al., 2016). Assim sendo, a abordagem proposta para resolução do problema deve contemplar a utilização

ou de um *software* de estado da arte para PLIM ou a incorporação de métodos não puramente exatos, de modo a se chegar em soluções ótimas em um tempo computacional baixo nos casos que são alvo de estudo.

Dentro da área de pesquisa de Alocação de Médicos, é interessante notar que mesmo se tratando de um problema *NP-Hard*, cerca de 60% das publicações utilizam métodos exatos para que se encontre uma solução ótima (ERHARD et al., 2018). Além disso, também em contextos de menor número de médicos por equipe, há uma menor chance de que os tempos computacionais fiquem inviáveis a ponto de sequer apresentar uma solução viável com *gap* suficientemente pequeno.

Postas estas considerações acerca da literatura relacionada ao PGETM, as duas próximas seções tratarão de revisar contextos específicos de legislações vigentes e soluções de mercado atuais que apoiam na construção de escalas para médicos.

## 2.4 Contexto de Legislação Vigente para Regulação da Atividade Médica

Conforme discutido anteriormente, o fato que justifica a dificuldade de se modelar o PGETM de maneira genérica se dá porque cada instituição está inserida tanto em um contexto legislativo diferente (nacional ou regional) e porque as regras adicionais estipuladas pelos gestores e pelos próprios funcionários acabam tendo muita influência na aderência cotidiana ao turno gerado (ROUSSEAU; PESANT; GENDREAU, 2002). Sendo assim, é de suma importância que se discutam as necessidades legislativas vigentes relativas a médicos (neste caso, dentro do Estado de São Paulo), a fim de que a modelagem realizada tenha grande aderência com a realidade.

A principal importância na garantia do cumprimento das determinações e sugestões legais consiste em garantir:

- Respeito às leis trabalhistas;
- Determinação de padrões inefectíveis;
- Diminuição da exposição da organização a processos jurídicos.

Com base no entendimento de que a atividade dos profissionais da área médica é um trabalho vital para a prosperidade da sociedade e que estes são expostos a diversos riscos ocupacionais, o Conselho Regional de Medicina do Estado de São Paulo (CREMESP)

estabeleceu em 2000 resolução acerca dos direitos que devem ser garantidos (CREMESP, 2000).

Dentre os pontos abordados, tornam-se relevantes para este trabalho os artigos 1º, 3º e 8º. Vale a anotação de que, uma vez que o trabalho em questão foi realizado com foco em estudo para grupos médicos que atuam dentro do Estado de São Paulo, a modelagem será feita utilizando-se das resoluções do CREMESP, tal como na legislação que está em vigor para regulamentar as atividades do grupo em questão.

O artigo primeiro trata de estabelecer que os direitos do profissional da área médica estão assegurados pela Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), determinada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1 de maio de 1943, servindo então como base para uma série de determinações e restrições a serem consideradas dentro do ambiente jurídico, quando o regime de contratação for CLT. Segundo CREMESP (2000), “Art. 1º - Todos os estabelecimentos ou serviços de saúde devem dispensar aos médicos que lhes prestam serviços as mesmas medidas protetivas estabelecidas na legislação, bem como na presente Resolução e seu Anexo Único, que faz parte integrante desta.”.

Já o artigo terceiro aborda que há ônus por parte de médico coordenador do Programa de Controle Médico em Saúde Ocupacional (PCMSO) de tomar conta da saúde ocupacional dos demais médicos do estabelecimento, o que leva, dentro da instituição, à obrigação por parte do gestor do grupo (que não necessariamente coincide com o médico coordenador do PCMSO) a ter grande preocupação com o bem-estar e respeito tanto às preferências dos trabalhadores quanto ao balanceamento de carga de trabalho. Segundo CREMESP (2000), “Art. 3º - O médico Coordenador do Programa de Controle Médico em Saúde Ocupacional (NR nº 7 da Portaria 3.214) dos estabelecimentos de saúde é, também, responsável pela saúde ocupacional dos demais médicos que neles atuem, respeitadas as atribuições e as peculiaridades de cada instância.”.

Finalmente, o artigo oitavo diz respeito à limitação de quantidade consecutiva de horas (convertidas em turnos) as quais um médico pode ter tarefas a ele alocadas. Mais restritivo que esse artigo, conforme discutido no livro de direito trabalhista por DELGADO (2010), em seu capítulo XXIII, acerca do horário de trabalho, é de praxe que se estabeleça que, após turno de 12 horas sem interrupção, um trabalhador não possa ser alocado nas 24 ou 36 horas subsequentes, conhecida informalmente como regra “12-36”. Segundo CREMESP (2000), “Art. 8º - Ficam proibidos plantões superiores a vinte e quatro (24) horas ininterruptas, exceto em caso de plantões à distância.”.

Somando-se à discussão anterior, também tomando como base o fato de que a ativi-

dade da medicina contribui para o bem comum da sociedade e de que há grandes riscos em termos de integridade física, psicológica e conseqüentemente de desempenho em não se respeitar as limitações biológicas desses profissionais, há estudo dedicado à discussão de legislações que auxiliem na garantia de direitos, mesmo quando se tratam de contratações de caráter eventual ou autônoma (ROSA; NOGUEIRA, 2017).

Como levantamentos principais, tem-se que, apesar de possibilidade de alocação de jornadas mais longas do que 12 horas caso seja aprovado via sindicato ou contrato autônomo, a exigência em demasia pode acarretar em indenizações, exemplificando-se o dano em relação ao cansaço excessivo do trabalhador (ROSA; NOGUEIRA, 2017).

Por fim, um argumento não legal, porém também relevante na decisão acerca das restrições a serem consideradas na problematização matemática feita em capítulo futuro deste trabalho, é a de que a exposição a longas jornadas de trabalho, tal como jornadas noturnas, causa menor desempenho cognitivo e maior propensão a decisões equivocadas (ROSA; NOGUEIRA, 2017).

Torna-se relevante que esses pontos levantados e as restrições de legislação existentes são aspectos a serem considerados na definição do problema, de modo a tentar da melhor maneira uni-los para a geração de um modelo com boa aderência.

A seção seguinte continua com o levantamento de informações interessantes sobre os meios que gestores de grupos médicos utilizam para auxiliar em suas tarefas de criação de escalas.

## **2.5 Soluções Atuais de Gestão para Criação de Escalas de Trabalho na Área Médica**

O entendimento de quais recursos, *softwares* ou interfaces de gestão de escalas de trabalho estão atualmente sendo utilizados por gestores e profissionais da área médica é primordial para a modelagem do problema. Isso se explica porque o modelo deve ser capaz de gerar solução similar ou melhor que as soluções atuais empregadas com base em entradas similares de dados. Caso não se tenha a facilidade de uso do sistema a ser gerado, a aderência por parte de gestores e trabalhadores pode ser baixa, uma vez que a interface com usuário é fator determinante para a aplicabilidade de um *software* (DRAY, 1995).

Assim sendo, com base em conversas com coordenadores de grupos médicos e pesquisas de mercado sobre o assunto, revisaram-se seis soluções atuais de apoio para geração de

escalas de trabalho no mundo, tanto aplicações gratuitas quanto pagas. Uma vez não sendo a intenção do estudo se alongar em cada uma delas, optou-se por manter apenas um resumo da revisão realizada, apresentando aspectos principais de maneira breve e maior elaboração e detalhamento em apêndice do texto.

Têm-se, então, os seguintes *softwares* e interfaces de apoio para criação e gestão de escalas, resumidos na Tabela 5 e detalhados no Apêndice C.

Tabela 5: Resumo de características levantadas de soluções atuais para a geração de escalas de trabalho.

Nome	Software / Interface	Específico para realidade médica?	Gratuidade?	Utiliza algoritmo otimizador?	País de Origem	Link para acesso da Solução
Doctor ID	Software	Sim	Não	Sim	Brasil	<a href="https://www.doctorid.com.br/">https://www.doctorid.com.br/</a>
Shift Admin	Software	Sim	Não	Sim	Estados Unidos	<a href="https://www.shiftadmin.com/">https://www.shiftadmin.com/</a>
Qgenda	Software	Sim	Não	Sim	Estados Unidos	<a href="https://www.qgenda.com/">https://www.qgenda.com/</a>
PACE Scheduler	Software	Não	Não	Não	Estados Unidos	<a href="https://www.pacescheduler.com/">https://www.pacescheduler.com/</a>
Microsoft Excel	Interface	Não	Não	Não	Estados Unidos	<a href="https://www.office.com/">https://www.office.com/</a>
Google Agenda	Interface	Não	Sim	Não	Estados Unidos	<a href="https://calendar.google.com/">https://calendar.google.com/</a>

Fonte: O autor.

Como comentário final sobre esta seção, pode-se concluir que cada um dos *softwares* e interfaces apresenta pontos positivos e negativos em termos de custos, facilidades de uso e possibilidades de customização, de modo que é interessante que esses conhecimentos sejam levantados a fim de que a modelagem do problema consiga trazer benefícios para o gestor que é responsável pela criação de turnos de trabalho.

## 2.6 Aspectos sobre Métodos de Decisão Multicritério (MDMC)

Não são esporádicos os casos, dentro de um ambiente gerencial, nos quais uma decisão deve ser tomada após a análise de grande quantidade de aspectos que não necessariamente são facilmente comparáveis (como exemplo, podem ser grandezas expressas em unidades diferentes ou até mesmo um subconjunto delas ser quantitativo e outro ser qualitativo). Assim sendo, métodos que envolvam uma maneira clara de categorizar, comparar e concluir qual alternativa é a mais adequada são um foco de estudos acadêmicos existente há grande quantidade de tempo, com um grande crescimento ainda mais expressivo após a década de 1990 (TRANTAPHYLLOU, 2000).

Além disso, é interessante notar que os conceitos revisados em questão também são bastante conectados com a teoria de Programação por Metas, uma das maneiras de lidar

com métodos de Decisão Multi-Objetivo. A natureza do Problema de Geração de Escalas de Trabalho (tanto para médicos quanto para enfermeiros) faz com que, muitas vezes, o modelo estabelecido seja ou explicitamente um modelo de Programação por Metas ou tenha estrutura similar, como visto durante a revisão realizada em seções anteriores. Com a finalidade de não fugir dos tópicos principais do trabalho, optou-se por não revisar esse tópico, limitando-se aos aspectos relativos à ponderação de pesos apenas (TAMIZ; JONES; EL-DARZI, 1995).

Os MDMC são caracterizados, então, por lidarem com a escolha de uma técnica específica (dentro de um conjunto finito de técnicas usuais na literatura) a fim de tratar um conjunto de tomadas de decisão envolvendo as seguintes seis esferas (TRIANANTAPHYLLOU, 2000):

- Alternativas - Escolhas possíveis dentro de um conjunto de viabilidades a serem determinadas pelo tomador de decisão. São conflitantes e exclusivas entre si, ou seja, optar por uma alternativa equivale a deixar de optar pelas demais;
- Múltiplos Atributos (ou Objetivos/Critérios de Decisão) - Representação de cada esfera de interesse sob a qual uma alternativa pode ser avaliada;
- Conflito entre Critérios - Fator que ocorre quando há interferência entre dois ou mais atributos, isto é, uma boa avaliação em um implica boa ou má avaliação em outro. Usualmente, procura-se evitar escolher critérios de modo que exista de maneira muito clara tal conflito;
- Unidades de Medida - A avaliação dos atributos selecionados pode não estar expressa necessariamente na mesma unidade de medida, ou mesmo pode possuir aspectos qualitativos que devem ser convertidos em valores numéricos equivalentes de forma que seja possível realizar comparação matemática entre os valores associados aos diferentes critérios;
- Ponderação de Pesos - Estabelecimento de pesos para cada um dos atributos selecionados, de maneira que os mais importantes sejam avaliados com um número maior. Segue a lógica de que uma alternativa que seja melhor em quesitos mais importantes deve ser ranqueada melhor que uma alternativa que seja boa apenas em aspectos menos importantes. Usualmente, a soma dos pesos resulta em 1 (normalização);
- Matriz de Decisão - Principal ferramenta dentro dos MDMC, uma vez que consolida todas as informações anteriores e representa de maneira clara a avaliação de todas

as alternativas em todos os atributos, tal como quantifica cada uma das soluções e as ranqueia por meio de métodos numéricos. Uma esquematização da matriz de decisão é feita por meio da Tabela 6, já consolidada em diversos artigos na área, como exemplo Chen (2000) e Al-Harbi (2001). Cada célula da matriz onde um critério cruza uma alternativa é associada a um valor (uma nota)  $v_{ij}$ , usualmente definida de 1 a 10.

Tabela 6: Estrutura de uma matriz de decisão.

Alternativas/Critérios	Critério <sub>1</sub>	Critério <sub>2</sub>	...	Critério <sub>n</sub>
Pesos	$\omega_1$	$\omega_2$	...	$\omega_n$
Alternativa <sub>1</sub>	$v_{11}$	$v_{12}$	...	$v_{1n}$
Alternativa <sub>2</sub>	$v_{21}$	$v_{22}$	...	$v_{2n}$
...	...	...	...	...
Alternativa <sub>m</sub>	$v_{m1}$	$v_{m2}$	...	$v_{mn}$

Fonte: (CHEN, 2000).

A partir da construção da matriz de decisão, é possível chegar à conclusão da alternativa mais adequada a ser escolhida, restando apenas saber como realizar os cálculos internos e como concluir após o preenchimento. Há, para isso, diversas abordagens possíveis, com o destaque para o método *Analytical Hierarchy Process* (AHP), que é o escolhido a ser utilizado neste estudo e que consiste em realizar comparações de critérios dois a dois, estabelecendo uma hierarquia, isto é, ranqueamento segundo determinação de importâncias relativas (TRIANAPHYLLOU, 2000).

### 2.6.1 O Método AHP e sua Aplicação em Problemas de Geração de Escalas

O método AHP foi proposto inicialmente por Saaty e posteriormente contextualizado em diversos artigos do mesmo autor (para finalidades de aporte teórico, este trabalho considera Saaty (1987)). Esse método tem como seu cerne medir distintas características dentro de um sistema gerencial por meio de comparações numéricas baseadas na escala de importância relativa entre os objetos levantados, estabelecidos no mesmo estudo, evidenciados na Tabela 7.



Tabela 7: Estabelecimento de conversão numérica para método AHP.

Intensidade atribuída	Definição/Explicação
1	Igual importância
3	Importância moderada em relação ao critério de comparação
5	Importância perceptível em relação ao critério de comparação
7	Importância forte em relação ao critério de comparação
9	Importância extrema em relação ao critério de comparação
2,4,6,8	Valores intermediários para as intensidades

Fonte: (SAATY, 1987).

Assim sendo, é possível a construção de uma matriz de comparações entre critérios (tomados dois a dois, portanto resultando em  $n \cdot (n - 1)/2$  comparações) que apresenta uma série de propriedades interessantes, das quais se destaca o fato de que a diagonal principal da matriz é composta por elementos unitários, os termos com índices invertidos possuem valores inversos, isto é,  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ , e se  $C_i$  (abreviação de Critério $_i$ ) é mais importante que  $C_j$ , então  $a_{ij} > 1$ . A Tabela 8 evidencia tais relações, a fim de maior clareza do processo que é feito para determinação dos pesos relacionados ao método em questão. Vale o comentário de que uma maneira usual de definir os valores comparativos é a de realizarem conversas com especialistas da área para a qual se fez necessária a decisão, entendendo as motivações para minimizar o risco de haver viés.

Tabela 8: Estrutura da matriz de comparação de critérios do método AHP.

Critérios AHP	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$C_1$	1	$a_{12}$	...	$a_{1n}$
$C_2$	$1/a_{12}$	1	...	$a_{2n}$
...	...	...	...	...
$C_n$	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	...	1

Fonte: O autor.

Fonte: (SAATY, 1987).

Dentro do contexto de Geração de Escalas de Trabalho, o método é empregado tanto em modelos de Programação por Metas quanto em modelos mais gerais de PLIM, uma vez que em ambos há a existência de uma série de restrições *soft*, que podem ou não ter mesma unidade de medida e usualmente possuem diferentes importâncias de acordo

com o contexto da instituição, especialização dos profissionais e dos gestores. Exemplos de utilização do método dentro do contexto deste trabalho são Azaiez e Sharif (2005) e Jlassi, Chabchoub e Mhamedi (2011).

Além do método AHP, há também estudos na área que propõem outros métodos a serem aplicados, como trabalho desenvolvido por Mihaylov et al. (2016), com método que utiliza históricos de escalas previamente aplicadas a fim de determinar quais os aspectos que foram empiricamente mais valorizados. Este último método é especialmente interessante em casos nos quais há grandes históricos prévios e garantia de que as escalas anteriores de fato possuem boa aderência, por meio de *feedbacks* estabelecidos. Uma vez que também há possibilidade de que tal método não seja tão assertivo, Bodhvarsdottir, Smet e Berghe (2020) estabeleceram método que de maneira iterativa calcula e valida os pesos dos critérios de acordo com conceitos de MDMC e aderência a históricos anteriores de alocações, até que se chegue a uma convergência, sem necessidade de interferência humana (por exemplo, na hora de comparar os critérios dois a dois). Entretanto, o estudo também aponta que não há sensíveis diferenças entre as soluções para variações pequenas na consideração das importâncias ao se utilizar o AHP, por exemplo, não se altera muito a solução se um gestor considerar um aspecto que seja “levemente mais importante” como “consideravelmente mais importante”.

Assim sendo, como o objetivo do trabalho se encontra mais conectado com o estabelecimento de um modelo que possivelmente otimize escalas de serviços sem grandes históricos prévios, a escolha feita é pela utilização do método AHP e não pela utilização de históricos anteriores dos grupos médicos.

A próxima seção trata de estabelecer de maneira breve alguns tópicos sobre a incorporação de incertezas dentro de otimização, tópico que se mostrará fundamental durante a resolução da versão estocástica do problema.

## 2.7 Considerações sobre Incorporação de Incertezas em Problemas de Otimização

Dentro da temática de otimização, é comum que certos modelos matemáticos, em suas versões determinísticas, sejam representações aproximadas da realidade, seja pelo fato de alguns parâmetros apresentarem erros de medição ou, em casos piores, serem incertos dentro de uma faixa de possibilidades. Nesse caso, há diversas abordagens para se tratar desses aspectos não conhecidos, seja por meio da substituição por restrições de chance

(utilizando-se da distribuição do parâmetro incerto e nível de significância para tratar da incerteza) ou diversas outras técnicas avançadas considerando o valor esperado da função objetivo e sua variância (como a Programação Estocástica e a Programação Estocástica Robusta) ou abordagens de pior caso (como o caso da Otimização Robusta) (SHAPIRO, 2008).

Para este trabalho, será tratada a abordagem de Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso, que consiste basicamente em dividir o problema em duas etapas, cada qual com um conjunto de variáveis (SHAPIRO, 2008; SAHINIDIS, 2004):

- I. No primeiro estágio, encontram-se as variáveis que devem ser decididas em um momento atual, antes de se ter a confirmação de qual o valor do parâmetro incerto. Diz-se que os valores dessas variáveis devam ser decididos “Aqui e agora”;
- II. Já no segundo estágio, tem-se o valor do parâmetro incerto conhecido (pode-se dividir em cenários de realização), e, a partir disso, apresenta-se o valor das variáveis do estágio, que são calculadas com base em políticas de recursos, consistindo em “Caso o cenário seja aquele, posso adotar determinada política”.

A função objetivo, então, trata de considerar o valor da função dependente das variáveis de primeiro estágio e o valor esperado dos distintos casos de segundo estágio. Uma abordagem possível, dado que o número de casos possíveis pode gerar uma quantidade inviável de variáveis e restrições ao problema original, é a de pegar uma quantidade finita de casos que sejam suficientemente representativos, cada qual com os valores potenciais conhecidos e a probabilidade de acontecimento de cada cenário. Em sua versão mais genérica, é possível retratar a formulação por meio da notação (BIRGE; LOUVEAUX, 2011):

$$\begin{aligned} \min \quad & Z = c^t x + E_{\xi}[Q(X, \xi)] \\ \text{s.a.} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

sendo que  $x$  são as variáveis de primeiro estágio e  $A$ ,  $b$  e  $c^t$  são conjuntos relacionados às variáveis de primeiro estágio, respectivamente sendo a matriz de coeficientes tecnológicos, o vetor de termos independentes e o vetor de coeficientes da função objetivo.

Por fim,  $E_{\xi}[Q(x, \xi)]$  é a função do recurso e  $Q(x, \xi)$  a solução do problema de segundo estágio para uma dada realização das incertezas, isto é:

$$\begin{aligned} Q(x, \xi) &= \min q(\xi)^T y(\xi) \\ \text{s.a. } W(\xi)y(\xi) &= h(\xi) - T(\xi)x \\ y(\xi) &\geq 0 \end{aligned}$$

Cabe a explicação de que o conjunto de equações é escrito em função de um determinado vetor de incertezas,  $\xi = [q(\xi), T(\xi), W(\xi), h(\xi), y(\xi)]$ , composto por:

- $q(\xi)$ : Coeficientes da função objetivo (parâmetro estocástico);
- $T(\xi)$ : Matriz de coeficientes das restrições acompanhando variáveis de primeiro estágio (parâmetro estocástico);
- $W(\xi)$ : Matriz de coeficientes das restrições acompanhando variáveis de segundo estágio (parâmetro estocástico);
- $h(\xi)$ : Termos independentes das restrições (parâmetro estocástico);
- $y(\xi)$ : Variáveis de decisão de segundo estágio.

Ainda sobre o tema, segundo (BIRGE, 1997), a maior dificuldade neste tratamento está relacionada ao cálculo do valor esperado do problema de segundo estágio, e grande parte dos modelos recorre a aproximações utilizando-se de cenários finitos representativos de incertezas, discretizando assim o problema em cenários. Com base nessa simplificação, possibilita-se uma representação por meio de um problema único que pondere o valor correspondente de cada um dos possíveis cenários.

Consoante com as informações anteriores, tal problema único, chamado de Problema Equivalente Determinístico, é definido, sendo  $s$  o índice de cada cenário,  $S$  o conjunto de todos os cenários possíveis e  $P_s$  a probabilidade de ocorrência do cenário  $s$ , pelo conjunto de equações:

$$\begin{aligned}
\min \quad & Z = c^t x + \sum_{s \in S} P_s [q_s^T y_s] \\
\text{s.a.} \quad & Ax = b \\
& W_s y_s = h_s - T_s x, \quad s \in S \\
& x \geq 0 \\
& y_s \geq 0, \quad s \in S
\end{aligned}$$

Por fim, encontram-se como relações relevantes na temática dois resultados, relacionados a três valores de solução calculados para versões de um problema com componentes incertas (BIRGE; LOUVEAUX, 2011). Denomina-se *Wait-and-See* (WS) o valor do problema caso houvesse uma “bola de cristal” para verificar precisamente o valor do parâmetro incerto antes de realizar a otimização, ou seja, calculando cada caso como se fosse determinístico e posteriormente ponderando esses resultados pela probabilidade de ocorrência dos cenários. Denomina-se *Recourse Policy* (RP) o valor que consiste em resolver o problema equivalente determinístico, com os dois estágios e considerando os recursos possíveis em cada cenário. Por fim, denomina-se *Effective Expected Value* (EEV) o valor obtido ao se resolver o problema equivalente determinístico com as variáveis de primeiro estágio já fixadas previamente seguindo uma lógica de uso de valor esperado, denominado *Expected Mean Value* (EMV).

Com relação às duas equações observadas a partir dos valores calculados, em problemas de minimização, a primeira consiste no *Expected Value of Perfect Information* (EVPI), e representa a diferença entre o valor obtido RP e o valor WS, sendo o valor limite no qual valeria a pena se empenharem esforços para a eliminação das incertezas. Já a segunda consiste no *Value of Stochastic Solution* (VSS), e representa o quanto se ganha ao tratar o modelo incorporando suas incertezas ao invés de ignorá-la por meio da utilização de valores esperados.

$$RP - WS = EVPI$$

$$EEV - RP = VSS$$

Com relação às atuais aplicações de abordagens de Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso dentro da área de planejamento e alocação de funcionários, há estudos que fazem considerações interessantes sobre os tópicos discutidos nesta seção.

Um exemplo é de artigo desenvolvido por Restrepo, Gendron e Rousseau (2017), que ao considerar a alocação de funcionários com mesmo nível de habilidade (sem consideração de preferências individuais ou diferença entre desempenho ou necessidades entre dois funcionários), faz a incorporação de incerteza na quantidade de trabalhadores necessários para a realização de cada atividade e utiliza como recurso a possibilidade de contratar funcionários adicionais ou de ter funcionários ociosos, associando custos de *overstaffing* e *understaffing* na função objetivo, ou seja, inserção de mais ou menos trabalhadores com relação ao número de fato necessário em cada um dos cenários possíveis.

Também há estudos publicados em áreas de vendas de produtos, a fim de incorporar a incerteza de demanda por revendedores devido ao fluxo variado de clientes, como é o exemplo de Parisio e Jones (2015), que propuseram modelo capaz de considerar tal variabilidade enquanto garantia satisfação de demanda, mínimo de dias de folga (ao menos um por semana), máximo do número de horas de trabalho diário sem um intervalo e diferenciação entre profissionais de período integral e meio-período. Além de utilizarem a abordagem de Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso, também foi incorporada possibilidade de adição de turno de trabalho nos períodos onde historicamente exista maior demanda, porém sem resultados que apontem grandes benefícios decorrentes de tal criação de turno adicional.

Por fim, dentro da área mais próxima deste trabalho, a área de alocação de enfermeiros, estudo realizado por Kim e Mehrotra (2015) aborda de maneira conjunta as temáticas de PDCT e PAE, com incerteza no número de padrões de turnos necessários (uma das abordagens discutidas na Seção 2.3, mais especificamente a visão focada em turnos) e a utilização de 1000 cenários representativos, com penalidades relacionadas tanto com diferença do número de funcionários contratados quanto com a necessidade de inserção de padrões de turnos necessários ou de remoção de padrões de turnos desnecessários. Outro estudo, elaborado por Marchesi, Hamacher e Fleck (2020) também apresenta a integração entre o PDCT e o PAE, considerando incerteza na chegada de pacientes. A incerteza foi tratada também por meio do uso de conceitos de Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso a partir de cenários gerados por aproximação de média amostral. Como comentário interessante, o modelo apresentado permite turnos flexíveis, na medida em que o horário de início de um turno pode variar, inclusive ocorrendo sobreposição de turnos.

Ainda que já existam trabalhos como os revisados acima, ainda se trata de uma área pouco explorada dentro do PAM, conforme já explicitado anteriormente, em revisão robusta da literatura realizada por Erhard et al. (2018), que aponta um dos maiores

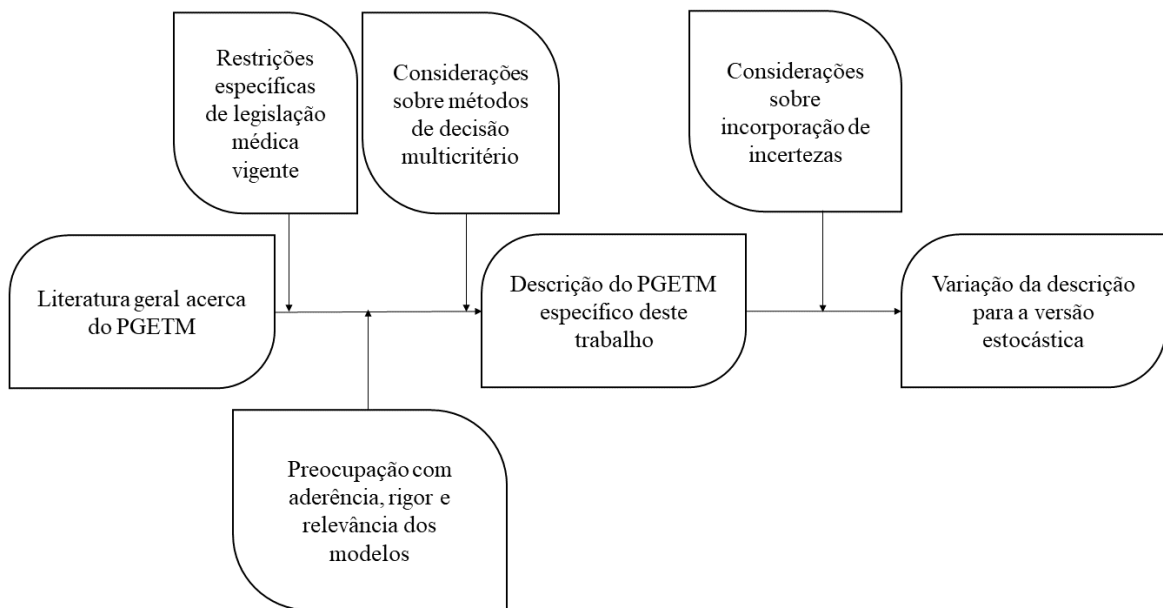
*gaps* na literatura como a possibilidade de incorporação de aspectos não determinísticos dentro das abordagens de PLIM do problema em questão. Vale o comentário de que uma abordagem multi-estágio também poderia ser interessante, dado o caráter multi-período do problema, porém, por questões de complexidade e de entendimento que mudanças mais frequentes nas escalas dos médicos podem dificultar a adesão às soluções propostas, o estudo se restringiu à abordagem de dois estágios.

Com isso, finaliza-se o aporte teórico para a descrição do problema específico deste trabalho, tendo abrangido desde aspectos mais genéricos de Pesquisa Operacional ligada a sistemas de saúde até o PGETM, também com referenciais auxiliares vistos nas Seções 2.6 e 2.7. Feitas tais considerações, então, é possível passar para o capítulo que tratará de descrever o problema específico a ser modelado e as variações ao se incorporarem conceitos de incerteza.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Inicialmente, torna-se interessante recapitulação da estrutura do Capítulo 2 deste trabalho, para entendimento do caminho percorrido até se chegar na definição do PGETM específico do trabalho, uma vez que essa definição guia diretamente a modelagem do problema e, conseqüentemente, todo o restante do trabalho. A Figura 6 esquematiza a interação entre principais seções do capítulo anterior e a definição do PGETM abordado no trabalho.

Figura 6: Relação entre tópicos abordados no Capítulo 2 para a descrição do problema abordado.



Fonte: O autor.

Sendo assim, este capítulo tratará basicamente de selecionar e justificar, dentre os aspectos da literatura revisados no capítulo anterior e as particularidades da equipe hospitalar em questão, aqueles que são relevantes para a realidade deste trabalho, de modo a



se ter um problema definido a fim de conseguir boa aderência, rigor e relevância para a realidade acadêmica e dos grupos médicos em questão. Para tal, apresenta-se primeiramente o estudo de caso abordado, para posteriormente descrever o problema de maneira geral e comentar quais as modificações na descrição ao se considerar o parâmetro de demanda como incerto.

A fim de se evitarem ambiguidades, o termo “setor” foi escolhido para se referir à atividade específica que um médico deve realizar em um hospital, concatenando informações tanto sobre o hospital quanto sobre qual ala ou departamento dentro deste local há o trabalho a ser executado. Assim sendo, é possível que um mesmo hospital tenha diversos setores, por exemplo, uma equipe de ginecologia pode atuar em um mesmo hospital tanto no centro cirúrgico, para procedimentos agendados previamente, quanto no pronto socorro, para procedimentos em caráter de urgência. Para hospitais com apenas um setor considerado, torna-se comum que o nome do hospital seja utilizado para se referir ao setor. O termo “alocação”, por sua vez, se refere ao conjunto de informações sobre o dia, turno e setor específico de trabalho.

Com relação ao estudo de caso, tanto a motivação quanto dados para descrição do problema e implementação foram fornecidos por um grupo médico composto por duas médicas gestoras que gerenciam outros 19 médicos, totalizando uma equipe de 21 médicos. Essa equipe é responsável por realizar atividades dentro da especialidade de Ginecologia em três hospitais distintos localizados na cidade de São Paulo, operando em turnos da manhã e da tarde em dias comerciais, e somente no turno da manhã em um dos hospitais aos sábados. A atividade de geração de escalas de trabalho, para o grupo, é feita pelas gestoras de forma manual, tomando várias horas de trabalho e esforço e sem garantia de otimalidade ou de máxima satisfação do grupo. Durante tal processo, as gestoras se preocupam com aspectos como garantir que um médico não esteja sendo alocado demais ou muito pouco, além de tentar garantir um balanceamento de carga de trabalho entre os membros da equipe. Após essa atividade exaustiva, caso a solução encontrada não agrade plenamente algum membro, há o aumento da chance deste membro querer trocar sua alocação com outro médico ou de não comparecer (na realidade médica, referem-se, informalmente, como “passar o turno” ou “passar o plantão”). Em última instância, caso não se encontre outro membro disponível, as gestoras ficam com a tarefa de cobrir tal alocação. Outrossim, há a dificuldade de se lembrar de todas as preferências individuais, uma vez que a atividade manual envolve ligação telefônica ou contato esporádico por mensagens para se ter uma noção das principais vontades de cada médico. Além do contato direto com os membros e as gestoras desta equipe, também foram feitas conversas

adicionais com outros gestores médicos, levantando seus principais desafios e necessidades, aspectos esses que foram levados em consideração ao se estabelecerem pontos centrais do desenvolvimento deste trabalho, como a comparação de importância dentre aspectos, que serão restrições *soft* do problema.

Além dos aspectos revisados anteriormente, também há de se considerar que o problema abordado, para que possua aderência e relevância, deve considerar as peculiaridades da organização hospitalar, uma vez que distintas organizações podem ter um mesmo aspecto como mais ou menos importantes, dependendo de seus objetivos particulares. Um exemplo é que algumas instituições prezam por fazer com que, se um médico já trabalha aos sábados, também deve trabalhar aos domingos, enquanto outras instituições prezam por balancear a carga de trabalho aos finais de semana para que nenhum trabalhador fique inteiramente sem descanso no final de semana.

Com relação a essas particularidades da organização hospitalar que forneceu as informações e apoio para o desenvolvimento deste trabalho, alguns aspectos relevantes foram levantados, por meio de conversas realizadas com a equipe de médicos em questão, e que devem ser revistas mensalmente. São eles:

- Cada dia do horizonte de planejamento pode ter um turno (manhã), dois turnos (manhã e tarde) ou três turnos (manhã, tarde e noite);
- Possibilidade de alocação em diferentes setores em um mesmo endereço físico (por exemplo, pode haver necessidade de satisfação da demanda no Pronto Socorro e no Centro Obstétrico);
- Incorporação de preferências individuais dos médicos;
- Incorporação de restrições específicas, como exemplo, um médico não poder trabalhar no Pronto Socorro de um dos hospitais;
- Balanceamento da quantidade de horas de trabalho;
- Restrição do número máximo de alocações dentro do período.

Vale como comentário que as definições da literatura para o PGETM usualmente consideram que todos os dias do horizonte do planejamento tenham os mesmos turnos (manhã, tarde e noite), de modo que o fato da definição deste problema não conter tal limitação se mostra como potencial novidade teórica em termos de maior flexibilidade para situações médicas que não operem necessariamente 24h.

Tendo em vista a situação apresentada e as especificidades levantadas, reiteram-se as definições abordadas na Seção 2.2, de que dentro da temática de Planejamento de Força de Trabalho, o Problema de Alocação de Funcionários é um problema de nível tático, que pressupõe se ter previamente determinado o número ideal de trabalhadores contratados e possui o objetivo de alocar os funcionários dentro de uma escala de trabalho de modo a se otimizar um objetivo, financeiro ou não (BERGH et al., 2013).

Como mencionado no Capítulo 2, um caso específico de PAF é o PAM, que adiciona restrições de acordo com as necessidades da realidade médica, usualmente com o horizonte de planejamento mensal e com diversas restrições relacionadas com as preferências de trabalho dos funcionários. O problema estudado é então definido como sendo um PGETM, com o intuito de realizar a alocação de médicos em turnos de trabalho a fim de satisfação da demanda e de preferências dos trabalhadores. A demanda é variável para cada dia, turno e setor estabelecidos. Uma solução é considerada factível quando satisfaz a todas as restrições *hard* impostas e, para cada solução factível, atribui-se um valor de penalidade associado às restrições *soft* que não foram satisfeitas na solução, sendo o objetivo final a minimização deste valor.

É possível de se representar o problema por meio da seguinte relação de informações:

Dados (*inputs*):

- Número de dias do horizonte de planejamento;
- Turnos de cada dia do horizonte de planejamento;
- Número de setores a serem considerados;
- Demanda de cada uma das alocações de trabalho (dia, turno e setor);
- Vetos da gerência de certos médicos em certos setores;
- Proibições de sucessões de turnos por restrições geográficas (setores distantes entre si);
- Indisponibilidades temporais (dias e turnos) de cada médico;
- Preferências de cada médico por trabalhar em determinados setores;
- Preferências temporais (dias e turnos) de cada médico;
- Valores associados às penalidades de restrições *soft*;

- Números desejados para parâmetros de mínimos e máximos de alocações de cada médico.

Determinar (*outputs*):

- Escala de trabalho que otimiza as preferências ponderadas;
- Alocações de cada médico ao longo do horizonte de planejamento;
- Quantificação numérica das violações das restrições *soft*.

Com a finalidade de maior organização, a Tabela 9 traz tais definições adotadas, enquanto a Tabela 10 traz as restrições contempladas no problema, com enumeração baseada na Tabela 4, a fim de facilitação e maior concisão.

Tabela 9: Definições adotadas para o PGETM.

Conceito	Explicação
Horizonte de planejamento	1 mês (30/31 dias)
Quantidades de turnos	3 turnos diários - Manhã (6h), Tarde (6h) e Noite (12h)
Quantidade de setores	Variável de acordo com o caso analisado
Setores distintos em um mesmo hospital	Cada setor possui sua própria demanda de forma independente
Variáveis de decisão	Relacionadas à alocação de médicos em dias, turnos e setores
Tipo de construção do problema	Problema de Otimização de Restrições
Demanda por profissionais	Variável de acordo com cada dia da semana, turno e setor
Incorporação de disponibilidade	Turnos desejáveis, indesejáveis e indisponíveis
Incorporação de preferências	Priorizar ou não certos turnos e certos setores
Impossibilidade de alocações	Vetos pela gerência de certos pares (funcionário, setor)

Fonte: O autor.

Tabela 10: Restrições contempladas no PGETM deste trabalho.

Nº	Restrição	Sigla	Categoria
1	Satisfação da demanda por profissionais por alocação	H1	Hard
9	Indisponibilidade em certos turnos	H2	Hard
19	Não permissão de certos pares (funcionário, setor)	H3	Hard
2	Não simultaneidade de alocações	H4	Hard
14	Limite máximo de alocação de turnos em um mesmo dia	H5	Hard
3	Descanso mínimo após trabalho em turnos da noite	H6	Hard
4	Descanso mínimo após trabalho em dois turnos no dia anterior	H7	Hard
4	Não permissão de trabalho além do turno da noite em mesmo dia	H8	Hard
20	Proibição de sequências entre certos setores	H9	Hard
18	Limite máximo de alocações em finais de semana e feriados	H10	Hard
5	Limite máximo de alocações em turnos da noite	H11	Hard
25	Balanceamento do total de turnos trabalhados entre médicos	S1	Soft
25	Balanceamento de turnos trabalhados aos finais de semana e feriados entre médicos	S2	Soft
6	Máximo de alocações no horizonte de planejamento	S3	Soft
7	Mínimo de alocações no horizonte de planejamento	S4	Soft
9	Preferências de médicos por certos turnos e dias	S5	Soft
9	Preferências de médicos por certos setores	S6	Soft

Fonte: O autor.

Estas 17 restrições apresentadas na Tabela 10 (11 restrições *hard* e 6 restrições *soft*) podem ser resumidas em seis categorias, vistas na Tabela 11, apenas para facilitação da compreensão e panorama mais geral dos propósitos que elas representam.

Tabela 11: Agrupamento das restrições contempladas no PGETM, categorizadas para facilitação de entendimento.

Nº	Aspecto	Siglas do modelo
1	Restrições <i>hard</i> de satisfação de demanda e sequências proibidas de turnos a serem realizados	H1, H4, H5, H6, H7, H8 e H9
2	Restrições <i>hard</i> de proibição de médicos em certos setores e indisponibilidade em certos turnos	H2 e H3
3	Restrições <i>hard</i> de máximo de alocações	H10 e H11
4	Restrições <i>soft</i> de balanceamento de carga de trabalho	S1, S2, S3 e S4
5	Restrições <i>soft</i> de preferência por turnos e setores	S5 e S6

Fonte: O autor.

Vale como comentário central que a descrição anterior se dá ao considerar a demanda como conhecida previamente, de forma determinística. Tal fato não ocorre na realidade,

conforme revisado anteriormente. De fato, o oposto se mostra como padrão, com incertezas e flutuações a depender de fatores externos. Além disso, também é relevante o fato de que a demanda em questão não é um parâmetro independente advindo apenas da taxa variável de pacientes que necessitam de atendimento, mas sim um parâmetro dependente calculado pela organização com base em outros aspectos, como tempo de fila desejado e taxa de ocupação dos médicos, o que acaba fazendo com que as realizações possíveis para cada parâmetro tenham relativamente poucas opções. Por fim, também considera-se que os médicos disponíveis estejam com 100% de sua capacidade produtiva, sem considerar aspectos de fadiga ou exaustão, algo que nem sempre se mostra na realidade.

Assim sendo, considerando-se a incerteza na demanda, a descrição se complementa da seguinte forma:

Dados (*inputs*):

- Informações sobre a distribuição de probabilidades da realização de cada parâmetro de demanda em cada cenário mais representativo existente;
- Valores dos custos associados a chamar médicos terceiros para satisfação da demanda adicional e à ociosidade dos médicos da equipe em caso de demanda inferior.

Determinar (*outputs*):

- Escala de trabalho otimizada considerando também o valor esperado da realização de cada cenário;
- Alocações de cada médico, quantidade de médicos terceiros a serem chamados de última hora e quantidade de médicos que deverão ficar ociosos ao longo do horizonte de planejamento;
- Quantificação numérica das violações das restrições *soft* do modelo e dos custos associados à alocação de médicos terceiros chamados de última hora e à ociosidade dos médicos alocados.

Postas tais considerações sobre a delimitação do estudo de caso e sobre a descrição do problema abordado, passa-se para o capítulo de Modelagem Matemática, com os respectivos conjuntos de relações matemáticas que descrevem o PGETM definido neste capítulo, tanto em versão determinística quanto em versão estocástica.

## 4 MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo determinístico a ser tratado neste capítulo é baseado no modelo proposto por Wickert et al. (2021), em sua versão básica, com as especificidades abordadas na descrição do problema feita no Capítulo 3. Apresenta-se, na Tabela 12, a comparação entre a modelagem determinística e os aspectos do modelo de Wickert et al. (2021), evidenciando os que foram incorporados e os que foram adaptados/não incorporados, para melhor representar a realidade deste estudo.

Tabela 12: Análise entre modelo deste trabalho e modelo de Wickert et al. (2021).

Nº	Aspecto do modelo de Wickert et al. (2021)	Comparação	Comentário
1	Não alocação de um médico em mais de um turno em um mesmo dia em dias de semana	Não incorporado	-
2	Número mínimo de médicos por dia/turno/setor	Adaptado	Substituído por número fixo de médicos
3	Número máximo de médicos por dia/turno/setor	Adaptado	
4	Caso um médico seja alocado no turno da manhã em dias de semana, deve também trabalhar à tarde	Não incorporado	-
5	Sucessão inválida de turnos entre hospitais	Adaptado	Possibilidade de turnos em mais de um setor em um mesmo hospital
6	Indisponibilidade de médicos em certos turnos	Incorporado	-
7	Turnos seguidos precisam ser no mesmo hospital	Adaptado	Possibilidade de permissão para setores geograficamente próximos
8	Incorporação de habilidades	Incorporado	Relacionado aos vetos gerenciais
9	Número máximo de alocações repetidas (entre semanas)	Não incorporado	-
10	Número máximo de dias consecutivos com alocações	Adaptado	Tratado como restrição <i>hard</i>
11	Preferências de médicos por turnos/setores	Incorporado	-
12	Não realização de turnos isolados nos finais de semana	Não incorporado	-
13	Número mínimo de alocações no horizonte de planejamento	Incorporado	-
14	Número máximo de alocações no horizonte de planejamento	Incorporado	-
15	Número máximo de alocações em finais de semana	Adaptado	Adaptado para turnos da noite e dias não comerciais

Fonte: O autor.

Apesar de apresentar similaridade com o modelo proposto por Wickert et al. (2021), por aspectos abordados na Tabela 12 e pela definição de elementos e conjuntos, há consideráveis diferenças dentre as definições e modelagens realizadas. A exemplo, as restrições

de proibição de trabalho no dia seguinte a um dia no qual se trabalhou em turno da noite (H6) ou em múltiplos turnos (da manhã/tarde) (H7), além de um número máximo de dias trabalhados para feriados e finais de semana (H10), trouxeram nova variável de decisão. Além disso, o fato do modelo proposto considerar a possibilidade de múltiplos setores dentro de um hospital também é diferença em relação ao modelo base, sendo essa complexidade abordada juntamente com as demais restrições de impossibilidade de mudança entre diferentes hospitais. Outrossim, o fato de que nem todo dia do horizonte de planejamento precisa ter os três turnos e a reformulação de certas restrições fazem com que o presente modelo gere menor número de variáveis de decisão e restrições, quando comparado a modelos anteriores da literatura, além de apresentar maior flexibilidade para realidades médicas que funcionem, por exemplo, em período não integral. Estes últimos dois pontos são exemplos de contribuições do trabalho elaborado, além da presença de um modelo desenvolvido a partir de um estudo de caso, reduzindo o *gap* entre a teoria e a prática.

Com a finalidade de organização, optou-se pela segmentação do capítulo em duas seções para tratar dos diferentes aspectos que compõem a modelagem do problema descrito anteriormente, tanto na versão determinística quanto na versão estocástica.

## 4.1 Modelagem Matemática Determinística

Primeiramente, apresenta-se a seguir a terminologia para a modelagem, com relação à definição de índices e conjuntos, de parâmetros e de variáveis de decisão, seguindo a notação mais comumente aplicada na área (com parâmetros utilizando-se de letras gregas, a exemplo, Wickert et al. (2021)), nas Tabelas 13, 14 e 15, respectivamente.



Tabela 13: Índices e conjuntos da modelagem determinística do PGETM deste trabalho.

Elementos	Descrição
$n \in N$	Em que $n$ é o índice de cada médico e $N$ o conjunto de todos os médicos
$i \in I$	Em que $i$ é o índice de cada dia e $I$ o conjunto de todos os dias
$i \in I^w   I^w \subset I$	Em que $I^w$ é o subconjunto de finais de semana e feriados
$i \in I^n   I^n \subset I$	Em que $I^n$ é o subconjunto de dias que têm o turno da noite
$j \in J_i$	Em que $j$ é o índice de cada turno e $J_i$ é o conjunto dos turnos do dia $i$ ( $j = 1$ indica o turno da manhã, $j = 2$ indica o turno da tarde, $j = 3$ indica o turno da noite )
$k \in K$	Em que $k$ é o índice de cada setor e $K$ o conjunto de todos os setores
$(k', k'') \in L   k', k'' \in K$	Em que $L$ é o conjunto de pares ordenados nos quais um turno realizado no setor $k'$ não pode ser sucedido por turno realizado no setor $k''$ devido à distância geográfica
$(n, k) \in X$	Em que $X$ é o conjunto de indisponibilidades espaciais de médicos $n$ em setores $k$ , por decisão gerencial
$(n, k) \in A$	Em que $A$ é o conjunto dos setores $k$ nos quais o médico $n$ tem preferência por não trabalhar
$(n, i, j) \in Y$	Em que $Y$ é o conjunto de indisponibilidades temporais de médicos $n$ em turnos $j$ e dias $i$ , por questões pessoais
$(n, i, j) \in B$	Em que $B$ é o conjunto de turnos $j$ e dias $i$ em que o médico $n$ tem preferência por não trabalhar

Fonte: O autor.

Tabela 14: Parâmetros da modelagem determinística do PGETM deste trabalho.

Elementos	Descrição
$\delta_{i,j,k} \in \mathbb{Z}_+$	Em que $\delta_{i,j,k}$ é a demanda por médicos no dia $i$ , turno $j$ e setor $k$
$\alpha_r \in \mathbb{Z}_+$	Em que $\alpha_r$ é o valor máximo, mínimo ou ideal para as restrições $r$ de siglas H10, H11, S1, S2, S3 e S4
$\omega_r \in \mathbb{R}_+$	Em que $\omega_r$ é a penalidade pela violação de cada restrição <i>soft</i> $r$ de siglas S1, S2, S3, S4, S5 e S6

Fonte: O autor.

Tabela 15: Variáveis de decisão da modelagem determinística do PGETM deste trabalho.

Variável	Descrição
$x_{n,i,j,k} \in \{0, 1\}$	Assume valor unitário se o médico $n$ trabalha no dia $i$ , no turno $j$ , e no setor $k$ , e valor nulo caso contrário
$m_{n,i} \in \{0, 1\}$	Assume valor unitário se o médico $n$ trabalha no dia $i \in I^w$ , e valor nulo caso contrário
$a_n^{(1)} \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de turnos que o médico $n$ trabalhou a mais do que valor estabelecido pelos gestores como média ideal
$a_n^{(2)} \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de turnos que o médico $n$ trabalhou a menos do que valor estabelecido pelos gestores como média ideal
$b_n^{(1)} \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de turnos que o médico $n$ trabalhou a mais do que valor estabelecido pelos gestores como média ideal em finais de semana e feriados
$b_n^{(2)} \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de turnos que o médico $n$ trabalhou a menos do que valor estabelecido pelos gestores como média ideal em finais de semana e feriados
$c_n \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de turnos que o médico $n$ trabalhou a mais do que valor estabelecido pelos gestores como máximo desejado
$d_n \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de turnos que o médico $n$ trabalhou a menos do que valor estabelecido pelos gestores como mínimo desejado
$e_{n,i,j} \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de alocações que o médico $n$ trabalhou no turno indesejável $j$ do dia $i$
$f_{n,k} \in \mathbb{R}_+$	Variável associada à quantidade de alocações que o médico $n$ trabalhou no setor indesejado $k$

Fonte: O autor.

Com base nessa nomenclatura definida, a subseção seguinte tratará de explicitar as expressões matemáticas que regem o modelo em questão. Convém comentar que as variáveis relacionadas às restrições *soft*, apesar de serem, em rigor, inteiras ( $a_n^{(1)}$ ,  $a_n^{(2)}$ ,  $b_n^{(1)}$ ,  $b_n^{(2)}$ ,  $c_n$ ,  $d_n$ ,  $e_{n,i,j}$ , e  $f_{n,k}$ ), podem ser relaxadas para variáveis reais pela estrutura do problema, a fim de facilitar computacionalmente a resolução do modelo.

#### 4.1.1 Função Objetivo e Restrições do Modelo Matemático Determinístico

Com relação à estrutura desta subseção, optou-se por inicialmente expor a função objetivo e restrições, devidamente enumeradas, e posteriormente discutir o papel de cada expressão na construção do modelo.

Função objetivo:

$$\begin{aligned}
Min \quad & \sum_{n \in N} [\omega_{s1} \cdot (a_n^{(1)} + a_n^{(2)})] + \sum_{n \in N} [\omega_{s2} \cdot (b_n^{(1)} + b_n^{(2)})] + \\
& + \sum_{n \in N} [\omega_{s3} \cdot c_n] + \sum_{n \in N} [\omega_{s4} \cdot d_n] + \\
& + \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} (\omega_{s5} \cdot e_{n,i,j}) + \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} (\omega_{s6} \cdot f_{n,k})
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Restrições:

$$\sum_{n \in N} x_{n,i,j,k} = \delta_{i,j,k}, \quad i \in I, j \in J_i, k \in K \tag{4.2}$$

$$\sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} = 0, \quad (n, i, j) \in Y \tag{4.3}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} x_{n,i,j,k} = 0, \quad (n, k) \in X \tag{4.4}$$

$$\sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} \leq 1, \quad n \in N, i \in I, j \in J_i \tag{4.5}$$

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} \leq 2, \quad n \in N, i \in I^n \tag{4.6}$$

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} \leq 2 \left( 1 - \sum_{k \in K} x_{n,i',3,k} \right), \quad n \in N, i \in I, i' \in I^n : i = i' + 1 \tag{4.7}$$

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i+1,j,k} \leq 2 \left( 2 - \sum_{k \in K} x_{n,i,1,k} - \sum_{k \in K} x_{n,i,2,k} \right), \quad n \in N, \quad i \in I \setminus |I| \quad (4.8)$$

$$\sum_{k \in K} x_{n,i,1,k} + \sum_{k \in K} x_{n,i,2,k} \leq 2 \left( 1 - \sum_{k \in K} x_{n,i,3,k} \right), \quad n \in N, \quad i \in I^n \quad (4.9)$$

$$x_{n,i,1,k'} + x_{n,i,2,k''} \leq 1, \quad n \in N, \quad i \in I, \quad (k', k'') \in L \quad (4.10)$$

$$\sum_{i \in I^w} m_{n,i} \leq \alpha_{H10}, \quad n \in N \quad (4.11)$$

$$\sum_{i \in I^n} \sum_{k \in K} x_{n,i,3,k} \leq \alpha_{H11}, \quad n \in N \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} \leq 2 \cdot m_{n,i}, \quad n \in N, \quad i \in I^w \quad (4.13)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} + a_n^{(2)} = \alpha_{S1} + a_n^{(1)}, \quad n \in N \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in I^w} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} + b_n^{(2)} = \alpha_{S2} + b_n^{(1)}, \quad n \in N \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} \leq \alpha_{S3} + c_n, \quad n \in N \quad (4.16)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} + d_n \geq \alpha_{S4}, \quad n \in N \quad (4.17)$$

$$\sum_{k \in K} x_{n,i,j,k} \leq e_{n,i,j}, \quad (n, i, j) \in B \quad (4.18)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} x_{n,i,j,k} \leq f_{n,k}, \quad (n, k) \in A \quad (4.19)$$

$$x_{n,i,j,k}, \quad m_{n,i} \in \{0, 1\}, \quad n \in N, \quad i \in I, \quad j \in J_i, \quad k \in K \quad (4.20)$$

$$a_n^{(1)}, a_n^{(2)}, b_n^{(1)}, b_n^{(2)}, c_n, d_n, e_{n,i,j}, f_{n,k} \in \mathbb{R}_+, n \in N, i \in I, j \in J_i, k \in K \quad (4.21)$$

A função objetivo (4.1) apresenta a soma de seis termos, associados às penalidades ao se violarem restrições *soft*. A seguir, explicitam-se os termos:

1. A soma  $(a_n^{(1)} + a_n^{(2)})$  representa a quantidade de turnos que um médico faz a mais ou a menos, respectivamente, que o estabelecido como ideal pelos gestores, pensando-se em número médio para a equipe.  $\omega_{s1}$  representa o peso da violação das restrições “S1” ((4.14), explicada mais à frente);
2. A soma  $(b_n^{(1)} + b_n^{(2)})$  representa a quantidade de turnos que um médico faz a mais ou a menos, respectivamente, que o estabelecido como ideal pelos gestores em finais de semana e feriados, pensando-se em número médio para a equipe.  $\omega_{s2}$  representa o peso da violação das restrições “S2” ((4.15), explicada mais à frente);
3. O termo  $c_n$  representa a quantidade de turnos que um médico faz a mais que o estabelecido como máximo desejado pelos gestores da equipe.  $\omega_{s3}$  representa o peso da violação das restrições “S3” ((4.16), explicada mais à frente);
4. O termo  $d_n$  representa a quantidade de turnos que um médico faz a menos que o estabelecido como mínimo desejado pelos gestores da equipe.  $\omega_{s4}$  representa o peso da violação das restrições “S4” ((4.17), explicada mais à frente);
5. O termo  $e_{n,i,j}$  representa as violações de preferências por turnos ocorridas para cada terna  $(n,i,j)$ .  $\omega_{s5}$  representa o peso da violação das restrições “S5” ((4.18), explicada mais à frente);
6. Por fim, o termo  $f_{n,k}$  representa as violações de preferências por setor para cada par  $(n,k)$ .  $\omega_{s6}$  representa o peso da violação das restrições “S6” ((4.19), explicada mais à frente).

Com relação às restrições, tem-se a seguinte explicação para cada uma delas e a relação com as siglas previamente definidas no capítulo anterior, na Tabela 10.

- A expressão (4.2) garante as restrições H1, ou seja, o atendimento da demanda por médicos para cada dia, turno e setor;

- A expressão (4.3) garante as restrições H2, ou seja, a não alocação de um médico em um período no qual ele esteja indisponível;
- A expressão (4.4) garante as restrições H3, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe em um setor que a gerência determinou que ele não tem permissão;
- A expressão (4.5) garante as restrições H4, ou seja, que um médico não seja alocado em mais de um setor em um mesmo período (dia e turno);
- A expressão (4.6) garante as restrições H5, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe mais do que dois turnos em dias que possuem os três turnos;
- A expressão (4.7) garante as restrições H6, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe no dia seguinte se ele trabalhou em um turno da noite no dia anterior. Como observação, caso um médico tenha trabalhado em um turno da noite, o lado direito da restrição se anula, o que faz com que o lado esquerdo também tenha de ser nulo (i.e. não haver trabalho no dia seguinte);
- A expressão (4.8) garante as restrições H7, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe no dia seguinte se ele trabalhou nos turnos da manhã e da tarde no dia anterior. Vale o comentário de que, apesar do lado direito poder resultar em 4 caso o médico não trabalhe nos turnos da manhã e da tarde, as restrições (4.6) limitam o somatório do lado esquerdo a no máximo 2;
- A expressão (4.9) garante as restrições H8, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe no turno da noite e também em outro turno do mesmo dia;
- A expressão (4.10) garante as restrições H9, ou seja, a não permissão de que um médico faça dois turnos seguidos em setores distantes geograficamente;
- A expressão (4.11) garante as restrições H10, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe mais do que o número máximo permitido de finais de semana e feriados;
- A expressão (4.12) garante as restrições H11, ou seja, a não permissão de que um médico trabalhe mais do que o máximo permitido de turnos da noite;
- A expressão (4.13) tem o objetivo de vincular a variável binária  $m_{n,i}$  com a variável binária  $x_{n,i,j,k}$ , ou seja, garantir que, se um médico trabalha em um dia que seja final de semana ou feriado, a variável  $m_{n,i}$  tem valor unitário;

- A expressão (4.14) garante a penalização das restrições S1 (balanceamento do total de turnos trabalhados entre médicos), por meio da determinação dos valores das variáveis  $a_n^{(1)}$  e  $a_n^{(2)}$ , que constam na função objetivo. Restrições relacionadas ao primeiro termo da função objetivo;
- A expressão (4.15) garante a penalização das restrições S2 (balanceamento de turnos trabalhados aos finais de semana e feriados, entre médicos), por meio da determinação dos valores das variáveis  $b_n^{(1)}$  e  $b_n^{(2)}$ , que constam na função objetivo. Restrições relacionadas ao segundo termo da função objetivo;
- A expressão (4.16) garante a penalização das restrições S3 (Máximo de alocações no horizonte de planejamento), por meio da determinação do valor da variável  $c_n$ , que consta na função objetivo. Restrições relacionadas ao terceiro termo da função objetivo;
- A expressão (4.17) garante a penalização das restrições S4 (Mínimo de alocações no horizonte de planejamento), por meio da determinação do valor da variável  $d_n$ , que consta na função objetivo. Restrições relacionadas ao quarto termo da função objetivo;
- A expressão (4.18) garante a penalização das restrições S5 (Preferências de médicos por certos turnos e dias), por meio da determinação do valor da variável  $e_{n,i,j}$ , que consta na função objetivo. Restrições relacionadas ao quinto termo da função objetivo;
- A expressão (4.19) garante a penalização das restrições S6 (Preferências de médicos por certos setores), por meio da determinação do valor da variável  $f_{n,k}$ , que consta na função objetivo. Restrições relacionadas ao primeiro sexto da função objetivo;
- As expressões (4.20) e (4.21) estabelecem o domínio das variáveis de decisão do modelo. Reitera-se que, em rigor, as variáveis relacionadas às restrições *soft* são inteiras ( $a_n^{(1)}$ ,  $a_n^{(2)}$ ,  $b_n^{(1)}$ ,  $b_n^{(2)}$ ,  $c_n$ ,  $d_n$ ,  $e_{n,i,j}$ ,  $f_{n,k}$ ), porém, pela construção do modelo, pode-se realizar a relaxação para variáveis reais positivas, com o intuito de reduzir o tempo computacional.

Com relação às restrições que representam novidades ou adaptações interessantes em relação a trabalhos anteriores, encontram-se as estruturas das expressões (4.7) - (4.9), que são capazes de expressar as restrições correspondentes sem a necessidade de geração de variáveis auxiliares, que tornariam o modelo potencialmente mais lento.

Com isso, finaliza-se a modelagem do PGETM determinístico, que será discutida no Capítulo 5, em termos dos métodos de resolução, validação e a realização de estudo de caso com base em dados reais e testes computacionais para verificação da eficiência computacional do modelo. Ademais, a próxima seção se dedica a estabelecer a modelagem estocástica do mesmo problema, com a incorporação de incerteza em parâmetros e apresentar o modelo equivalente determinístico, a fim de que seja possível realizar também comparação entre os resultados obtidos em cada abordagem.

## 4.2 Modelagem Matemática Estocástica

Com relação à versão estocástica do PGETM, tem-se inicialmente a diferença de que a demanda de cada uma das alocações (dia, turno e setor) não mais é determinada previamente, mas sim um valor incerto, porém com a suposição de conhecimento de aspectos das possibilidades de realização de tais valores.

Para a modelagem desta incerteza, a abordagem escolhida é a de Programação Estocástica de Dois Estágios com Recurso, previamente revisada na Seção 2.7, na qual os recursos (para cada realização de cenário  $s$ ) utilizados são o de chamar, de maneira emergencial, médicos terceiros para satisfazer a demanda caso ela seja maior do que a quantidade inicialmente utilizada para alocar os membros da equipe, ou ter médicos ociosos caso ocorra o oposto. Uma vez utilizada tal abordagem, é necessária a determinação, em um primeiro momento, de quantos e quais médicos serão inicialmente escolhidos para cada alocação. Já em momento posterior, ao se saber a demanda que de fato está em vigor, há a necessidade de determinação de quantos médicos terceiros são necessários em cada alocação. Dentro desse problema, há então, além das necessidades de minimização das penalidades relacionadas às restrições *soft*, também custos de inconveniência relacionados à contratação dos médicos terceiros e também pela ociosidade dos membros da equipe médica (caso o número de médicos alocados exceda a real demanda).

O fato de que há usualmente poucas possibilidades de realização do parâmetro de demanda, que passa de  $\delta_{i,j,k}$  a  $\varphi_{s,i,j,k}$ , é uma justificativa adicional para o uso de tal abordagem. Ainda assim, há uma discussão acerca da maneira de se realizar a abordagem de cenários, uma vez que a quantidade de parâmetros incertos é determinada pela quantidade de alocações existentes. Por exemplo, uma realidade com horizonte de planejamento de 30 dias, com 3 turnos para cada dia e 3 setores teria 270 parâmetros de demanda. Ainda dentro do exemplo, caso cada parâmetro tivesse 2 valores representativos possíveis, a quantidade de cenários a serem gerados seria de  $2^{270} = 1,897 \cdot 10^{81}$  e um número ainda



maior de variáveis e restrições a serem geradas (no caso de ter de chamar médicos terceiros ou de haver médicos ociosos), o que tornaria o problema inviável do ponto de vista computacional. Mostra-se então necessária a adoção de um procedimento para agrupar as alocações de maneira a diminuir a quantidade de cenários existentes, sem com isso perder representatividade do caso real. Como comentário, na literatura é comum a utilização de técnicas de amostragem para a geração de cenários (quando há dados prévios suficientes). No caso deste estudo, por não haver grande quantidade de dados prévios, tais técnicas não foram utilizadas.

Uma das maneiras possíveis, e a adotada a fim de estabelecer uma estratégia de lidar com a incorporação de incertezas que seja adaptável para outras realidades médicas de complexidade similar, a fim de que haja possibilidade de extensão dos conhecimentos gerados ao longo desse estudo, é a de utilizar o agrupamento das alocações por meio de grupos representativos, assumindo que, dentro de cada cenário possível, o valor da demanda para todas as alocações pertencentes a um mesmo grupo seja igual. A divisão deve ser feita de modo que entre dois grupos distintos a intersecção seja nula, e também de modo que a união dos grupos englobe todas as alocações existentes no horizonte de planejamento, ou seja, grupos mutuamente exclusivos e coletivamente exaustivos. As Figuras 7 e 8 retratam essa abordagem, ilustrando para um caso simplificado no qual o horizonte de planejamento é de 7 dias, com 3 turnos de segunda a sexta e 2 turnos de sábado e domingo, e há 2 setores (totalizando 38 alocações), conforme Tabela 16. Reitera-se que se trata de um artifício de modelagem com a finalidade de enxugar o número de cenários, evitando intratabilidade do modelo em termos computacionais.

Tabela 16: Cenário escolhido para explicação da abordagem adotada para simplificação dos cenários mais representativos.

Setor	Turno/Dia da Semana	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
Setor 1	Manhã	$\varphi_{s,1,1,1}$	$\varphi_{s,2,1,1}$	$\varphi_{s,3,1,1}$	$\varphi_{s,4,1,1}$	$\varphi_{s,5,1,1}$	$\varphi_{s,6,1,1}$	$\varphi_{s,7,1,1}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,1}$	$\varphi_{s,2,2,1}$	$\varphi_{s,3,2,1}$	$\varphi_{s,4,2,1}$	$\varphi_{s,5,2,1}$	$\varphi_{s,6,2,1}$	$\varphi_{s,7,2,1}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,1}$	$\varphi_{s,2,3,1}$	$\varphi_{s,3,3,1}$	$\varphi_{s,4,3,1}$	$\varphi_{s,5,3,1}$	-	-
Setor 2	Manhã	$\varphi_{s,1,1,2}$	$\varphi_{s,2,1,2}$	$\varphi_{s,3,1,2}$	$\varphi_{s,4,1,2}$	$\varphi_{s,5,1,2}$	$\varphi_{s,6,1,2}$	$\varphi_{s,7,1,2}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,2}$	$\varphi_{s,2,2,2}$	$\varphi_{s,3,2,2}$	$\varphi_{s,4,2,2}$	$\varphi_{s,5,2,2}$	$\varphi_{s,6,2,2}$	$\varphi_{s,7,2,2}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,2}$	$\varphi_{s,2,3,2}$	$\varphi_{s,3,3,2}$	$\varphi_{s,4,3,2}$	$\varphi_{s,5,3,2}$	-	-

Fonte: O autor.

Figura 7: Esquematização do agrupamento das alocações de um horizonte de planejamento em grupos.

Setor	Turno/Dia da Semana	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
Setor 1	Manhã Grupo 1	$\varphi_{s,1,1,1}$	$\varphi_{s,2,1,1}$	$\varphi_{s,3,1,1}$	$\varphi_{s,4,1,1}$	$\varphi_{s,5,1,1}$	$\varphi_{s,6,1,1}$	$\varphi_{s,7,1,1}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,1}$	$\varphi_{s,2,2,1}$	$\varphi_{s,3,2,1}$	$\varphi_{s,4,2,1}$	$\varphi_{s,5,2,1}$	$\varphi_{s,6,2,1}$	$\varphi_{s,7,2,1}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,1}$	$\varphi_{s,2,3,1}$	$\varphi_{s,3,3,1}$	$\varphi_{s,4,3,1}$	$\varphi_{s,5,3,1}$	- Grupo 3 -	
Setor 2	Manhã Grupo 2	$\varphi_{s,1,1,2}$	$\varphi_{s,2,1,2}$	$\varphi_{s,3,1,2}$	$\varphi_{s,4,1,2}$	$\varphi_{s,5,1,2}$	$\varphi_{s,6,1,2}$	$\varphi_{s,7,1,2}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,2}$	$\varphi_{s,2,2,2}$	$\varphi_{s,3,2,2}$	$\varphi_{s,4,2,2}$	$\varphi_{s,5,2,2}$	$\varphi_{s,6,2,2}$	$\varphi_{s,7,2,2}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,2}$	$\varphi_{s,2,3,2}$	$\varphi_{s,3,3,2}$	$\varphi_{s,4,3,2}$	$\varphi_{s,5,3,2}$	- Grupo 4 -	

Fonte: O autor.

Figura 8: Esquematização do tratamento da demanda como igual para todas as alocações de um mesmo grupo.

Setor	Turno/Dia da Semana	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	
Setor 1	Manhã	Mesma demanda $\varphi_{s,i,j,k}$ para todas as alocações do Grupo 1					Mesma demanda $\varphi_{s,i,j,k}$ para todas as alocações do Grupo 3		
	Tarde						-		-
	Noite						-		-
Setor 2	Manhã	Mesma demanda $\varphi_{s,i,j,k}$ para todas as alocações do Grupo 2					Mesma demanda $\varphi_{s,i,j,k}$ para todas as alocações do Grupo 4		
	Tarde						-		-
	Noite						-		-

Fonte: O autor.

Utilizando-se de tal estratégia, supondo neste exemplo 2 valores possíveis para o parâmetro de demanda de cada alocação, reduz-se a quantidade de cenários possíveis de  $2^{38} = 2.749 \cdot 10^{11}$  para  $2^4 = 16$ . Com isso, definem-se os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão adicionais na Tabela 17.

Tabela 17: Índices, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão adicionais da modelagem estocástica do PGETM deste trabalho.

Elementos e Conjuntos	Descrição
$s \in S$	Em que $s$ é o índice de cada cenário de realização do vetor de incertezas e $S$ o conjunto de todos os cenários possíveis
$g \in G$	Em que $g$ é o índice de cada agrupamento de alocações e $G$ o conjunto de todos os agrupamentos
$(i,j,k) \in \Theta_g$	Em que $\Theta_g$ é o conjunto de alocações $(i,j,k)$ pertencentes ao grupo $g$
Parâmetros	Descrição
$\varphi_{s,i,j,k} \in Z_+$	Em que $\varphi_{s,i,j,k}$ é a realização da demanda para cada cenário $s$ , para o dia $i$ , turno $j$ e setor $k$
$\omega_{y1} \in R_+$	Em que $\omega_{y1}$ é o custo relacionado à necessidade de se contratar um médico terceiro para satisfazer a demanda de uma alocação
$\omega_{y2} \in R_+$	Em que $\omega_{y2}$ é o custo relacionado à ociosidade de um médico da equipe em uma determinada alocação
$P_s \in [0, 1]$	Probabilidade de ocorrência do cenário $s$ , com $\sum_{s \in S} P_s = 1$
Variáveis de Segundo Estágio	Descrição
$y_{s,i,j,k}^{(1)} \in \mathbb{R}_+$	Variável que quantifica o número de médicos terceiros a serem chamados no cenário $s$ para trabalhar no dia $i$ , turno $j$ e setor $k$
$y_{s,i,j,k}^{(2)} \in \mathbb{R}_+$	Variável que quantifica o número de médicos ociosos no cenário $s$ alocados para trabalhar no dia $i$ , turno $j$ e setor $k$

Fonte: O autor.

Todas as definições dos conjuntos, variáveis e parâmetros do Modelo Determinístico se mantém iguais, com exceção do parâmetro de demanda  $(\delta_{i,j,k})$ . Com base nessa nomenclatura definida, a subseção seguinte tratará de apresentar as expressões matemáticas que regem o modelo agora em sua versão estocástica, explicitando os aspectos que se mantêm do modelo determinístico e os que são modificados. Por fim, há o comentário de que, assim como foi possível fazer no modelo determinístico, essas duas variáveis, apesar de serem inicialmente inteiras, podem ser relaxadas a reais pela estrutura das restrições.

#### 4.2.1 Função Objetivo e Restrições do Modelo Matemático Estocástico

Para evitar repetir a parcela da função objetivo e as restrições que se mantêm do modelo determinístico, utiliza-se a nomenclatura das equações e inequações deste mesmo capítulo. Serão apresentadas duas versões do modelo, uma primeira sem a utilização

da estratégia de agrupamento, e uma segunda com o uso dessa estratégia. Assim, para caracterizar a função objetivo e as restrições matemáticas do modelos em questão, tem-se:

Função objetivo:

$$\begin{aligned}
Min \quad & \sum_{n \in N} [\omega_{s1} \cdot (a_n^{(1)} + a_n^{(2)})] + \sum_{n \in N} [\omega_{s2} \cdot (b_n^{(1)} + b_n^{(2)})] + \\
& + \sum_{n \in N} [\omega_{s3} \cdot c_n] + \sum_{n \in N} [\omega_{s4} \cdot d_n] + \\
& + \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} (\omega_{s5} \cdot e_{n,i,j}) + \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} (\omega_{s6} \cdot f_{n,k}) + \\
& + \sum_{s \in S} P_s \left[ \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} \omega_{y1} \cdot y_{s,i,j,k}^{(1)} + \omega_{y2} \cdot y_{s,i,j,k}^{(2)} \right] \tag{4.22}
\end{aligned}$$

Restrições:

$$\sum_{n \in N} x_{n,i,j,k} + y_{s,i,j,k}^{(1)} = \varphi_{s,i,j,k} + y_{s,i,j,k}^{(2)}, \quad i \in I, \quad j \in J_i, \quad k \in K, \quad s \in S \tag{4.23}$$

$$(4.3) - (4.21)$$

$$y_{s,i,j,k}^{(1)}, \quad y_{s,i,j,k}^{(2)} \geq 0, \quad i \in I, \quad j \in J_i, \quad k \in K, \quad s \in S \tag{4.24}$$

Com relação à função objetivo, enquanto que os seis termos iniciais da função objetivo se mantêm os mesmos, referindo-se às decisões do primeiro estágio, o último dos somatórios traz o valor esperado da realização dos cenários de incertezas, por meio da probabilidade de ocorrência de cada cenário e contabilizando os custos de inconveniência associados à contratação de médicos terceiros e à ociosidade dos médicos integrantes da equipe em cada uma das alocações do horizonte de planejamento.

Já em termos das restrições, observa-se que as restrições (4.23), que substituem as restrições (4.2) do modelo determinístico, garantem a satisfação da demanda para cada uma das realizações dos cenários de incerteza, ao mesmo tempo que contabilizam (por meio da variável  $y_{s,i,j,k}^{(1)}$ ) a quantidade de médicos terceiros a serem contratados para cada caso possível e também contabilizam (por meio da variável  $y_{s,i,j,k}^{(2)}$ ) o número de médicos ociosos em cada caso. As demais restrições do modelo determinístico, (4.3) - (4.21), excetuando-se as restrições (4.2), que envolvem o parâmetro determinístico de demanda, são mantidas no modelo em questão. Finalmente, as restrições (4.24) garantem o domínio

das novas variáveis do modelo.

Como observação relevante, tem-se que, utilizando a abordagem de agrupamento de alocações, na qual há grupos representativos que uniformizam a demanda dentro das alocações de cada grupo, se faria necessária a utilização dos conjuntos  $\Theta_g$  e  $G$ , e o modelo ficaria o seguinte:

Função objetivo:

$$\begin{aligned}
Min \quad & \sum_{n \in N} [\omega_{s1} \cdot (a_n^{(1)} + a_n^{(2)})] + \sum_{n \in N} [\omega_{s2} \cdot (b_n^{(1)} + b_n^{(2)})] + \\
& + \sum_{n \in N} [\omega_{s3} \cdot c_n] + \sum_{n \in N} [\omega_{s4} \cdot d_n] + \\
& + \sum_{n \in N} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} (\omega_{s5} \cdot e_{n,i,j}) + \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} (\omega_{s6} \cdot f_{n,k}) + \\
& + \sum_{s \in S} P_s \left[ \sum_{g \in G} \sum_{(i,j,k) \in \Theta_g} \omega_{y1} \cdot y_{s,i,j,k}^{(1)} + \omega_{y2} \cdot y_{s,i,j,k}^{(2)} \right] \tag{4.25}
\end{aligned}$$

Restrições:

$$\sum_{n \in N} x_{n,i,j,k} + y_{s,i,j,k}^{(1)} = \varphi_{s,i,j,k} + y_{s,i,j,k}^{(2)}, \quad i \in I, j \in J_i, k \in K, s \in S, g \in G, (i,j,k) \in \Theta_g \tag{4.26}$$

$$(4.3) - (4.21)$$

$$y_{s,i,j,k}^{(1)}, y_{s,i,j,k}^{(2)} \geq 0, \quad i \in I, j \in J_i, k \in K, s \in S, g \in G, (i,j,k) \in \Theta_g \tag{4.27}$$

Além de mudança na função objetivo, que passa a considerar as alocações pertencentes a cada grupo representativo, as restrições (4.26) garantem que, para todas as alocações de um grupo em questão, a demanda será a mesma em um determinado cenário. Na implementação do modelo, foram utilizadas estas restrições, conforme previamente justificado. Vale o comentário de que, no caso limite que cada grupo de alocações possua apenas uma alocação (cada conjunto  $(i,j,k)$  sendo um grupo distinto), o problema coincide com sua versão sem considerar o agrupamento de demandas. Postos ambos os modelos, passa-se para as etapas de geração de testes e obtenção de resultados, em ambas as versões, a fim de verificação da aplicação em caso real, eficácia e eficiência.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados e análises do trabalho está dividida em, além desta introdução geral, mais duas seções, na mesma lógica de separação do capítulo anterior, com finalidades de manter maior clareza.

Conforme discutido na revisão da literatura, a maior parte dos trabalhos da área de PGETM, diferentemente da área de alocação de enfermeiros, apresenta métodos exatos de resolução do problema, utilizando-se de *softwares* específicos capazes de aplicação de múltiplas técnicas durante o processo de otimização. Dentre as diversas opções de *solvers* de excelência, optou-se por escolha da utilização do *software Gurobi* para a modelagem e resolução do problema, focando-se na otimização.

O *Gurobi* é capaz de integrar de maneira eficiente diversas técnicas de resolução de um problema de PLIM, aprimorando com base no método *Branch-and-Cut*, utilizando-se de recursos, como por exemplo, o pré-processamento de variáveis, algoritmos de planos de corte e heurísticas (GUROBI, 2020). Para este trabalho, os recursos foram deixados no *default* do otimizador.

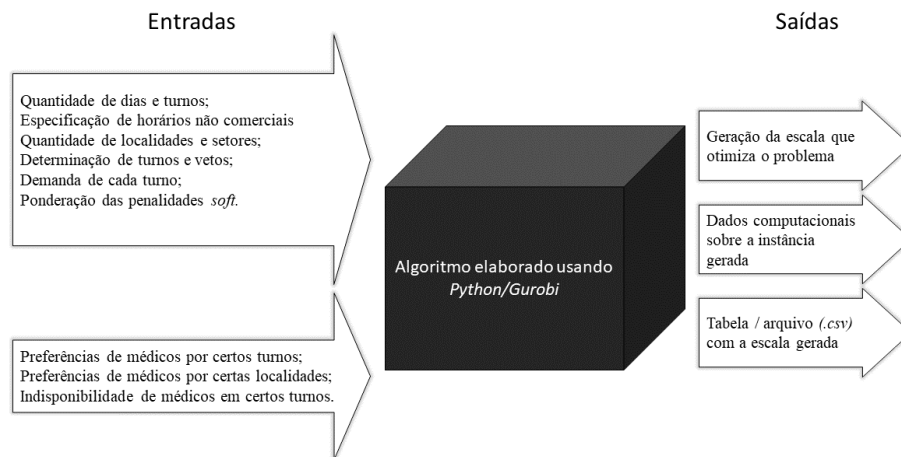
Previamente a se iniciarem as seções e subseções, faz-se a consideração de que, para a obtenção de todas as informações contidas nesse capítulo, utilizou-se de codificação elaborada na linguagem *Python 3*, uma vez que possui interface com o *solver* de escolha (*Gurobi*) e diversas bibliotecas para facilitação da interpretação de dados, exibição de tabelas e importação/exportação de dados em arquivos de *Excel*.

Com relação à entrada de dados, optou-se por realizar a leitura de arquivos do tipo (*comma separated values .csv*) por meio de dois tipos de arquivo base em *Excel*. O primeiro coleta informações para estabelecimento do cenário em termos de horizonte de planejamento, turnos, demanda, médicos disponíveis, restrições gerenciais de setores e parâmetros do sistema. Já o segundo, coleta, para cada médico, o conjunto de preferências e indisponibilidades que entrarão no modelo e permitirão a construção da escala de trabalho que seja factível e minimize a violação de restrições *soft*.

A partir desses dados, o programa faz a definição dos elementos, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão do modelo e realiza a etapa de otimização, utilizando-se dos recursos evidenciados anteriormente. Caso o modelo seja factível, exibe-se a solução encontrada, organizada em formato de tabela e exporta-se um arquivo no formato *.csv* com a solução.

Além disso, captura-se um conjunto de dados computacionais a serem compilados na seção de resultados, como o tempo computacional, número de variáveis totais, número de variáveis inteiras, número de restrições, valor da função objetivo, tempo computacional e *gap* de otimalidade. A Figura 9 mostra, de maneira esquemática, a relação entre entradas e saídas do programa elaborado, para cada um dos casos relevantes.

Figura 9: Relação entre entradas e saídas do programa elaborado.



Fonte: O autor.

Ao longo deste capítulo, para cada caso proposto, será feita clara categorização dos valores adotados de cada parâmetro, mostrando a diferença entre cada fator analisado. Entretanto, como há regularidade dos valores do parâmetro de pesos relativos às violações de restrições *soft* (S1-S6) em todas as instâncias testadas, optou-se por deixar explicitados os valores e etapas intermediárias do método AHP adotado para realizar a comparação das importâncias de cada restrição duas a duas, a partir de *insights* dos coordenadores de grupos médicos. A Tabela 18 retoma as restrições do problema, vistas inicialmente no Capítulo 3, enquanto a Tabela 19 explicita as comparações realizadas e o valor final da ponderação de cada peso.

Tabela 18: Relação entre restrições *soft* contempladas no PGETM e suas siglas.

Critério	Sigla
Balanceamento de total de turnos trabalhados entre médicos	S1
Balanceamento de turnos trabalhados aos finais de semana e feriados	S2
Máximo de alocações no horizonte de planejamento	S3
Mínimo de alocações no horizonte de planejamento	S4
Preferências temporais de médicos por certos turnos	S5
Preferências de médicos por certos setores	S6

Fonte: O autor.

Tabela 19: Comparação das importâncias das restrições via AHP e ponderação final dos pesos atribuídos.

Critérios AHP	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Soma	Normalização
S1	1,00	3,00	5,00	5,00	0,14	0,20	14,34	17,4%
S2	0,33	1,00	3,00	3,00	0,14	0,20	7,68	9,3%
S3	0,20	0,33	1,00	3,00	0,20	0,33	5,07	6,1%
S4	0,20	0,33	0,33	1,00	0,14	0,14	2,15	2,6%
S5	7,00	7,00	5,00	7,00	1,00	5,00	32,00	38,8%
S6	5,00	5,00	3,00	7,00	0,20	1,00	21,20	25,7%
Total	13,73	16,67	17,33	26,00	1,83	6,88	82,44	100%

Fonte: O autor.



Como comentário final, explicitam-se as seguintes características do computador e dos programas que foram utilizados para a execução de todos os resultados da Seção 5.1 deste trabalho:

- Processador: *Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @3.6GHz*
- Memória (*RAM*): 8,00 GB
- Tipo de sistema: 64 *bits*, processador com base em x64
- Sistema operacional: *Windows 10*
- *IDE*: *Spyder - Python 3.6*
- *Gurobi*: versão 9.1.2 - v9.1.2 rc0

Para os testes da Seção 5.2, a maior complexidade do modelo foi explorada em um computador com as seguintes características:

- Processador: *12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700 @ 2.10 GHz*
- Memória (*RAM*): 16,00 GB
- Tipo de sistema: 64 *bits*, processador com base em x64
- Sistema operacional: *Windows 10*
- *IDE*: *Spyder - Python 3.10*
- *Gurobi*: versão 10.0.1 - v10.0.1 rc0

## 5.1 Resultados e Análises do Modelo Matemático Determinístico

Em termos estruturais, a fim de máxima clareza, esta seção, baseada no modelo determinístico proposto na Seção 4.1, está dividida em três subseções, a fim de coletar resultados sobre, respectivamente:

- Validação e exemplificação da modelagem proposta a partir de cenário teste com respostas previsíveis - com o objetivo de assegurar-se que o modelo está computacionalmente respondendo de acordo e refletindo o esperado na prática, tal como uma

exemplificação de como pode-se comparar o valor de uma solução manual com a solução otimizada do problema;

- Verificação da aplicabilidade do modelo a partir de um cenário real e dados coletados com a equipe médica - com o objetivo de comprovar que, para casos reais da realidade estudada, o modelo é capaz de chegar à solução ótima em tempos aceitáveis, podendo gerar *insights* para gestores médicos;
- Teste da escalabilidade computacional do modelo a partir da geração de dados baseados em instâncias geradas artificialmente - com o objetivo de avaliar a eficiência do modelo a fim de comprovar se a estrutura do modelo, com menos variáveis auxiliares do que modelos similares da literatura, permite que cenários práticos fidedignos mais complexos também sejam otimizados em tempos aceitáveis.

Assim sendo, passa-se para a etapa de validação, considerando os objetivos de verificar o funcionamento interno de todos os aspectos mencionados.

### 5.1.1 Validação da Modelagem Determinística

A fim de verificar se a programação implementada estava de acordo com as premissas adotadas, criou-se uma realidade fictícia com grande número de restrições e poucos cenários viáveis, fáceis de se verificar o número de violações existentes. Inicialmente, observa-se o padrão de demanda na Tabela 20, juntamente à explicitação do número de dias do horizonte de planejamento (nas colunas) e de turnos de cada dia e setores (nas linhas). Para esse caso, tem-se como base o mês de Novembro de 2022 e que os dias 2, 5 e 6 são feriados ou finais de semana (informações relevantes para a criação da escala otimizada). Os números nas células representam a demanda para cada alocação considerada.

Tabela 20: Constituição das demandas da Validação da Modelagem Determinística.

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor ↓	Turno	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda
Setor X	Manhã	2	2	2	2	1	1	2
	Tarde	2	2	2	2	1	1	2
	Noite	2	2	2	2	0	0	2
Setor Y	Manhã	3	3	3	3	1	1	3
	Tarde	3	3	3	3	1	1	3
	Noite	3	3	3	3	0	0	3

Fonte: O autor.

A partir desse cenário, para um número de médicos de 20, identificados de “A” a “T”, então, estabeleceram-se e modelaram-se as seguintes restrições, com as respectivas siglas presentes na Tabela 10, a fim de verificar o funcionamento do modelo (em negrito as restrições *hard*):

- O médico A tem preferência por não trabalhar no Setor Y (Restrição S6);
- O médico I tem preferência por não trabalhar no Setor X (Restrição S6);
- **Os médicos B à H estão vetados de trabalhar no Setor Y (Restrição H3);**
- **Os médicos J à T estão vetados de trabalhar no Setor X (Restrição H3);**
- **Os médicos E à H e O à T não podem trabalhar em nenhum dos turnos do dia 1 (Terça) (Restrição H2);**
- **Os médicos A à D e I à N não podem trabalhar em nenhum dos turnos do dia 2 (Quarta) (Restrição H2);**
- Os médicos A, B, I, J e K não querem trabalhar na noite do dia 1 (Terça) (Restrição S5);
- **Os médicos A, B, L e M não podem trabalhar em nenhum dos turnos do dia 5 (Sábado) (Restrição H2);**
- Os médicos J e K não querem trabalhar em nenhum dos turnos dos dias 5 e 6 (Sábado e Domingo) (Restrição S5);
- Os médicos E, F, O, P e Q não querem trabalhar no turno da noite do dia 2 (Quarta) (Restrição S5).

Com base nessas condições artificiais e no estabelecimento dos valores para os limites das restrições (parâmetro  $\alpha$ ) na Tabela 21, fez-se uma alocação manual dos 20 médicos dentro do horizonte de planejamento, de maneira semelhante à atividade que gestores médicos realizam, isto é, com base em tentativa e erro até que se chegue a uma solução que seja factível, procurando satisfazer preferências, porém sem a utilização de método específico ou garantia de otimalidade. Também se calculou o valor da soma das penalidades existentes (valor da função objetivo) para essa resposta (tanto manualmente quanto posteriormente inserindo no código essa solução), na expectativa de comparar com a solução após otimização, verificando se a escala que foi feita manualmente de fato é a ótima ou se há solução ligeiramente distinta que apresente menor valor da função objetivo enquanto

satisfaz todas as restrições *hard*. A Tabela 22 traz tal alocação. Após utilizar o código elaborado e a otimização, chega-se à seguinte escala, na Tabela 23.

Tabela 21: Valores dos parâmetros  $\alpha$  no cenário de validação do modelo determinístico.

Parâmetro	Valor do parâmetro
$\alpha_{H10}$	1
$\alpha_{H11}$	2
$\alpha_{S1}$	4
$\alpha_{S2}$	1
$\alpha_{S3}$	6
$\alpha_{S4}$	1

Fonte: O autor.

Tabela 22: Escala feita manualmente para validação do Modelo Determinístico.

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor ↓	Turno	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda
Setor X	Manhã	A,B	E,F	C,D	G,H	A	C	E,F
	Tarde	A,B	E,F	C,D	G,H	B	D	E,F
	Noite	C,D	G,H	A,B	E,F	-	-	G,H
Setor Y	Manhã	I,J,K	O,P,Q	L,M,N	R,S,T	L	N	O,P,Q
	Tarde	I,J,K	O,P,Q	L,M,N	R,S,T	M	I	O,P,Q
	Noite	L,M,N	R,S,T	I,J,K	O,P,Q	-	-	R,S,T
Valor da Função Objetivo		1,869						

Fonte: O autor.

Tabela 23: Escala otimizada para validação do Modelo Determinístico.

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor ↓	Turno	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda
Setor X	Manhã	A,B	E,F	C,D	G,H	A	C	B,F
	Tarde	A,B	E,F	C,D	G,H	B	D	A,G
	Noite	C,D	G,H	A,B	E,F	-	-	C,D
Setor Y	Manhã	I,J,K	O,P,Q	J,K,L	R,S,T	L	N	I,O,R
	Tarde	I,J,K	O,P,Q	J,K,L	R,S,T	M	I	L,M,O
	Noite	L,M,N	R,S,T	I,M,N	O,P,Q	-	-	K,S,T
Valor da Função Objetivo		1,173						

Fonte: O autor.

Observa-se que, de fato, a solução, apesar de se assemelhar muito com a feita manu-

almente, apresenta um melhor balanceamento de carga de trabalho (vide, por exemplo, as alocações na segunda-feira), ao mesmo tempo que também não viola restrições *hard* do problema e minimiza a violação de restrições *soft*. O valor da função objetivo ser menor vai de acordo com essa observação. Com isso, observa-se que a modelagem estabelecida está a responder de acordo, podendo-se assim passar para as subseções seguintes do capítulo.

### 5.1.2 Verificação da Aplicabilidade do Modelo Determinístico a Partir de Estudo de Caso

Com relação à averiguação da aplicabilidade do modelo, utilizou-se um cenário real, de grupo hospitalar que opera em três setores distintos na cidade de São Paulo e concordou em fornecer os dados para as recomendações e necessidades das gestoras, tal como valores para ajuste dos parâmetros e penalidades relacionadas à violação de restrições *soft*. Além disso, cada médico completou, dentro de *templates* em *Excel*, em quais setores e turnos está disponível e em quais turnos tem preferências por não trabalhar (Figura 10).

O grupo em questão, conforme explicitado anteriormente, é composto por 21 médicos da especialidade de ginecologia, e opera nos períodos da manhã e tarde, de segunda a sábado, conforme descrito na Tabela 24, e com necessidades de médicos segundo cada alocação, conforme a Tabela 25 (trazidos apenas os primeiros sete dias do mês de novembro de 2022, os demais seguem o padrão, isto é, toda terça-feira repetirá a demanda do dia 1 e assim sucessivamente). Como observação, uma vez que, neste caso, cada hospital só possui um setor possível para a especialidade de ginecologia, pode-se considerar cada setor como sendo um hospital.

Figura 10: Exemplo de *template* de coleta de preferências de cada médico para Estudo de Caso.

1- Inicialmente, preencher o nome que deseja que apareça na escala de trabalho para se referir a você;			
Nome a aparecer na escala de trabalho (Nome social):			
2- Preencher, na tabela 1 quais as localidades que tem preferência de trabalhar, dentre as apresentadas:			
a) Gostaria de trabalhar nessa localidade;			
b) Não gostaria de trabalhar nessa localidade;			
<b>Tabela 1: Preferências por localização</b>			
Hospital ↓	Comentário		
Hospital A	a) Gostaria de trabalhar nessa localidade;		
Hospital B	a) Gostaria de trabalhar nessa localidade;		
Hospital C	a) Gostaria de trabalhar nessa localidade;		
3- Preencher, na tabela 2, quais os dias da semana e turnos em que está:			
a) Indisponível - não há possibilidade de trabalhar no período;			
b) Disponível, porém não desejo trabalhar no período;			
c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.			
A tabela 2 gerará os dados da tabela 3 de maneira automática, com base em uma semana padrão.			
<b>Tabela 2: Entrada de dados semanais</b>			
Período do dia ↓	Dia da semana → / Hospital ↓	Segunda	Sábado
Manhã	Hospital A	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	Não há serviço nesse período
	Hospital B	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	Não há serviço nesse período
	Hospital C	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.
Tarde	Hospital A	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	Não há serviço nesse período
	Hospital B	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	Não há serviço nesse período
	Hospital C	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	Não há serviço nesse período
4- Realizar ajustes na tabela 3 caso haja divergência para certos turnos;			
Modificar valores diretamente na tabela 3, isso irá sobrepor as considerações da tabela 2, para os turnos em questão.			
Exemplos: "Na primeira semana, não posso trabalhar na terça";			
"Estarei indisponível do dia 10-20 do mês em questão."			
<b>Tabela 3: Entrada de dados mensais</b>			
Dia de Setembro →		1	30
Período do dia ↓	Dia da semana → / Hospital ↓	Terça	Quarta
Manhã	Hospital A	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.
	Hospital B	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.
	Hospital C	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.
Tarde	Hospital A	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.
	Hospital B	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.
	Hospital C	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.	c) Disponível e gostaria de trabalhar no período selecionado.

Fonte: O autor.

Tabela 24: Caracterização do cenário prático do trabalho.

Aspecto	Comentário
Número de Médicos	21
Demanda	Segundo Tabela 25
Horizonte de planejamento	30 dias
Número de Turnos	2 turnos, sendo, respectivamente, manhã e tarde
Número de Setores	1 setor em cada hospital: H1, H2 e H3
Vetos de setores	Não há nenhum veto por parte das gestoras
Valores para os parâmetros $\alpha_{H10}, \alpha_{H11}, \alpha_{S1}, \alpha_{S2}, \alpha_{S3}, \alpha_{S4},$	Definidos pelas gestoras, atribuídos os valores respectivos 2, 0, 6, 1, 9, 3

Fonte: O autor.

Tabela 25: Constituição do Cenário de Demandas determinístico do Estudo de Caso realizado em rede hospitalar de São Paulo.

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor (Hospital) ↓	Turno	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo	Segunda
H1	Manhã	1	1	1	1	1	0	1
	Tarde	1	1	1	1	0	0	1
H2	Manhã	1	1	1	1	0	0	1
	Tarde	1	1	1	1	0	0	1
H3	Manhã	1	1	1	1	0	0	1
	Tarde	1	1	1	1	0	0	1

Fonte: O autor.

Assim, com base na entrada de informações por parte de cada um dos membros da equipe médica, tal como das gestoras, em termos dos valores adequados para os parâmetros do modelo, chega-se à seguinte escala otimizada, na Figura 11 (trazida apenas a primeira semana para facilitação de visualização) e o detalhamento da contabilização de violações de restrições *soft*, na Tabela 26, com os seguintes dados relevantes sobre a instância em questão:

- **Nº Variáveis Totais:** 4767;
- **Nº Variáveis Inteiras:** 3486;
- **Nº Restrições:** 3828;

- **Valor da Função Objetivo:** 24,732;
- **Tempo de Execução:** 0,1815 segundos;
- **Gap:** 0,0

Figura 11: Escala que otimiza cenário observado no Estudo de Caso do trabalho.

Setor (Hospital)	Turno	Dias						
		1 (Terça)	2 (Quarta)	3 (Quinta)	4 (Sexta)	5 (Sábado)	6 (Domingo)	7 (Segunda)
H1	Manhã	Ana Flávia C.	Janaina	Danielle A.	Laura M.	André		Rafael L.
	Tarde	Giuliana A.	Liliane P.	Patricia H.	Giuliana A.			Danielle A.
H2	Manhã	Renata A.	Thaisa N.	Patricia H.	Mila			Mila
	Tarde	Priscila T.	Luciana	Danielle A.	Carolina D.			Renata A.
H3	Manhã	Cris S.	André	Cris S.	Ana Flávia C.			Maria C.
	Tarde	Mila	Priscila T.	Priscila T.	Sérgio G.			Ana Flávia C.

Fonte: O autor.

Tabela 26: Contabilização das restrições *soft* violadas na escala que otimiza o Estudo de Caso do trabalho.

Escala que otimiza o Estudo de Caso				
Restrição violada	Variáveis associadas	Ponderação de Peso	Número de violações	Contribuição na F.O.
S1	$a_n^{(1)}, a_n^{(2)}$	0,174	24 (17 + 7)	4,176
S2	$b_n^{(1)}, b_n^{(2)}$	0,093	7 (1 + 6)	0,651
S3	$c_n$	0,061	2	0,122
S4	$d_n$	0,026	0	0
S5	$e_{nij}$	0,388	49	19,012
S6	$f_{nk}$	0,257	3	0,771
Total	—	1	85	24,732

Fonte: O autor.

Um primeiro fator interessante e bastante rico para o mundo gerencial é o de que nem sempre uma solução manual, ou que se observa na prática, de fato é viável ao se considerar todas as restrições do modelo, seja porque na prática ocorre uma flexibilização ou porque há uma replicação de padrões anteriores que vêm funcionando, porém deixam a equipe muito dependente de um determinado médico (algo que poderia ser evitado caso fosse planejado com maior cautela). De fato, a própria solução que era utilizada como vigente era infactível, pois apresentava quebra de restrições na medida em que havia médicos que trabalhavam dois turnos em um dia e também um turno no dia seguinte (H7 - três quebras) e médicos que trabalhavam mais do que o limite máximo de alocações em



finais de semana e feriados (H10 - duas quebras). Para conseguir fazer a comparação, primeiramente, há a necessidade de trocar pontualmente essas alocações a fim de tornar a solução factível, processo realizado por meio da observação de quais outros médicos eram usualmente alocados nesses mesmos turnos em outras semanas e que possuíam interesse e disponibilidade em trabalhar nas alocações conflituosas.

Uma discussão muito relevante é a de comparação entre a solução obtida por meio do modelo e sua otimização e a escala manual vigente atualmente, tanto em termos de observação do valor de sua função objetivo (verificando quantitativamente as violações de restrições *soft* ponderadas) quanto em termos de não haver necessidade de dispêndios grandes de tempo por parte de gestores para tal criação (usualmente é tarefa que consome ao menos duas horas e grande quantidade de ligações para os membros da equipe a fim de verificar se as alocações propostas de fato podem ser cumpridas). Para tal, fixou-se no modelo proposto a solução atualmente vigente, para contabilização do valor da função objetivo (fixam-se todas as variáveis  $x_{n,i,j,k}$  em valor 1 se na escala atual o médico  $n$  trabalha no hospital  $k$ , durante o turno  $j$  do dia  $i$ ).

A escala atual, uma vez modificadas as alocações que ocasionavam violações de restrições *hard* e fixando-se as variáveis como mencionado, novamente trazendo-se apenas a primeira semana, pode ser observada na Figura 12, e apresenta valor na função objetivo de 65,542, evidenciando justamente que há uma melhora de 62,2% ao se utilizar a solução otimizada, o que traz importantes *insights* para as gestoras, uma vez que pode acarretar uma insatisfação de membros da equipe e conseqüente piora na qualidade do trabalho ofertado. Além disso, há na Tabela 27 o detalhamento da contabilização das violações das restrições *soft* e na Tabela 28 uma comparação evidenciando a redução relativa dessas contabilizações, quando comparada a escala otimizada em relação à escala manual vigente.

Figura 12: Escala manual vigente no Estudo de Caso do trabalho.

Setor (Hospital)	Turno	Dias						
		1 (Terça)	2 (Quarta)	3 (Quinta)	4 (Sexta)	5 (Sábado)	6 (Domingo)	7 (Segunda)
H1	Manhã	Renata A.	Ricardo	Mila	Thaís N.	Sérgio G.		Maria C.
	Tarde	Mila	Ricardo	Ana Flávia C.	Thaís N.			Maria C.
H2	Manhã	Laura M.	Janaina	Juliana N.	Priscila T.			Mila
	Tarde	Renata A.	Carolina D.	Rafaela C.	Sérgio G.			Janaina
H3	Manhã	Ana Flávia C.	Thaís N.	Thaís N.	Ana Flávia C.			Rafael L.
	Tarde	Ana Flávia C.	Thaís N.	Danielle A.	Giuliana A.			Thaís N.

Fonte: O autor.

Tabela 27: Contabilização das restrições *soft* violadas na escala manual de trabalho vigente.

Escala manual vigente				
Restrição violada	Variáveis associadas	Ponderação de Pesos	Número de violações	Contribuição na F.O.
S1	$a_n^{(1)}, a_n^{(2)}$	0,174	72 (41 + 31)	12,528
S2	$b_n^{(1)}, b_n^{(2)}$	0,093	17 (6 + 11)	1,581
S3	$c_n$	0,061	22	1,342
S4	$d_n$	0,026	4	0,104
S5	$e_{nij}$	0,388	103	39,964
S6	$f_{nk}$	0,257	39	10,023
<b>Total</b>	—	<b>1</b>	<b>257</b>	<b>65,542</b>

Fonte: O autor.

Tabela 28: Comparação de violações de restrições *soft* entre as escalas otimizada e manual.

Restrição violada	Violações na escala manual	Violações na escala otimizada	Redução Percentual
S1	72	24	66,7%
S2	17	7	58,8%
S3	22	2	90,9%
S4	4	0	100,0%
S5	103	49	52,4%
S6	39	3	92,3%
Total	257	85	66,9%

Fonte: O autor.

Como comentário relevante, observa-se que a utilização do modelo e sua otimização foram capazes de gerar grandes reduções no número de violações de todas as restrições *soft*, não se limitando apenas àquelas com maior ponderação de peso. É interessante notar que, por exemplo, é possível gerar uma solução factível na qual não haja violações na restrição **S4**, ou seja, garantindo que todos os médicos trabalhem ao menos o número mínimo de turnos desejáveis.

Além disso, encontra-se o fato de que, justamente pela complexidade da tarefa de geração de escalas de trabalho, há grande dificuldade em se obterem dados de diversas realidades médicas para comparação. De fato, é comum que gestores médicos preencham suas agendas semanais e mensais por meio do uso de grupos de médicos que atuam como *freelancers* ou puramente repliquem uma escala anterior, de modo que a questão de satisfação de preferências pessoais não consegue sequer ser capturada por meio de entrevistas para ser levada em consideração na modelagem.

Como outro potencial benefício, encontra-se justamente a utilização da otimização de escalas no instante de mudança na composição da equipe (contratação ou demissão de médicos) ou expansão de serviços (a exemplo, se o grupo passasse a operar em mais um hospital ou outro setor do mesmo hospital), uma vez que é nesses pontos de ruptura onde gestores e os trabalhadores estariam mais dispostos a alterar suas agendas (muitas vezes, alterações não seriam tomadas porque, apesar de melhorarem a situação como um todo, gerariam necessidade de modificações e alterações pontuais por parte de cada membro).

Assim, passa-se para a subseção que trata da escalabilidade do modelo implementado.

### 5.1.3 Verificação de Escalabilidade do Modelo Determinístico

Uma vez validado o modelo e também sua eficácia a partir do Estudo de Caso, é também interessante observar como este responde a um teste de escalabilidade, isto é, escolhendo-se uma quantidade de fatores a serem analisados em níveis distintos ainda representativos de realidades médicas similares ou mais complexas do que a observada na subseção anterior. Tal experimento tem o objetivo de verificar se a estrutura enxuta do modelo, com menor uso de variáveis auxiliares em relação a modelos anteriores da literatura, faz com que ele responda em tempos computacionais aceitáveis.

Para tal, a partir de agrupamentos entre alguns principais fatores elencados como parâmetros relevantes, testaram-se os seguintes cinco fatores, cada qual com os seguintes níveis possíveis:

A. Número de Médicos - Tamanho da composição do quadro de funcionários.

1. 50 médicos;
2. 100 médicos;
3. 200 médicos.

B. Número de Dias - Quantidade de dias (corridos) no horizonte de planejamento.

1. 7 dias;
2. 14 dias;
3. 21 dias;
4. 28 dias.

C. Cenário de Demandas - Estrutura de setores e necessidades de demanda para cada alocação.

1. Cenário  $C_1$  - com semana base segundo Tabela 29;
  2. Cenário  $C_2$  - com semana base segundo Tabela 30;
  3. Cenário  $C_3$  - com semana base segundo Tabela 31.
- D. Caso de Restrições de Setores - Geração dos conjuntos  $X$  e  $A$  da modelagem, alterando-se as probabilidades de que um determinado par  $(n,k)$  pertença a esses conjuntos.
1. Irrestrito - Não há pares ordenados nos conjuntos  $X$  e  $A$ ;
  2. Levemente restrito - Há uma probabilidade de 15% de um determinado par  $(n,k)$  pertencer a  $X$  e uma probabilidade de também 15% de um determinado par  $(n,k)$  pertencer a  $A$ ;
  3. Moderadamente restrito - Há uma probabilidade de 30% de um determinado par  $(n,k)$  pertencer a  $X$  e uma probabilidade de também 30% de um determinado par  $(n,k)$  pertencer a  $A$ .
  4. Fortemente restrito - Há uma probabilidade de 45% de um determinado par  $(n,k)$  pertencer a  $X$  e uma probabilidade de também 45% de um determinado par  $(n,k)$  pertencer a  $A$ ;
- E. Caso de Restrições Temporais - Geração dos conjuntos  $Y$  e  $B$  da modelagem, alterando-se as probabilidades de que uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertença a esses conjuntos.
1. Irrestrito - Não há pares ordenados nos conjuntos  $Y$  e  $B$ ;
  2. Levemente restrito - Há uma probabilidade de 15% de uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertencer a  $Y$  e uma probabilidade de também 15% de uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertencer a  $B$ ;
  3. Moderadamente restrito - Há uma probabilidade de 30% de uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertencer a  $Y$  e uma probabilidade de também 30% de uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertencer a  $B$ .
  4. Fortemente restrito - Há uma probabilidade de 45% de uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertencer a  $Y$  e uma probabilidade de também 45% de uma determinada tupla  $(n,i,j)$  pertencer a  $B$ .

Tabela 29: Constituição do Cenário de Demandas do Cenário  $C_1$  (trazidos apenas os primeiros sete dias, os demais seguem o padrão semanal).

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor(Hospital) ↓	Turno	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
H1	Manhã	2	2	2	2	2	1	1
	Tarde	2	2	2	2	2	1	1
	Noite	2	2	2	2	2	0	0
H2	Manhã	2	2	2	2	2	1	1
	Tarde	2	2	2	2	2	1	1
	Noite	2	2	2	2	2	0	0

Fonte: O autor.

Tabela 30: Constituição do Cenário de Demandas Cenário  $C_2$  (trazidos apenas os primeiros sete dias, os demais seguem o padrão semanal).

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor (Hospital) ↓	Turno	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
H1	Manhã	1	1	1	1	1	1	1
	Tarde	1	1	1	1	1	0	0
H2	Manhã	1	1	1	1	1	0	0
	Tarde	1	1	1	1	1	0	0
H3	Manhã	1	1	1	1	1	0	0
	Tarde	1	1	1	1	1	0	0

Fonte: O autor.

Tabela 31: Constituição do Cenário de Demandas do Cenário  $C_3$  (trazidos apenas os primeiros sete dias, os demais seguem o padrão semanal).

Dia do mês →		1	2	3	4	5	6	7
Dia da semana → / Setor (Hospital) ↓	Turno	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
H1	Manhã	5	5	5	5	5	3	2
	Tarde	5	5	5	5	5	3	2
	Noite	2	2	2	2	2	2	2
H2	Manhã	4	4	4	4	4	4	3
	Tarde	4	4	4	4	4	4	3
	Noite	2	2	2	2	2	2	2
H3	Manhã	2	2	2	2	2	1	1
	Tarde	2	2	2	2	2	1	1
	Noite	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: O autor.

Com base nessas  $3^2 \cdot 4^3 = 576$  combinações, obtiveram-se os dados sobre número de variáveis totais, número de variáveis inteiras, número de restrições, valor da função

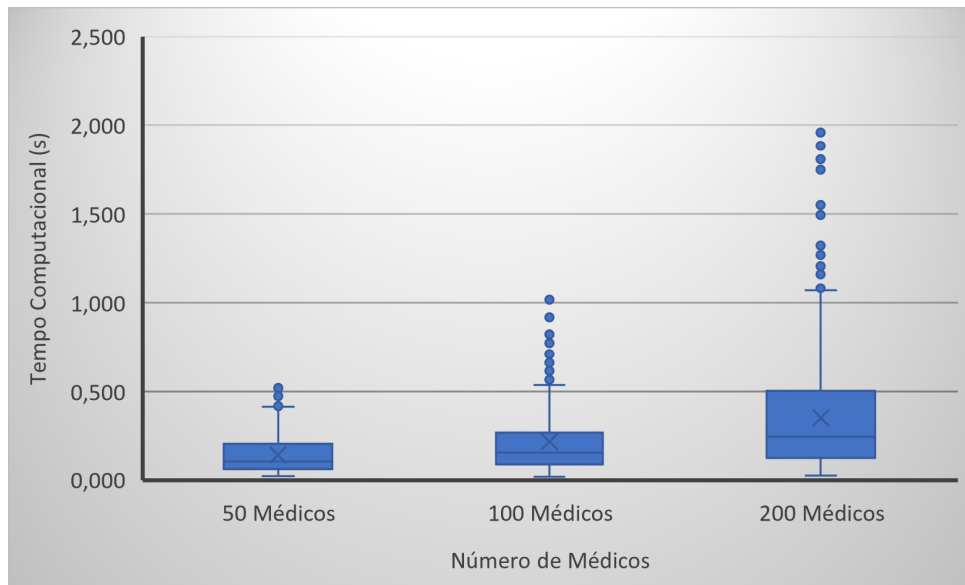
objetivo, tempo computacional e *gap* percentual da solução. Com a finalidade de geração de variabilidade nos cenários e mitigar eventuais quedas de desempenho computacional, para cada tratamento (combinação de fatores fixados em seus níveis), foram geradas 5 repetições. Foram coletados resultados para essas então  $5 \cdot 576 = 2880$  instâncias. Vale o comentário de que para finalidades de replicação, além do código elaborado ter sido feito a partir de números aleatórios gerados de forma controlada (*seed*), também se registraram todos os parâmetros para cada instância em um arquivo *.csv*. Com relação aos parâmetros  $\alpha$ , para cada instância, foram utilizadas as expressões da Tabela 32 para que se tenha a contabilização segundo a instância (uma vez que, dependendo dos demais parâmetros e tamanho dos conjuntos, há alteração para que o modelo seja fidedigno). Os valores referentes aos parâmetros  $\omega$  se mantiveram os mesmos advindos das conversas com gestores médicos (Tabela 19). O limite para o *gap* de otimalidade considerado foi o de  $10^{-4}$  e o limite de tempo para cada experimento foi o de 1800 segundos. Para todas as instâncias consideradas, entretanto, o *gap* obtido foi 0,0.

Tabela 32: Determinação do valor dos parâmetros  $\alpha$  segundo cada cenário.

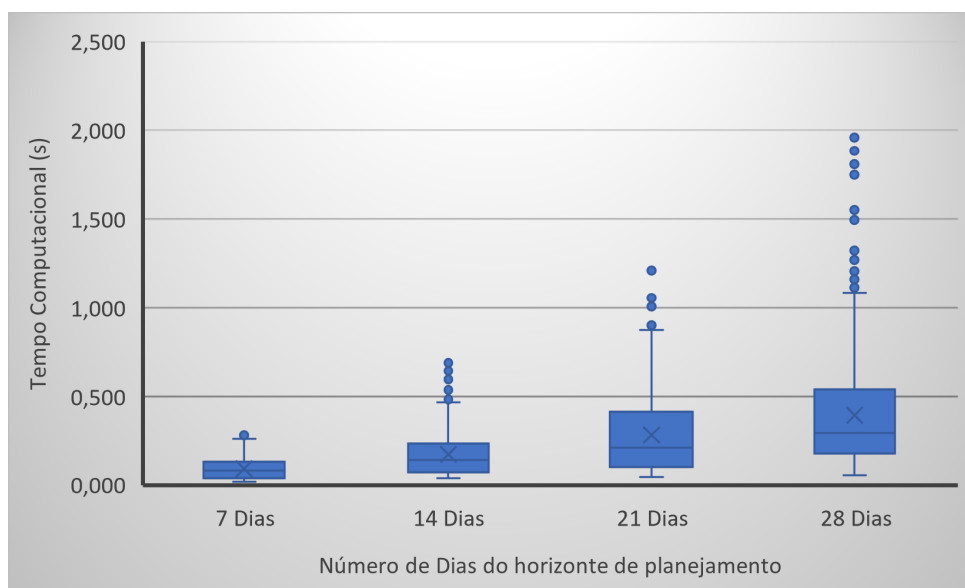
Parâmetro	Expressão para determinação do valor do parâmetro
$\alpha_{H10}$	$Max\{\lfloor \frac{ I^w }{2} \rfloor; 1\}$
$\alpha_{H11}$	$Max\{\lfloor \frac{ I^n }{2} \rfloor; 1\}$
$\alpha_{S1}$	$\lfloor \frac{1}{ N } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} \delta_{ijk} \rfloor$
$\alpha_{S2}$	$\lfloor \frac{1}{ N } \sum_{i \in I^w} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} \delta_{ijk} \rfloor$
$\alpha_{S3}$	$\lfloor \frac{2}{ N } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} \delta_{ijk} \rfloor$
$\alpha_{S4}$	$\lfloor \frac{1}{2 N } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \sum_{k \in K} \delta_{ijk} \rfloor$

Fonte: O autor.

Para a visualização inicial desses resultados, inicialmente são trazidos os gráficos de *boxplots* do tempo de otimização em função de cada fator, vistos nas Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 para verificação de linhas gerais de tendência. Posteriormente, é trazida também a Análise de Variância (ANOVA) para verificação de comprovação estatística de influência dos fatores puramente ou de interações dentre dois fatores.

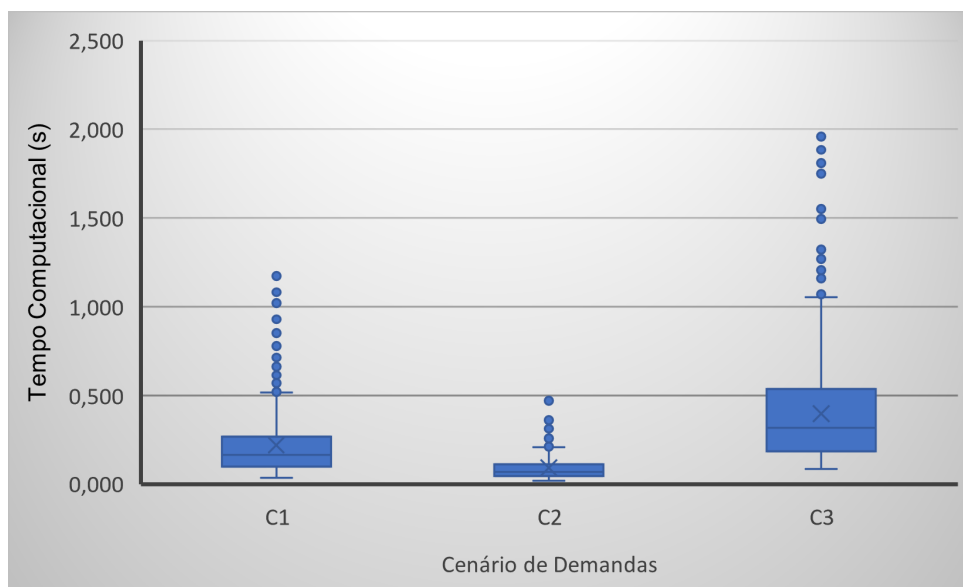
Figura 13: *Boxplot* do tempo computacional *versus* Número de Médicos.

Fonte: O autor.

Figura 14: *Boxplot* do tempo computacional *versus* Número de Dias.

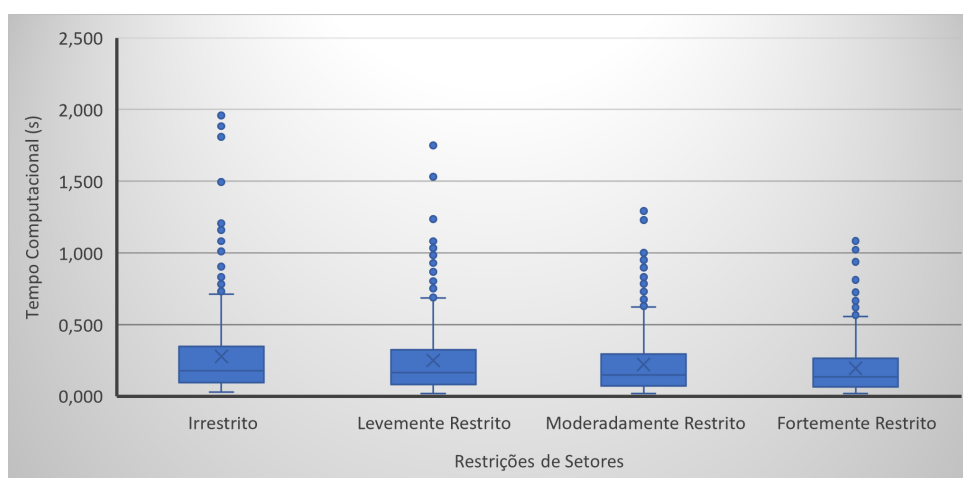
Fonte: O autor.

Figura 15: *Boxplot* do tempo computacional *versus* Cenário de Demandas.



Fonte: O autor.

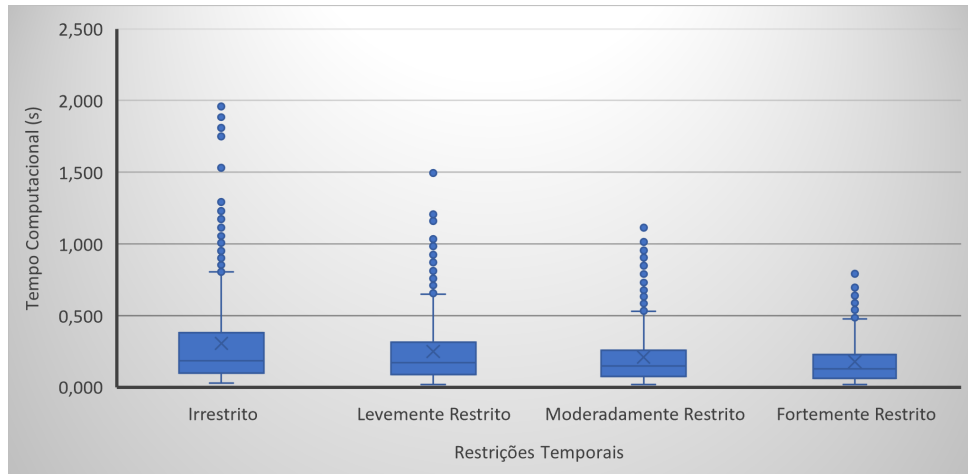
Figura 16: *Boxplot* do tempo computacional *versus* Caso de Restrições de Setores.



Fonte: O autor.



Figura 17: *Boxplot* do tempo computacional *versus* Caso de Restrições Temporais.



Fonte: O autor.

Para a realização da ANOVA, fez-se o uso do *software Minitab* para a geração tanto das figuras de resumo numérico quanto dos gráficos gerados para as interações. Observa-se na Figura 18 o resumo do cálculo das variâncias, comprovando que em termos de efeitos fixos, todos os cinco fatores são relevantes para explicação do modelo (influem na média do tempo computacional). Já na Figura 19, observam-se os gráficos com as interações entre dois fatores, apresentando-se paralelismo entre as linhas, deixando claro que não há significativos indícios de que a interação seja relevante para explicação do modelo.

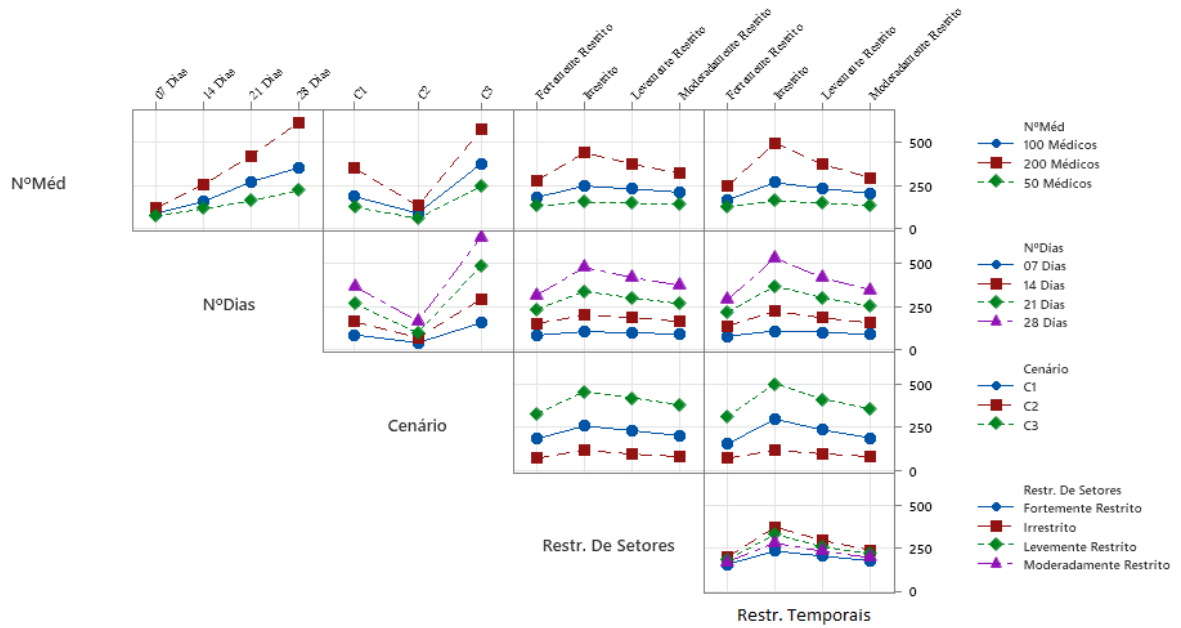
Figura 18: Resumo da ANOVA realizada a partir do experimento fatorial realizado.

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
NºMéd	2	21714594	10857297	674.31	0.000
NºDias	3	37327428	12442476	772.76	0.000
Cenário	2	45272831	22636416	1405.86	0.000
Restr. De Setores	3	2775355	925118	57.46	0.000
Restr Temporal	3	6571027	2190342	136.03	0.000
Error	2866	46146726	16101		
Lack-of-Fit	562	44673411	79490	124.31	0.000
Pure Error	2304	1473314	639		
Total	2879	159807960			

Minitab (2023).

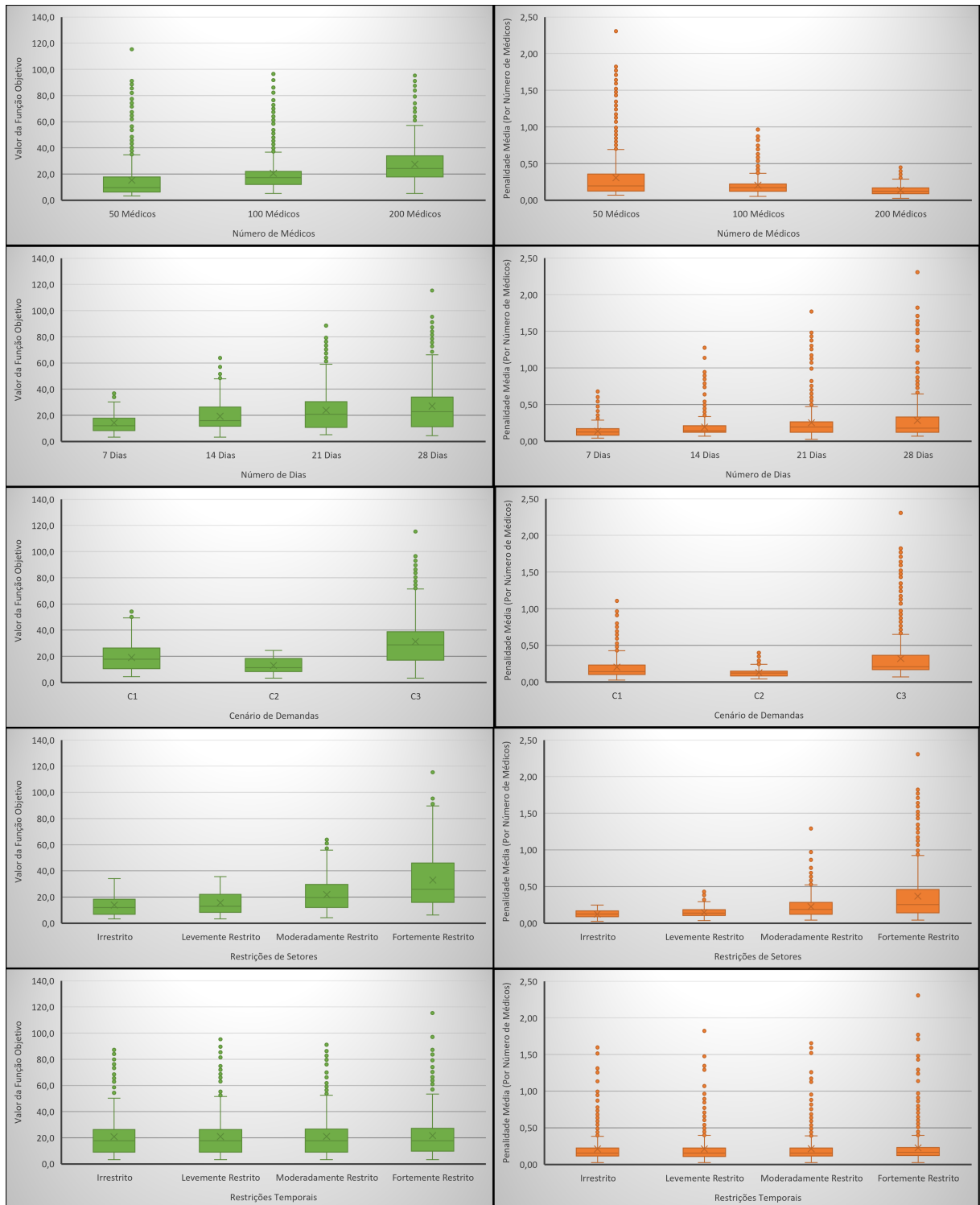
Figura 19: Observação das interações entre dois fatores para o experimento fatorial realizado.



Fonte: Minitab (2023).

Além das análises e discussões referentes ao tempo computacional, é também interessante observar que, para todas as instâncias, o valor da função objetivo manteve-se relativamente baixo, apresentando média 21,0802 e valores dos quartis ( $Q_1 = 9,3265$ ;  $Q_2$  (Mediana) = 17,7360;  $Q_3 = 26,2680$ ), lembrando que a escala prática para um cenário relativamente simples havia resultado em valor de 65,542. Com o intuito de se trazer uma visão mais completa tanto de análises do valor da função objetivo quanto da média de penalização individual por violações de restrições *soft*, ou seja, o valor da função objetivo dividido pelo número de médicos, a Figura 20 retrata a função objetivo de acordo com segmentações das instâncias de acordo com os fatores utilizados no experimento.

Figura 20: Resumo dos resultados do experimento realizado em termos dos valores da função objetivo e da penalidade média por número de médicos.



Fonte: Minitab (2023).

Inicialmente, há a verificação de que, para todos os fatores, há alinhamento entre os valores da função objetivo e da penalidade média observada, excetuando-se o fator do Número de Médicos. Para este, apesar de o valor da função objetivo aumentar conforme

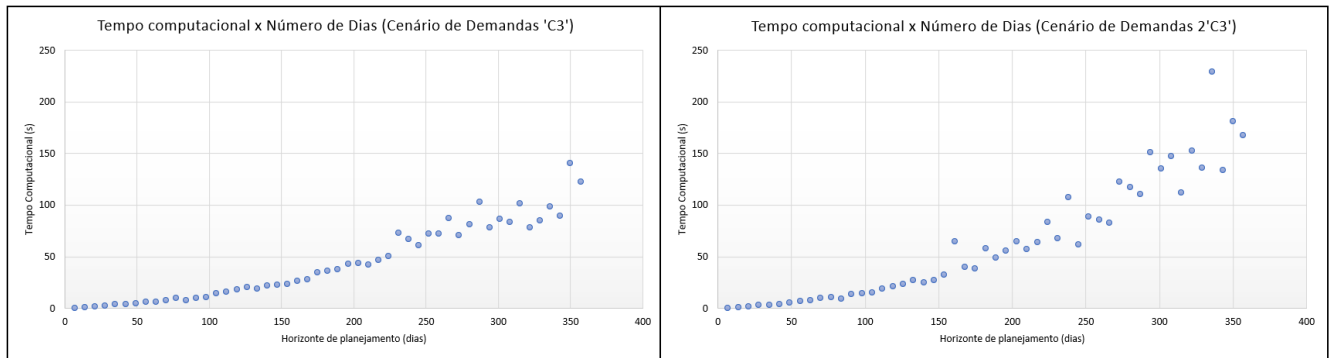
o maior número de médicos considerados, o valor da penalidade média diminui com o aumento no número de médicos. Isso se justifica pelo fato de que, em situações reais, com mais trabalhadores, há maior facilidade de se encontrar um trabalhador disposto a fazer uma determinada alocação, assim diminuindo o número de ocorrências de médicos sendo alocados em turnos ou setores indesejados.

Além disso, outra análise interessante ocorre ao se observar o valor da função objetivo e das penalidades médias por Caso de Restrições de Setores. Há valores maiores de ambas as quantificações conforme os cenários se apresentam mais restritivos, fato que se dá pois, conforme se diminui a oferta de médicos disponíveis para um determinado setor, há maior número de ocorrências de violações de preferências individuais. Já quando se observa o mesmo por Caso de Restrições Temporais, há um menor impacto.

É também interessante notar que, conforme os fatores se encontram em seus níveis de maior complexidade (mais médicos, mais dias, cenários mais complexos e fortemente restritos), há aumento no valor da função objetivo, justamente por ser mais difícil de haver soluções que satisfaçam todas as preferências individuais e balanceamento de carga de trabalho, de modo que mais restrições *soft* acabem sendo violadas.

Por fim, com o objetivo de verificação da escalabilidade do modelo para situações de maior porte, a fim de iniciar a estressar o modelo, foram feitos testes adicionais, variando-se o horizonte de planejamento e fixando-se os outros quatro fatores em seus níveis com maior tempo computacional (a saber: 200 médicos, cenário de demanda “ $C_3$ ” e casos irrestritos de restrições de setores ou temporais). Também foram coletados resultados para um caso em que as demandas sejam, para cada alocação, o dobro da demanda do cenário “ $C_3$ ” ( $2C_3$ ). A Figura 21 evidencia os tempos computacionais para ambos os testes realizados, feitos variando o número de dias em múltiplos de 7, até um limite de 357 dias (aproximadamente 1 ano).

Figura 21: Comparação entre tempo computacional e número de dias do horizonte de planeamento para testes adicionais realizados com cenário de demandas “ $C_3$ ” e 2“ $C_3$ ”.



Fonte: O autor.

Com relação aos resultados apresentados, do mesmo modo que ainda se observam tempos computacionais para otimização relativamente baixos (máximo de 140,85s no cenário “ $C_3$ ” e de 229,20s no cenário 2“ $C_3$ ”), também é possível verificar o início do estresse do modelo quando resolvido por meio de método exato. A título de curiosidade, conforme era feito o aumento no número de dias, o *solver* passava a se utilizar também de outras técnicas, como o algoritmo de pontos interiores.

## 5.2 Resultados e Análises do Modelo Matemático Estocástico

Diferentemente da seção anterior, que tinha foco principal na verificação de aplicabilidade do Estudo de Caso, os testes desta seção, realizados com o modelo estocástico explicitado na Seção 4.2 (que considera a existência de incertezas na demanda), possuem maior foco na validação do modelo proposto, na verificação da viabilidade computacional e no impacto do uso da estratégia de agrupamento utilizada a fim de permitir factibilidade da criação dos cenários. Assim sendo, esta seção se subdivide em duas, a fim de coletar resultados e *insights* sobre, respectivamente:

- Validação e exemplificação da modelagem estocástica - estabelecendo um caso simplificado a fim de verificação do funcionamento do modelo e código elaborado;
- Teste de viabilidade computacional do modelo - feito a partir da geração de dados baseados em instâncias geradas artificialmente, com foco na variação do número de

grupos representativos escolhidos para a simplificação computacional do número de cenários.

### 5.2.1 Validação da Modelagem Estocástica

De maneira análoga à feita para o modelo determinístico, gera-se um cenário simples, mas capaz de testar as restrições, e com resposta ótima conhecida a priori. O objetivo é verificar se o código elaborado é capaz de chegar à solução ótima por meio da leitura dos dados de entrada, além de corretamente contabilizar as novas variáveis introduzidas.

O cenário escolhido possui 6 médicos e apenas 3 dias em seu horizonte de planejamento (quinta-feira, sexta-feira e sábado), 2 turnos (manhã e tarde) e 1 setor (portanto, um total de 6 alocações), sendo que o agrupamento escolhido para testes foi obtido dividindo os dias que eram de semana dos que eram finais de semana (assim obtendo um total de 2 grupos). Para cada grupo, havia um nível alto e um nível baixo de demanda possível, com probabilidades distintas. Assim sendo, há um total de  $2^2 = 4$  cenários, *versus* um total que seria de  $2^6 = 64$  caso não se utilizasse a estratégia de agrupamento. As Tabelas 33, 34, e 35 ilustram, respectivamente, a alocação com divisão de grupos representativos (sendo o grupo 1 caracterizado pela cor verde e o grupo 2 pela cor azul), as demandas “alta” e “baixa” de cada grupo representativo, e a construção de cada cenário com probabilidade de ocorrência calculada. A Figura 22 complementa de maneira visual as tabelas apresentadas.

Além disso, os pesos para as variáveis de primeiro estágio se mantiveram os mesmos do modelo determinístico, e escolheu-se  $\omega_{y1} = 0,5$  e  $\omega_{y2} = 0,3$ . Na grande maioria dos casos, é preferível ter alguém da equipe ocioso a ter de recorrer a um médico terceiro que não necessariamente tem todo mesmo conhecimento e conduta com os pacientes, por esta razão que têm-se usualmente os valores de  $\omega_{y1}$  maiores que os valores de  $\omega_{y2}$ .

Tabela 33: Esquematização do cenário para validação da modelagem estocástica, com código de cores representando o agrupamento realizado.

Setor	Turno/Dia da Semana	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado
Setor 1	Manhã	$\varphi_{s,1,1,1}$	$\varphi_{s,2,1,1}$	$\varphi_{s,3,1,1}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,1}$	$\varphi_{s,2,2,1}$	$\varphi_{s,3,2,1}$

Fonte: O autor.

Tabela 34: Relação de níveis de demanda e probabilidade de ocorrência de cada grupo representativo representado na Tabela 33.

Grupo	Alocações do grupo ( $\theta_g$ )	Demanda alta	Demanda baixa	P(Dem. alta)	P(Dem. baixa)
Grupo 1	(1,1,1);(1,2,1);(2,1,1);(2,2,1)	3	2	60%	40%
Grupo 2	(3,1,1);(3,2,1)	2	1	70%	30%

Fonte: O autor.

Tabela 35: Relação de cenários para validação do modelo estocástico, com respectivos cálculos de probabilidade de ocorrência.

Cenário 1	Quinta	Sexta	Sábado
Manhã	2	2	1
Tarde	2	2	1
Probabilidade	$0,4 * 0,3 = 0,12$		

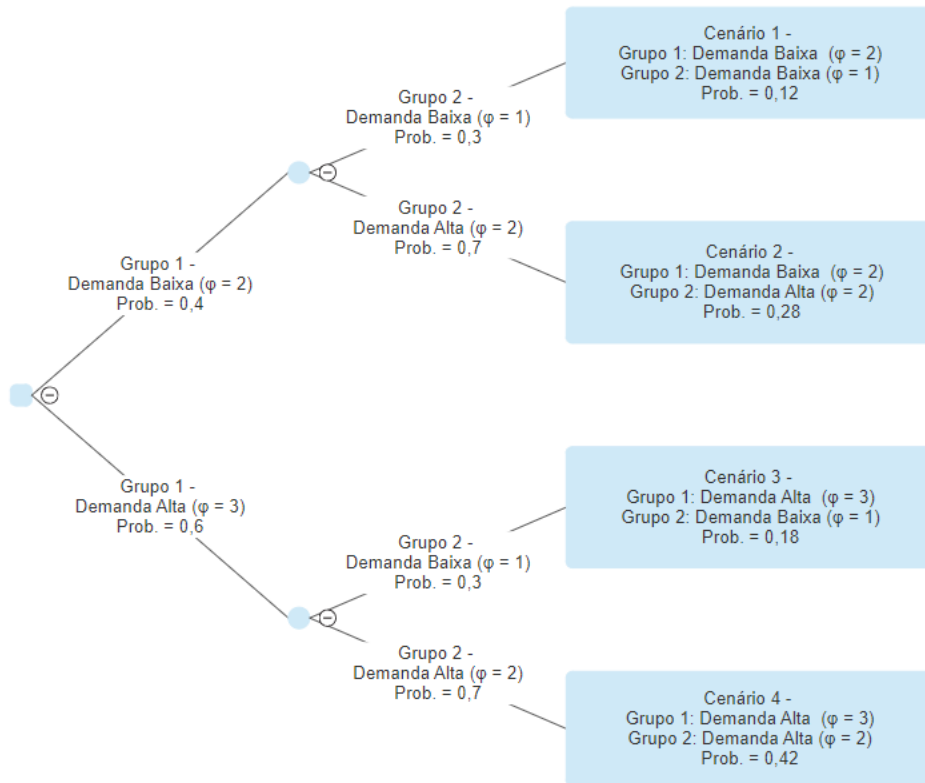
Cenário 2	Quinta	Sexta	Sábado
Manhã	2	2	2
Tarde	2	2	2
Probabilidade	$0,4 * 0,7 = 0,28$		

Cenário 3	Quinta	Sexta	Sábado
Manhã	3	3	1
Tarde	3	3	1
Probabilidade	$0,6 * 0,3 = 0,18$		

Cenário 4	Quinta	Sexta	Sábado
Manhã	3	3	2
Tarde	3	3	2
Probabilidade	$0,6 * 0,7 = 0,42$		

Fonte: O autor.

Figura 22: Árvore de Cenários para a realização da validação do modelo estocástico.



Fonte: O autor.

Com relação às restrições dos 6 médicos componentes da equipe, com as respectivas siglas presentes na Tabela 10, encontram-se:

- Os médicos Caio e Dani estão indisponíveis na quinta-feira, tanto na manhã quanto na tarde (Restrição H2);
- Os médicos André e Bruna estão indisponíveis na sexta-feira, tanto na manhã quanto na tarde (Restrição H2);
- O médico Enzo tem preferência por não trabalhar na quinta e sexta-feira, tanto na manhã quanto na tarde (Restrição S5);
- A médica Fabi tem preferência por não trabalhar no sábado, tanto na manhã quanto na tarde (Restrição S5).

Após a otimização da situação em questão, obtém-se a seguinte escala, com as variáveis de primeiro estágio obtidas e as respectivas variáveis de segundo estágio (reiterando que



$y^{(1)}$  se refere ao número de médicos chamados de última hora e  $y^{(2)}$  se refere ao número de médicos ociosos) para cada um dos 4 cenários. A Tabela 36 evidencia os valores mencionados, tal como o valor da solução do problema de segundo estágio ( $Q(x, \xi)$ ). Ademais, a Tabela 37 traz a composição da função objetivo, considerando os componentes referentes às variáveis de primeiro estágio e do valor esperado dos componentes referentes às variáveis de segundo estágio. Nota-se que os cenários com maior probabilidade de ocorrência acabam tendo menor penalidade.

Tabela 36: Solução após otimização do problema para validação do modelo estocástico, dividida nos cenários correspondentes.

Cenário 1	Quinta (Demanda = 2)	Sexta (Demanda = 2)	Sábado (Demanda = 1)
Manhã	André, Bruna, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$	Bruna, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$
Tarde	André, Bruna   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$	André, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$
Penalidade do cenário	$0^*\omega_{y1} + 5^*\omega_{y2} = 1,5$		

Cenário 2	Quinta (Demanda = 2)	Sexta (Demanda = 2)	Sábado (Demanda = 2)
Manhã	André, Bruna, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$	Bruna, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$
Tarde	André, Bruna   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$	André, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$
Penalidade do cenário	$0^*\omega_{y1} + 3^*\omega_{y2} = 0,9$		

Cenário 3	Quinta (Demanda = 3)	Sexta (Demanda = 3)	Sábado (Demanda = 1)
Manhã	André, Bruna, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	Bruna, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$
Tarde	André, Bruna   $y^{(1)} = 1; y^{(2)} = 0$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	André, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 1$
Penalidade do cenário	$1^*\omega_{y1} + 2^*\omega_{y2} = 1,1$		

Cenário 4	Quinta (Demanda = 3)	Sexta (Demanda = 3)	Sábado (Demanda = 2)
Manhã	André, Bruna, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	Bruna, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$
Tarde	André, Bruna   $y^{(1)} = 1; y^{(2)} = 0$	Caio, Dani, Fabi   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$	André, Enzo   $y^{(1)} = 0; y^{(2)} = 0$
Penalidade do cenário	$1^*\omega_{y1} + 0^*\omega_{y2} = 0,5$		

Fonte: O autor.

Tabela 37: Composição da função objetivo da validação do modelo estocástico.

Fonte da penalidade	Valor	Valor ponderado
$a^{(1)}$	3	0,522
$a^{(2)}$	0	0
$b^{(1)}$	0	0
$b^{(2)}$	6	0,558
$c$	0	0
$d$	0	0
$e$	0	0
$f$	0	0
Cenário 1	1,5	0,18
Cenário 2	0,9	0,252
Cenário 3	1,1	0,198
Cenário 4	0,5	0,21
<b>Total</b>		<b>1,92</b>

Fonte: O autor.

Vale o comentário de que a prática de chamar um médico terceiro ao se observar que a demanda é maior que a esperada é muito indesejada dentro de realidades médicas, geralmente cabendo, se possível, a membros da própria equipe absorver essa carga de trabalho maior. Assim sendo, o fato de se introduzir uma alternativa a essa sobrecarga de trabalho pode também auxiliar as gestoras a ampliar seus métodos de atuação de maneira positiva. Ademais, na prática, quando ocorre ociosidade de médicos em uma alocação, não necessariamente isso significa que apenas um dos médicos ficará ocioso e os demais trabalharão normalmente. Há uma divisão feita ao longo do turno, permitindo que todos tenham um pequeno período de descanso. Este comentário é justificativa primária para o fato de que não haja apontamento, no caso das variáveis de segundo estágio, de qual médico da equipe que ficará ocioso ou qual o médico terceiro que deve ser chamado.

Assim sendo, com o modelo validado, a próxima subseção traz um experimento fatorial com enfoque em sua viabilidade computacional.

## 5.2.2 Verificação de Viabilidade do Modelo Estocástico

Após a validação do modelo, tem-se o objetivo de verificação de seus tempos computacionais, com uma suspeita inicial de que eles não sejam tão elevados (exceto em casos com grande número de variáveis criadas, que poderiam acarretar em falta de memória),

uma vez que as variáveis adicionais são contínuas. Além disso, é interessante averiguar o impacto de alguns fatores no tempo computacional, em especial, o uso da estratégia de agrupamento das alocações.

Inicialmente, a questão da ponderação de pesos (dentre os termos relacionados às variáveis de primeiro estágio; às variáveis relacionadas ao número de médicos terceiros; e às variáveis relacionadas ao número de médicos ociosos) é bastante relevante, uma vez que se tratam de maneira análoga a três objetivos a serem minimizados. Uma análise mais aprofundada do impacto dessa ponderação de pesos será feita posteriormente, de modo que, no momento inicial, esse aspecto entrará como um dos fatores testados em apenas três variações.

Outra informação relevante é a de que o cenário base escolhido para ser retratado nesses testes é o Cenário  $C_3$ , visto na seção anterior, na Tabela 31. Apesar de haver mudanças na demanda, por se tratar da versão estocástica do problema e também por envolver o uso da estratégia de agrupamento de alocações, o *layout* geral (de três hospitais, com turnos da manhã, da tarde e da noite) se mantém.

Assim sendo, quatro principais fatores foram elencados como interessantes para os testes computacionais em questão, neste momento, cada qual com os seguintes níveis possíveis:

A. Número de Médicos - Tamanho da composição do quadro de funcionários.

1. 100 médicos;
2. 200 médicos.

B. Número de Dias - Quantidade de dias (corridos) no horizonte de planejamento.

1. 7 dias;
2. 14 dias;
3. 21 dias;
4. 28 dias.

C. Número de grupos representativos - Quantidade de agrupamentos realizados para a simplificação do número de cenários gerados (as demandas, nos níveis baixo e alto, para cada grupo, encontram-se no Apêndice D).

1. 3 grupos - subdividindo apenas entre setores, conforme Tabela 38;

2. 6 grupos - subdividindo entre diferentes setores e também entre dias da semana e dias de final de semana/feriados, conforme Tabela 39;
  3. 12 grupos - subdividindo entre diferentes setores, entre dias da semana e dias de final de semana/feriados e entre turnos da manhã/tarde e turnos da noite, conforme Tabela 40.
- D. Pesos associados às variáveis de segundo estágio ( $\omega_{y1}$  e  $\omega_{y2}$ ) - Variando a magnitude dos pesos em comparação com os pesos das variáveis de primeiro estágio (que somam 1).
1. Mesma Magnitude - Com  $\omega_{y1} = 0,75$  e  $\omega_{y2} = 0,25$ ;
  2. Magnitude Superior - Com  $\omega_{y1} = 7,5$  e  $\omega_{y2} = 2,5$ ;
  3. Magnitude Inferior - Com  $\omega_{y1} = 0,075$  e  $\omega_{y2} = 0,025$ .

Tabela 38: Cenário de Demandas com subdivisão em 3 grupos representativos.

Setor	Turno/Dia	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
Setor 1	Manhã	$\varphi_{s,1,1,1}$	$\varphi_{s,2,1,1}$	$\varphi_{s,3,1,1}$	$\varphi_{s,4,1,1}$	$\varphi_{s,5,1,1}$	$\varphi_{s,6,1,1}$	$\varphi_{s,7,1,1}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,1}$	$\varphi_{s,2,2,1}$	$\varphi_{s,3,2,1}$	$\varphi_{s,4,2,1}$	$\varphi_{s,5,2,1}$	$\varphi_{s,6,2,1}$	$\varphi_{s,7,2,1}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,1}$	$\varphi_{s,2,3,1}$	$\varphi_{s,3,3,1}$	$\varphi_{s,4,3,1}$	$\varphi_{s,5,3,1}$	$\varphi_{s,6,3,1}$	$\varphi_{s,7,3,1}$
Setor 2	Manhã	$\varphi_{s,1,1,2}$	$\varphi_{s,2,1,2}$	$\varphi_{s,3,1,2}$	$\varphi_{s,4,1,2}$	$\varphi_{s,5,1,2}$	$\varphi_{s,6,1,2}$	$\varphi_{s,7,1,2}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,2}$	$\varphi_{s,2,2,2}$	$\varphi_{s,3,2,2}$	$\varphi_{s,4,2,2}$	$\varphi_{s,5,2,2}$	$\varphi_{s,6,2,2}$	$\varphi_{s,7,2,2}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,2}$	$\varphi_{s,2,3,2}$	$\varphi_{s,3,3,2}$	$\varphi_{s,4,3,2}$	$\varphi_{s,5,3,2}$	$\varphi_{s,6,3,2}$	$\varphi_{s,7,3,2}$
Setor 3	Manhã	$\varphi_{s,1,1,3}$	$\varphi_{s,2,1,3}$	$\varphi_{s,3,1,3}$	$\varphi_{s,4,1,3}$	$\varphi_{s,5,1,3}$	$\varphi_{s,6,1,3}$	$\varphi_{s,7,1,3}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,3}$	$\varphi_{s,2,2,3}$	$\varphi_{s,3,2,3}$	$\varphi_{s,4,2,3}$	$\varphi_{s,5,2,3}$	$\varphi_{s,6,2,3}$	$\varphi_{s,7,2,3}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,3}$	$\varphi_{s,2,3,3}$	$\varphi_{s,3,3,3}$	$\varphi_{s,4,3,3}$	$\varphi_{s,5,3,3}$	$\varphi_{s,6,3,3}$	$\varphi_{s,7,3,3}$

Fonte: O autor.

Tabela 39: Cenário de Demandas com subdivisão em 6 grupos representativos.

Setor	Turno/Dia	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
Setor 1	Manhã	$\varphi_{s,1,1,1}$	$\varphi_{s,2,1,1}$	$\varphi_{s,3,1,1}$	$\varphi_{s,4,1,1}$	$\varphi_{s,5,1,1}$	$\varphi_{s,6,1,1}$	$\varphi_{s,7,1,1}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,1}$	$\varphi_{s,2,2,1}$	$\varphi_{s,3,2,1}$	$\varphi_{s,4,2,1}$	$\varphi_{s,5,2,1}$	$\varphi_{s,6,2,1}$	$\varphi_{s,7,2,1}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,1}$	$\varphi_{s,2,3,1}$	$\varphi_{s,3,3,1}$	$\varphi_{s,4,3,1}$	$\varphi_{s,5,3,1}$	$\varphi_{s,6,3,1}$	$\varphi_{s,7,3,1}$
Setor 2	Manhã	$\varphi_{s,1,1,2}$	$\varphi_{s,2,1,2}$	$\varphi_{s,3,1,2}$	$\varphi_{s,4,1,2}$	$\varphi_{s,5,1,2}$	$\varphi_{s,6,1,2}$	$\varphi_{s,7,1,2}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,2}$	$\varphi_{s,2,2,2}$	$\varphi_{s,3,2,2}$	$\varphi_{s,4,2,2}$	$\varphi_{s,5,2,2}$	$\varphi_{s,6,2,2}$	$\varphi_{s,7,2,2}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,2}$	$\varphi_{s,2,3,2}$	$\varphi_{s,3,3,2}$	$\varphi_{s,4,3,2}$	$\varphi_{s,5,3,2}$	$\varphi_{s,6,3,2}$	$\varphi_{s,7,3,2}$
Setor 3	Manhã	$\varphi_{s,1,1,3}$	$\varphi_{s,2,1,3}$	$\varphi_{s,3,1,3}$	$\varphi_{s,4,1,3}$	$\varphi_{s,5,1,3}$	$\varphi_{s,6,1,3}$	$\varphi_{s,7,1,3}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,3}$	$\varphi_{s,2,2,3}$	$\varphi_{s,3,2,3}$	$\varphi_{s,4,2,3}$	$\varphi_{s,5,2,3}$	$\varphi_{s,6,2,3}$	$\varphi_{s,7,2,3}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,3}$	$\varphi_{s,2,3,3}$	$\varphi_{s,3,3,3}$	$\varphi_{s,4,3,3}$	$\varphi_{s,5,3,3}$	$\varphi_{s,6,3,3}$	$\varphi_{s,7,3,3}$

Fonte: O autor.

Tabela 40: Cenário de Demandas com subdivisão em 12 grupos representativos.

Setor	Turno/Dia	Segunda-feira	Terça-feira	Quarta-feira	Quinta-feira	Sexta-feira	Sábado	Domingo
Setor 1	Manhã	$\varphi_{s,1,1,1}$	$\varphi_{s,2,1,1}$	$\varphi_{s,3,1,1}$	$\varphi_{s,4,1,1}$	$\varphi_{s,5,1,1}$	$\varphi_{s,6,1,1}$	$\varphi_{s,7,1,1}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,1}$	$\varphi_{s,2,2,1}$	$\varphi_{s,3,2,1}$	$\varphi_{s,4,2,1}$	$\varphi_{s,5,2,1}$	$\varphi_{s,6,2,1}$	$\varphi_{s,7,2,1}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,1}$	$\varphi_{s,2,3,1}$	$\varphi_{s,3,3,1}$	$\varphi_{s,4,3,1}$	$\varphi_{s,5,3,1}$	$\varphi_{s,6,3,1}$	$\varphi_{s,7,3,1}$
Setor 2	Manhã	$\varphi_{s,1,1,2}$	$\varphi_{s,2,1,2}$	$\varphi_{s,3,1,2}$	$\varphi_{s,4,1,2}$	$\varphi_{s,5,1,2}$	$\varphi_{s,6,1,2}$	$\varphi_{s,7,1,2}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,2}$	$\varphi_{s,2,2,2}$	$\varphi_{s,3,2,2}$	$\varphi_{s,4,2,2}$	$\varphi_{s,5,2,2}$	$\varphi_{s,6,2,2}$	$\varphi_{s,7,2,2}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,2}$	$\varphi_{s,2,3,2}$	$\varphi_{s,3,3,2}$	$\varphi_{s,4,3,2}$	$\varphi_{s,5,3,2}$	$\varphi_{s,6,3,2}$	$\varphi_{s,7,3,2}$
Setor 3	Manhã	$\varphi_{s,1,1,3}$	$\varphi_{s,2,1,3}$	$\varphi_{s,3,1,3}$	$\varphi_{s,4,1,3}$	$\varphi_{s,5,1,3}$	$\varphi_{s,6,1,3}$	$\varphi_{s,7,1,3}$
	Tarde	$\varphi_{s,1,2,3}$	$\varphi_{s,2,2,3}$	$\varphi_{s,3,2,3}$	$\varphi_{s,4,2,3}$	$\varphi_{s,5,2,3}$	$\varphi_{s,6,2,3}$	$\varphi_{s,7,2,3}$
	Noite	$\varphi_{s,1,3,3}$	$\varphi_{s,2,3,3}$	$\varphi_{s,3,3,3}$	$\varphi_{s,4,3,3}$	$\varphi_{s,5,3,3}$	$\varphi_{s,6,3,3}$	$\varphi_{s,7,3,3}$

Fonte: O autor.

Para cada uma das  $2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3 = 72$  combinações, foram geradas 5 repetições, e, então, os resultados das 360 instâncias foram coletados. Assim como feito nos testes do modelo determinístico, a geração de dados foi feita a partir de números aleatórios de forma controlada (*seed*), e as informações relevantes tanto de entrada quanto de saída foram armazenadas. Como principais saídas do programa, para análise, tem-se o tempo computacional da resolução do modelo equivalente determinístico, o valor da função objetivo RP, *gap* de otimalidade obtido (reiterando-se que os critérios de parada são o padrão do *Gurobi*,  $10^{-4}$  ou 3600 segundos), escala obtida em função das variáveis de primeiro estágio (e valores das variáveis de segundo estágio para cada cenário representativo), e valores das soluções WS e EEV, para cálculo do EVPI e VSS.

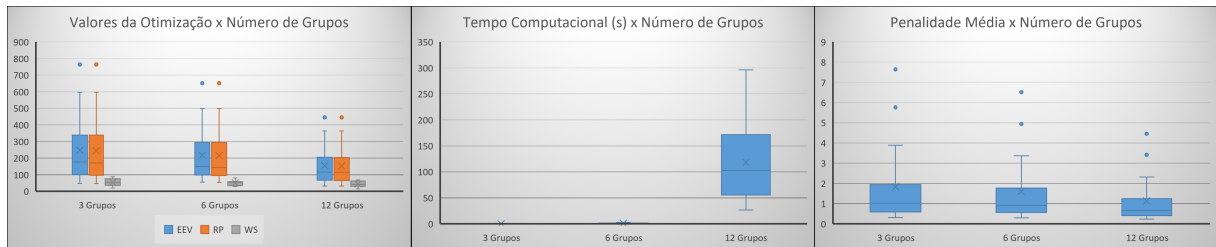
Em termos de planejamento dos valores atribuídos para as probabilidades de cada nível de demanda (alto ou baixo), optou-se por adotar uma abordagem equiprovável, na qual cada nível tem probabilidade de 50% de se concretizar (ALEM; MORABITO, 2015). Ainda assim, reitera-se que o modelo se encontra em formato genérico, de modo que é possível adotar abordagens tanto mais otimistas quanto mais pessimistas.

Para o cálculo do EEV, uma vez necessitando também do cálculo do EMV, há uma importante discussão sobre um aspecto do modelo. Uma vez que a restrição na qual a incerteza se dá é uma igualdade, para não incorrer em infactibilidade da solução (uma vez que a demanda esperada pode ser um valor não inteiro), uma alternativa (e a escolhida para o trabalho) é adotar como valor esperado o menor interior que seja maior ou igual que o valor obtido, uma vez que esse valor será utilizado como uma estimativa conservadora para o VSS (por exemplo, seria adotado um valor de 6 para um valor médio de demanda de 5,8). Como observação, para esses exemplos testados nesta seção, o arredondamento para cima resulta no mesmo resultado que a relaxação da restrição (4.26) de  $=$  para  $\geq$ .

Para esta análise, optou-se por apresentar os gráficos em trios, nas Figuras 23, 24, 25 e 26, apresentando e comentando os principais *insights*, para cada fator, de maneira sequencial. Cada trio traz os resultados médios, respectivamente, referente aos:

- Valores da Função objetivo, trazendo os valores EEV, RP e WS;
- Valores referentes ao tempo de otimização do modelo equivalente determinístico;
- Valores da penalidade média por número de médicos, de maneira análoga à feita nos resultados determinísticos.

Figura 23: *Boxplots* de resultados do Modelo Estocástico segmentados por número de grupos representativos.

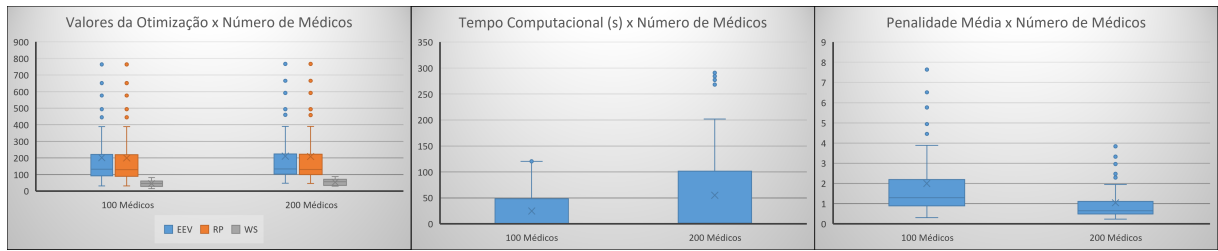


Fonte: O autor.

Com relação à análise segundo aos Valores da Otimização, há inicialmente o comentário de que os valores EEV e RP apresentam leve queda à medida que mais grupos são utilizados, se relacionando ao fato de que, com mais grupos, há a possibilidade de melhor representação da situação de cada alocação, ao invés de se ter um agrupamento mais geral (como seria no caso de apenas 3 grupos, por exemplo).

Outro resultado interessante e esperado tem relação com os tempos computacionais, que apresentam grande incremento para o caso de 12 grupos, justamente pelo número de cenários a serem gerados e, conseqüentemente, variáveis e restrições a serem inseridas no modelo. Ainda assim, pelo fato das variáveis serem contínuas, os tempos computacionais obtidos são relativamente baixos. Quanto às penalidades médias, há um comportamento similar ao observado no modelo determinístico.

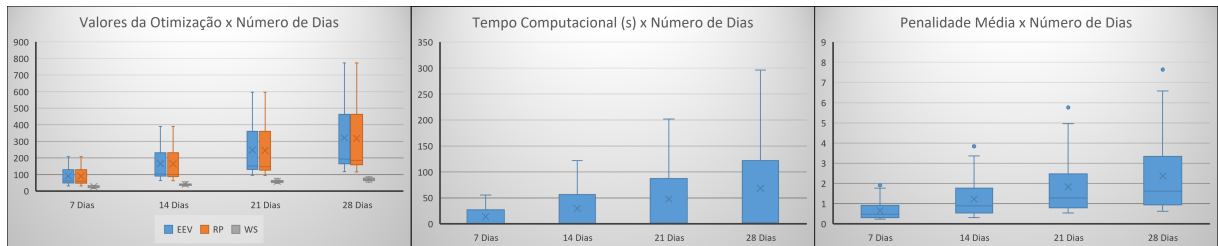
Figura 24: *Boxplots* de resultados do Modelo Estocástico segmentados por número de médicos.



Fonte: O autor.

Para análise segundo o número de médicos, há comportamentos similares aos observados no modelo determinístico, isto é, a observação de aumento no tempo computacional no caso de maior número de médicos, enquanto que a penalidade média diminui, pelo mesmo fator já explicado, de maior disponibilidade. É notável que os valores da otimização do modelo estocástico, para o cenário de demandas escolhido, mostrou-se pouco sensível ao aumento do número de médicos, conforme o primeiro dos gráficos apresentados.

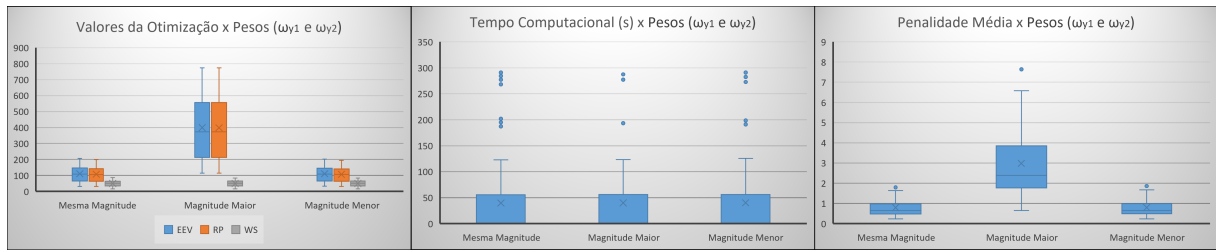
Figura 25: *Boxplots* de resultados do Modelo Estocástico segmentados por número de dias do horizonte de planejamento.



Fonte: O autor.

Os gráficos apresentados com segmentação pelo número de dias apresentam comportamento bastante similar, de modo que há um acréscimo de todos os valores conforme há o aumento no número de dias. É interessante notar que, conforme o primeiro gráfico, os valores do VSS (distância entre as duas primeiras barras) se mantêm baixos para todos os números de dias.

Figura 26: *Boxplots* de resultados do Modelo Estocástico segmentados por magnitude de pesos.



Fonte: O autor.

A análise segundo a magnitude dos pesos referente às variáveis de segundo estágio apresentou resultados bastante curiosos, principalmente no primeiro gráfico. Houve grande sensibilidade dos valores da otimização quando os valores dos pesos em questão se encontravam em magnitudes maiores, com um aumento nos valores do EEV e RP. Nessa magnitude, o valor do VSS, para todas as instâncias, foi nulo, e o EVPI bastante elevado, o que retrata que, quando se torna muito oneroso o recurso, o modelo tomará os recursos de modo a minimizar ao máximo chamar médicos de última hora, de modo que o valor da função objetivo se iguale ao valor mais conservador. Para as outras magnitudes, ainda se torna curioso que os valores do VSS se mostraram pequenos mesmo quando os pesos associados às variáveis de segundo estágio estavam em seus patamares mais baixos. Em termos agregados, temos que o EEV médio foi de 206,53; o RP médio foi de 204,23 e o WS médio foi de 49,78, assim sendo, o VSS médio foi de 2,30 e o EVPI médio de 154,45. Este fato ressalta a importância de direcionar esforços para descobrir os valores das demandas que se concretizarão, proporcionando assim um benefício significativo na redução das penalidades observadas. Um possível motivo para os baixos valores dos VSSs é o de que não há grande variação da demanda entre os níveis baixo e alto, justamente relacionado a esse parâmetro não ser independente (advindo apenas da taxa variável de pacientes que necessitam de atendimento).

Por fim, sobre as análises iniciais, observa-se que não há grande sensibilidade do tempo computacional em função das magnitudes escolhidas, ao passo que a penalidade média apresenta valores maiores para o caso de Magnitude Maior, uma vez que o valor da função objetivo, como um todo (pelos pesos maiores) aumentou.

Após a realização dessas análises, testes adicionais foram feitos a fim de verificar o impacto de diferentes pesos das variáveis de segundo estágio. Para tal, foram fixados os demais fatores da seguinte maneira: 200 Médicos; 28 Dias no horizonte de planejamento;



12 grupos representativos, com demandas e alocações conforme a Tabela 40, anteriormente apresentada e a Tabela 47, disponível no apêndice D; demais parâmetros relacionados às indisponibilidades e desejos dos médicos e gestores fixados com base em uma única geração de dados (*seed*).

Com base nisso, foram alterados os valores de  $\omega_{y1}$  e  $\omega_{y2}$ , mantendo a soma dos dois pesos constante igual a 1, variando cada peso em passos de tamanho 0,05, de modo a gerar 21 pares ordenados de modo que  $(\omega_{y1}, \omega_{y2})_i = (1 - 0,05i; 0,05i)$ , com  $i = \{0, 1, \dots, 20\}$ . Os pesos relativos às variáveis de primeiro estágio se mantiveram constantes. A Tabela 41 traz os resultados obtidos e a função objetivo segmentada em três valores (soma de valores referentes ao primeiro estágio, soma de valores envolvendo  $y^{(1)}$ , e soma de valores envolvendo  $y^{(2)}$ ).

Tabela 41: Resultados dos testes adicionais do Modelo Estocástico, alterando valores dos pesos  $\omega_{y1}$  e  $\omega_{y2}$ .

$i$	$\omega_{y1}$	$\omega_{y2}$	F. Obj.	1ºEstágio	2ºEstágio - $y^{(1)}$	2ºEstágio - $y^{(2)}$
0	1,00	0,00	99,29	99,29	0,00	0,00
1	0,95	0,05	106,59	99,29	0,00	7,30
2	0,90	0,10	113,89	99,29	0,00	14,60
3	0,85	0,15	121,19	99,29	0,00	21,90
4	<b>0,80</b>	<b>0,20</b>	127,54	88,14	13,60	25,80
5	<b>0,75</b>	<b>0,25</b>	132,49	77,99	27,00	27,50
6	<b>0,70</b>	<b>0,30</b>	136,19	77,99	25,20	33,00
7	<b>0,65</b>	<b>0,35</b>	134,85	41,45	91,65	1,75
8	<b>0,60</b>	<b>0,40</b>	128,05	41,45	84,60	2,00
9	0,55	0,45	120,95	40,65	80,30	0,00
10	0,50	0,50	113,65	40,65	73,00	0,00
11	0,45	0,55	106,35	40,65	65,70	0,00
12	0,40	0,60	99,05	40,65	58,40	0,00
13	0,35	0,65	91,75	40,65	51,10	0,00
14	0,30	0,70	84,45	40,65	43,80	0,00
15	0,25	0,75	75,62	16,62	59,00	0,00
16	0,20	0,80	63,82	16,62	47,20	0,00
17	0,15	0,85	51,86	14,51	37,35	0,00
18	0,10	0,90	39,36	14,36	25,00	0,00
19	0,05	0,95	26,34	12,34	14,00	0,00
20	0,00	1,00	12,34	12,34	0,00	0,00

Fonte: O autor.

É possível observar que, nos casos extremos (quando um dos pesos associados é nulo, ou seja, para  $i = 0$  e  $i = 20$ ), os valores de penalidades na função objetivo são provenientes apenas das penalidades de primeiro estágio. No primeiro caso ( $i = 0$ ), a solução ótima prioriza deixar ao máximo os médicos ociosos (pois, nesse caso, não há este custo de inconveniência), o que ocasiona um maior número de alocações de cada médico, aumentando as violações de preferências individuais (Restrições S5 e S6) e de máximo desejado de alocações no horizonte de planejamento (Restrição S4). No segundo caso ( $i = 20$ ), a solução ótima prioriza chamar médicos terceiros (pois, nesse caso, não há este custo de inconveniência), o que acaba não impactando tanto nas restrições *soft* do primeiro estágio. Isso faz com que o valor da função objetivo no primeiro caso (99,29) fique muito maior do que ao mesmo valor no segundo caso (12,34).

Como análise interessante dos testes realizados, encontra-se primeiro a faixa para a qual as penalidades relativas ao segundo estágio são ambas não nulas. Isso significa que, para este caso em que a soma dos pesos relacionados à variáveis de segundo estágio se manteve constante e igual a 1, só é interessante optar por ambos os recursos para valores de  $\omega_{y1}$  entre 0,6 e 0,8 e valores de  $\omega_{y2}$  entre 0,2 e 0,4.

Caso os valores sejam mais extremos, o gestor deveria optar por alocar o máximo possível de médicos e deixar alguns eventualmente ociosos, ou alocar o mínimo possível de médicos e chamar terceiros sempre que necessário. É interessante notar que o par ordenado (0,75; 0,25), que foi utilizado nos testes computacionais, se encontra dentro do intervalo no qual ambos os recursos são interessantes.

## 6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho, foi abordado o Problema de Geração de Escalas de Trabalho para Médicos, caracterizado por ser um caso particular dentro da área médica do Problema de Alocação de Funcionários, no qual se busca a alocação de médicos em turnos de trabalho, a fim da satisfação da demanda a cada turno e da maximização das preferências da equipe em questão. Para isso, inicialmente, um modelo matemático determinístico foi proposto com base nas especificidades de um grupo hospitalar que opera na cidade de São Paulo. Fez-se um modelo matemático determinístico, com base em um estudo de caso feito com esse grupo hospitalar, coletando as necessidades das gestoras e as preferências dos médicos da equipe em questão. Posteriormente, propôs-se um modelo matemático estocástico a fim de realizar a incorporação de incerteza no aspecto da demanda por médicos em cada uma das alocações. O método AHP foi utilizado em ambas as versões, para priorizar os múltiplos objetivos relevantes do problema.

Com base nos resultados determinísticos obtidos e nas análises realizadas, conclui-se que a modelagem proposta apresentou resultados positivos tanto em termos práticos de aplicabilidade, por ser capaz de traduzir a realidade médica e servir como um apoio à decisão gerencial, quanto do ponto de vista acadêmico, por apresentar um modelo que é enxuto e capaz de responder em tempos computacionais relativamente baixos mesmo em cenários realistas mais complexos.

Com relação aos resultados estocásticos, observou-se uma boa aderência da estratégia utilizada de agrupamento de demandas, que fez com que fosse possível a realização de testes computacionais e análises sem que houvesse falta de memória. Além disso, importantes conclusões foram obtidas com relação à proximidade dos valores das soluções EEV e RP (VSS baixo), enquanto há uma grande distância entre os valores das soluções RP e WS (EVPI alto). Por fim, também houve a observação da faixa na qual há a presença de recursos tanto do tipo “chamar um médico terceiro” quanto “ter médicos ociosos em uma determinada alocação”.

Finalmente, com relação aos comentários recebidos dos gestores de grupos médicos,

observa-se que a solução proposta pode trazer diversos benefícios gerenciais em termos de economia de tempo e em termos de maximização da satisfação dos médicos, além de dar mais segurança de que o dia a dia do grupo está sendo gerenciado da melhor forma possível. O fato de haver ferramentas de apoio à gestão, baseadas em critérios quantitativos e de otimização, torna o cotidiano da atividade gerencial mais produtivo e leve.

Como perspectivas futuras e possibilidades de extensões do trabalho realizado e da área de estudos em questão, podem-se levantar:

- Integração da geração de escalas com a gestão e acompanhamento diário para trocas pontuais devido a exceções, por exemplo, faltas, isto é, o Problema de Realocação Ocasional de Turnos (como exemplo, Wickert, Smet e VANDEN BERGHE (2019));
- Consideração de aspectos de produtividade de cada médico, incorporando, por exemplo, exaustão e fadiga;
- Integração do modelo proposto com a gestão contábil de cada médico, permitindo gerir conjuntamente as alocações e a quantia a receber por cada profissional;
- Consideração da capacidade produtiva dos médicos, de modo que aspectos como fadiga ou exaustão, por exemplo, possam aumentar ao longo de um turno ou ao longo de turnos sucessivos e reduzir a produtividade;
- Incorporação de restrições que garantam ciclos de alocações, como exemplo, repetir semanal ou quinzenalmente uma alocação, podendo ocorrer revezamento entre médicos;
- Possibilidade de seleção de quais restrições *soft* devem ser consideradas e qual a atribuição de pesos respectivos, permitindo assim maior flexibilidade do modelo para aplicação em diversas realidades de grupos médicos;
- Extensão da modelagem matemática por meio da incorporação de conceitos de Otimização Robusta (como exemplo, Bertsimas e Sim (2004)), tratando de abordagens de pior caso para os cenários analisados.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, T.; O’SULLIVAN, M.; WALKER, C. Physician rostering for workload balance. *Operations Research for Health Care*, Elsevier, v. 20, p. 1–10, 2019.
- AL-HARBI, K. M. A.-S. Application of the ahp in project management. *International Journal of Project Management*, Elsevier, v. 19, n. 1, p. 19–27, 2001.
- ALEM, D.; MORABITO, R. Stochastic programming models in the production planning of furniture companies. *Production*, v. 25, 08 2015.
- ANDERSON, M. W. The metrics of workforce planning. *Public Personnel Management*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 33, n. 4, p. 363–378, 2004.
- APPELBAUM, S.; WOHL, L. Transformation or change: some prescriptions for health care organizations. *Managing Service Quality: An International Journal*, v. 10, n. 5, p. 279–298, 2000.
- ATLASON, J.; EPELMAN, M. A.; HENDERSON, S. G. Optimizing call center staffing using simulation and analytic center cutting-plane methods. *Management Science*, v. 54, n. 2, p. 295–309, 2008.
- AVRAMIDIS, A. N. et al. Optimizing daily agent scheduling in a multiskill call center. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 200, n. 3, p. 822–832, 2010.
- AZAIEZ, M. N.; SHARIF, S. S. A. A 0-1 goal programming model for nurse scheduling. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 32, n. 3, p. 491–507, 2005.
- AZMAT, C. S.; HÜRLIMANN, T.; WIDMER, M. Mixed integer programming to schedule a single-shift workforce under annualized hours. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 128, n. 1-4, p. 199–215, 2004.
- BAKER, G. R. Healthcare managers in the complex world of health care. *Frontiers of Health Services Management*, v. 18, n. 2, p. 23–32, 2001.
- BARRETO, A.; BARROS, M. de O.; WERNER, C. M. Staffing a software project: A constraint satisfaction and optimization-based approach. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 10, p. 3073 – 3089, 2008.
- BELIËN, J. et al. Integrated staffing and scheduling for an aircraft line maintenance problem. *Computers & Operations Research*, v. 40, n. 4, p. 1023 – 1033, 2013.
- BERGH, J. Van den et al. Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 226, n. 3, p. 367–385, 2013.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, MCB UP Ltd, 2002.

- BERTSIMAS, D.; SIM, M. The price of robustness. *Operations research*, Informs, v. 52, n. 1, p. 35–53, 2004.
- BIRGE, J. R. State-of-the-art-survey—stochastic programming: Computation and applications. *INFORMS Journal on Computing*, Informs, v. 9, n. 2, p. 111–133, 1997.
- BIRGE, J. R.; LOUVEAUX, F. *Introduction to stochastic programming*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- BODHVARSDOTTIR, E. B.; SMET, P.; BERGHE, G. V. Behind-the-scenes weight tuning for applied nurse rostering. *Operations Research for Health Care*, Elsevier, v. 26, p. 100265, 2020.
- BRUCKER, P.; QU, R.; BURKE, E. Personnel scheduling: Models and complexity. *European Journal of Operational Research*, v. 210, n. 3, p. 467 – 473, 2011.
- BRUECKER, P. D. et al. Workforce planning incorporating skills: State of the art. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 243, n. 1, p. 1–16, 2015.
- BRUSCO, M.; SHOWALTER, M. Constrained nurse staffing analysis. *Omega*, v. 21, n. 2, p. 175 – 186, 1993.
- BURKE, E. et al. A scatter search for the nurse rostering problem. *Journal of the Operational Research Society*, v. 67, p. 1667–1679, 01 2010.
- BURKE, E. K. et al. The state of the art of nurse rostering. *Journal of scheduling*, Springer, v. 7, n. 6, p. 441–499, 2004.
- CAUNHYE, A. M.; NIE, X.; POKHAREL, S. Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-economic Planning Sciences*, Elsevier, v. 46, n. 1, p. 4–13, 2012.
- CAUSMAECKER, P. D.; BERGHE, G. V. A categorisation of nurse rostering problems. *Journal of Scheduling*, Springer, v. 14, n. 1, p. 3–16, 2011.
- CHAPADOS, N.; JOLIVEAU, M.; ROUSSEAU, L.-M. Retail store workforce scheduling by expected operating income maximization. In: SPRINGER. *International Conference on AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems*. [S.l.], 2011. p. 53–58.
- CHEANG, B. et al. Nurse rostering problems - a bibliographic survey. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 151, n. 3, p. 447–460, 2003.
- CHEN, C.-T. Extensions of the topsis for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, Elsevier, v. 114, n. 1, p. 1–9, 2000.
- CISSÉ, M. et al. Or problems related to home health care: A review of relevant routing and scheduling problems. *Operations Research for Health Care*, Elsevier, v. 13, p. 1–22, 2017.
- COTE, M. J.; TUCKER, S. L. Four methodologies to improve healthcare demand forecasting. *Healthcare Financial Management*, Healthcare Financial Management Association, v. 55, n. 5, p. 54–54, 2001.

COTTEN, A. *Seven steps of effective workforce planning*. [S.l.]: IBM Center for the Business of government, 2007.

CREMESP. *RESOLUÇÃO CREMESP Nº 90, DE 21 DE MARÇO DE 2000*. 2000. Acesso em: 02/07/2020. Disponível em: [http://www.cremesp.org.br/library/modulos/legislacao/versao\\_impresao.php?id=3212&versao=integra](http://www.cremesp.org.br/library/modulos/legislacao/versao_impresao.php?id=3212&versao=integra).

DELGADO, M. G. *Curso de Direito do Trabalho*. 9. ed. [S.l.]: São Paulo: LTr, 2010.

DEVESSE, V. A. P. A. et al. Linear approximations to improve lower bounds of a physician scheduling problem in emergency rooms. *Journal of the Operational Research Society*, Taylor Francis, v. 74, n. 3, p. 888–904, 2023.

DIMENSIONS.AI. *Pesquisas de publicações com os termos “operations research” e “health” no título ou resumo*. 2024. Acesso em: 24/01/2024. Disponível em: [https://app.dimensions.ai/analytics/publication/overview/timeline?search\\_text=Operations\%20Research\%20AND\%20Health&search\\_type=kws&search\\_field=text\\_search&year\\_from=1971&year\\_to=2024](https://app.dimensions.ai/analytics/publication/overview/timeline?search_text=Operations\%20Research\%20AND\%20Health&search_type=kws&search_field=text_search&year_from=1971&year_to=2024).

DOCTORID. *Página inicial*. 2020. Acesso em: 02/08/2020. Disponível em: <https://www.doctorid.com.br/website>.

DRAY, S. The importance of designing usable systems. *Interactions*, ACM New York, NY, USA, v. 2, n. 1, p. 17–20, 1995.

ERHARD, M. et al. State of the art in physician scheduling. *European Journal of Operational Research*, v. 265, p. 1–18, 2018.

ERNST, A. et al. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European Journal of Operational Research*, v. 153, n. 1, p. 3 – 27, 2004a.

ERNST, A. T. et al. An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 127, n. 1-4, p. 21–144, 2004b.

FOWLER, J. W.; WIROJANAGUD, P.; GEL, E. S. Heuristics for workforce planning with worker differences. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 190, n. 3, p. 724–740, 2008.

FREITAS, J. C. de et al. Optimization model applied to radiotherapy planning problem with dose intensity and beam choice. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, v. 387, p. 124786, 2020.

GARG, L. et al. Intelligent patient management and resource planning for complex, heterogeneous, and stochastic healthcare systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, v. 42, n. 6, p. 1332–1345, 2012.

GIANESI, I.; CORREA, H. *Administração estratégica de serviços: operações para a satisfação do cliente*. [S.l.]: Atlas, 1994.

GOOGLE. *Google agenda*. 2020. Acesso em: 05/08/2020. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR/calendar/about/>.

- GULATI, R. Tent poles, tribalism, and boundary spanning: The rigor-relevance debate in management research. *Academy of Management Journal*, Academy of Management Briarcliff Manor, NY 10510, v. 50, n. 4, p. 775–782, 2007.
- GUNAWAN, A.; LAU, H. C. Master physician scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, Springer, v. 64, n. 3, p. 410–425, 2013.
- GUROBI. *Mixed-Integer Programming (MIP) – A Primer on the Basics*. 2020. Acesso em: 26/09/2020. Disponível em: <https://www.gurobi.com/resource/mip-basics/>.
- HAMDAN, B.; DIABAT, A. Robust design of blood supply chains under risk of disruptions using lagrangian relaxation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 134, p. 101764, 2020.
- ISKEN, M. W. Modeling and analysis of occupancy data: A healthcare capacity planning application. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, v. 01, n. 04, p. 707–729, 2002.
- JLASSI, J.; CHABCHOUB, H.; MHAMEDI, A. E. A combined ahp-gp model for nurse scheduling. In: IEEE. *2011 4th International Conference on Logistics*. [S.l.], 2011. p. 132–136.
- KIM, K.; MEHROTRA, S. A two-stage stochastic integer programming approach to integrated staffing and scheduling with application to nurse management. *Operations Research*, INFORMS, v. 63, n. 6, p. 1431–1451, 2015.
- LAN, S. et al. A variable neighborhood search algorithm for an integrated physician planning and scheduling problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 147, p. 105969, 2022.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992.
- MANGASARIAN, O. L.; STREET, W. N.; WOLBERG, W. H. Breast cancer diagnosis and prognosis via linear programming. *Operations Research*, INFORMS, v. 43, n. 4, p. 570–577, 1995.
- MARCHESI, J. F.; HAMACHER, S.; FLECK, J. L. A stochastic programming approach to the physician staffing and scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, v. 142, p. 106281, 2020.
- MCKONE-SWEET, K. E.; HAMILTON, P.; WILLIS, S. B. The ailing healthcare supply chain: A prescription for change. *Journal of Supply Chain Management*, v. 41, n. 1, p. 4–17, 2005.
- MICROSOFT. *Microsoft Excel, template de geração de turno de trabalho*. 2020. Acesso em: 03/08/2020. Disponível em: <https://templates.office.com/en-us/employee-shift-schedule-tm16400192>.
- MIHAYLOV, M. et al. Facilitating the transition from manual to automated nurse rostering. *Health Systems*, Springer, v. 5, n. 2, p. 120–131, 2016.



- MINITAB, I. *Minitab 21.2.0*. 2023. Acesso em: 27/02/2023. Disponível em: [www.minitab.com](http://www.minitab.com).
- MUNDSCHENK, M.; DREXL, A. Workforce planning in the printing industry. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 45, n. 20, p. 4849–4872, 2007.
- OR, I.; PIERSKALLA, W. P. A transportation location-allocation model for regional blood banking. *A I I E Transactions*, Taylor & Francis, v. 11, n. 2, p. 86–95, 1979.
- PACE. *Features in Scheduling*. 2020. Acesso em: 03/08/2020. Disponível em: <https://www.pacescheduler.com/features>.
- PARISIO, A.; JONES, C. N. A two-stage stochastic programming approach to employee scheduling in retail outlets with uncertain demand. *Omega*, Elsevier, v. 53, p. 97–103, 2015.
- PERERA, F. de P. R.; PEIRO, M. Strategic planning in healthcare organizations. *Revista Española de Cardiología (English Edition)*, v. 65, n. 8, p. 749 – 754, 2012.
- PETROVIC, S.; BERGHE, G. V. A comparison of two approaches to nurse rostering problems. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 194, n. 1, p. 365–384, 2012.
- PIERSKALLA, W. P.; BRAILER, D. J. Applications of operations research in health care delivery. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Elsevier, v. 6, p. 469–505, 1994.
- QGENDA. *Demonstração da geração automatizada de escalas*. 2020. Acesso em: 03/08/2020. Disponível em: <https://www.qgenda.com/thank-you-demo/>.
- RAIS, A.; VIANA, A. Operations research in healthcare: a survey. *International Transactions in Operational Research*, v. 18, p. 1–31, 2010.
- RESPICIO, A. et al. A computational application for multi-skill nurse staffing in hospital units. *BMC medical informatics and decision making*, Springer, v. 18, n. 1, p. 53, 2018.
- RESTREPO, M. I.; GENDRON, B.; ROUSSEAU, L.-M. A two-stage stochastic programming approach for multi-activity tour scheduling. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 262, n. 2, p. 620–635, 2017.
- ROSA, A. R.; NOGUEIRA, W. L. A proteção jurídica da jornada de trabalho do médico. *Revista de Direitos Fundamentais nas Relações do Trabalho, Sociais e Empresariais*, v. 2, n. 1, 2017.
- ROUSSEAU, L.-M.; PESANT, G.; GENDREAU, M. A general approach to the physician rostering problem. *Annals of Operations Research*, Springer, v. 115, n. 1-4, p. 193–205, 2002.
- ROYSTON, G. One hundred years of operational research in health—uk 1948—2048. *Journal of the Operational Research Society*, p. S169 – S179, 2009.
- RYU, M.; JIANG, R. Nurse staffing under absenteeism: A distributionally robust optimization approach. 2022.

- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, Elsevier, v. 9, n. 3-5, p. 161–176, 1987.
- SAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 28, n. 6-7, p. 971–983, 2004.
- SEGEV, D. L. et al. Kidney paired donation and optimizing the use of live donor organs. *Jama*, American Medical Association, v. 293, n. 15, p. 1883–1890, 2005.
- SHAPIRO, A. Stochastic programming approach to optimization under uncertainty. *Mathematical Programming*, Springer, v. 112, n. 1, p. 183–220, 2008.
- SHIFTADMIN. *Página inicial*. 2020. Acesso em: 03/08/2020. Disponível em: <https://www.shiftadmin.com/?l=y>.
- SMET, P. et al. Polynomially solvable personnel rostering problems. *European Journal of Operational Research*, v. 249, n. 1, p. 67–75, 2016. ISSN 0377-2217. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221715007626>.
- SÖRENSEN, K.; GLOVER, F. Metaheuristics. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer New York, v. 62, p. 960–970, 2013.
- TAMIZ, M.; JONES, D. F.; EL-DARZI, E. A review of goal programming and its applications. *Annals of operations Research*, Springer, v. 58, p. 39–53, 1995.
- THIELEN, C. Duty rostering for physicians at a department of orthopedics and trauma surgery. *Operations Research for Health Care*, Elsevier, v. 19, p. 80–91, 2018.
- TRIANANTAPHYLLOU, E. Multi-criteria decision making methods. *Multi-criteria decision making methods: A comparative study*, Springer, p. 131–175, 2000.
- VARGO, S.; LUSCH, R. From goods to service(s): Divergences and convergences of logistics. *Industrial Marketing Management*, v. 37, p. 254–259, 2008.
- WENIGER, B. G. et al. Addressing the challenges to immunization practice with an economic algorithm for vaccine selection. *Vaccine*, Elsevier, v. 16, n. 19, p. 1885–1897, 1998.
- WEST, E. et al. Nurse staffing, medical staffing and mortality in intensive care: An observational study. *International Journal of Nursing Studies*, v. 51, n. 5, p. 781 – 794, 2014.
- WICKERT, T. I. et al. An integer programming approach for the physician rostering problem. *Annals of Operations Research*, Springer, p. 1–28, 2021.
- WICKERT, T. I.; SMET, P.; VANDEN BERGHE, G. The nurse rostering problem: Strategies for reconstructing disrupted schedules. *Computers Operations Research*, v. 104, p. 319–337, 2019. ISSN 0305-0548. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054818303265>.
- WINSTON, W. L.; GOLDBERG, J. B. *Operations research: applications and algorithms*. [S.l.]: Thomson/Brooks/Cole Belmont e Calif Calif, 2004. v. 3.

WIROJANAGUD, P. et al. Modelling inherent worker differences for workforce planning. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 45, n. 3, p. 525–553, 2007.

## APÊNDICE A – UM MODELO DO PDCT

Encontra-se, no apêndice em questão, um exemplo de modelagem possível para o PDCT, definido por Wirojanagud et al. (2007) e aplicado à área de manufatura, com as Tabelas 42 e 43 trazendo definições e o conjunto de expressões descritivas do modelo.

Tabela 42: Índices, conjuntos e parâmetros para modelo de PDCT.

Elemento	Descrição
$\alpha, \beta$	Conjunto de habilidades antes e depois do treinamento
$S$	Todos os subconjuntos não vazios de habilidades
$A$	Tempo disponível de trabalho para cada período
$i \in \{1, \dots, M\}$	Em que $i$ é o índice de cada habilidade e $M$ é o número de habilidades contempladas
$g \in \{1, \dots, G\}$	Em que $g$ é o índice de cada nível de habilidade e $G$ é o número de níveis de habilidade
$t \in \{1, \dots, T\}$	Em que $t$ é o índice de cada período e $T$ é o número de períodos considerados
$h_{\alpha,g}^t$	Custo de contratar um trabalhador de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ no período $t$
$c_{\alpha,\beta,g}^t$	Custo de treinar um trabalhador de nível $g$ do conjunto de habilidades $\alpha$ para $\beta$ no período $t$
$s_{\alpha,g}^t$	Salário de um trabalhador de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ no período $t$
$f_{\alpha,g}^t$	Penalidade ao se demitir um trabalhador de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ no período $t$
$p_i^t$	Penalidade por deixar de satisfazer uma unidade de produção com habilidade $\alpha$ no período $t$
$y_{g,i}$	Produtividade de um trabalhador de nível $g$ na habilidade $i$ (valor entre 0 e 1)
$\lambda_{\alpha,g}$	Produtividade de treinamento de trabalhador recém-contratado de nível $g$ com conjunto de habilidade $\alpha$
$\gamma_{\alpha,\beta,t}$	Produtividade de um trabalhador em treinamento do conjunto de habilidades $\alpha$ para $\beta$ no período $t$
$\omega_i^t$	Demanda pela habilidade $i$ no período $t$ (em horas e trabalho por período considerado)

Fonte: Wirojanagud et al. (2007).

Tabela 43: Variáveis de decisão para modelo de PDCT.

Variável	Descrição
$U_{\alpha,g}^t$	Número de trabalhadores de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ contratados no período $t$
$X_{\alpha,\beta,g}^t$	Número de trabalhadores de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ treinados ao nível $\beta$ no período $t$
$\zeta_{\alpha,g}^t$	Número de trabalhadores de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ no período $t$
$W_{\alpha,g}^t$	Número de trabalhadores de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ demitidos no período $t$
$Z_i^t$	Número de horas de atividade não realizadas com requisito $i$ no período $t$
$Y_{\alpha,g,i}^t$	Número de trabalhadores de nível $g$ com conjunto de habilidades $\alpha$ alocados na atividade $i$ , no período $t$

Fonte: Wirojanagud et al. (2007).

Um modelo genérico para o PDCT é apresentado a seguir (WIROJANAGUD et al., 2007):

$$\min \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{g=1}^G \left( \sum_{\alpha \in S} h_{\alpha,g}^t \cdot U_{\alpha,g}^t + \sum_{\beta \in S} \sum_{\alpha \subset \beta} (c_{\alpha,\beta,g}^t \cdot X_{\alpha,\beta,g}^t) + \sum_{\alpha \in S} s_{\alpha,g}^t \cdot \zeta_{\alpha,g}^{t-1} + \sum_{\alpha \in S} f_{\alpha,g}^t \cdot W_{\alpha,g}^t \right) + \sum_{i=1}^M p_i^t \cdot Z_i^t \right] \quad (\text{A.1})$$

$$A \left[ \sum_{g=1}^G \sum_{\alpha: i \in \alpha \in S} y_{g,i} \cdot Y_{\alpha,g,i}^t \right] + Z_i^t = \omega_i^t, \quad \forall i \in \{1, \dots, M\}, \quad \forall t \in T \quad (\text{A.2})$$

$$\sum_{\beta: \alpha \subset \beta} X_{\alpha,\beta,g}^t + W_{\alpha,g}^t \leq \zeta_{\alpha,g}^{t-1} \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T, \quad \forall \alpha \in S \quad (\text{A.3})$$

$$\zeta_{\alpha,g}^{t-1} + \lambda_{\alpha g} \cdot U_{\alpha,g}^t + \sum_{v: v \subset \alpha} \delta_{v,\alpha,g} \cdot X_{v,\alpha,g}^t - \sum_{\beta: \alpha \subset \beta} X_{\alpha,\beta,g}^t - W_{\alpha,g}^t \geq \sum_{i \in \alpha} Y_{\alpha,g,i}^t \quad \forall g \in G, \quad \forall t \in T, \quad \forall \alpha \in S \quad (\text{A.4})$$

$$\zeta_{\alpha,g}^t = \zeta_{\alpha,g}^{t-1} + U_{\alpha,g}^t + \sum_{v:v \subset \alpha} X_{v,\alpha,g}^t - \sum_{\beta:\alpha \subset \beta} X_{\alpha,\beta,g}^t - W_{\alpha,g}^t \quad \forall g \in G, \forall t \in T, \forall \alpha \in S \quad (\text{A.5})$$

$$U_{\alpha,g}^t, X_{\alpha,\beta,g}^t, W_{\alpha,g}^t \in \mathbb{Z}_+, \zeta_{\alpha,g}^t, Z_i^t, Y_{\alpha,g,i}^t \geq 0 \quad (\text{A.6})$$

A função objetivo (A.1) trata da minimização dos custos totais levando em consideração  $T$  períodos, contemplando contratações, treinamentos, salários, demissões e perdas de produção/produktividade. Já com relação às restrições, tem-se (WIROJANAGUD et al., 2007):

- As restrições (A.2) garantem a satisfação da demanda e delimitação do número de unidades de produção perdidas em cada período;
- As restrições (A.3) garantem a continuidade do número de trabalhadores com um determinado nível de habilidade em uma atividade, considerando treinamentos, demissões e contratações;
- As restrições (A.4) garantem que o número de tarefas realizadas seja menor ou igual ao número de trabalhadores que sabem executá-las;
- As restrições (A.5) tratam do balanceamento de funcionários entre diferentes períodos, considerando também os treinamentos realizados;
- As restrições (A.6) definem o domínio das variáveis do problema.

## APÊNDICE B – UM MODELO DO PAF

Encontra-se, no apêndice em questão, um exemplo de modelagem possível para o PAF, definido por Smet et al. (2016), sendo este o segundo dos quatro modelos apresentados no artigo em questão, com a Tabela 44 trazendo as definições de conjuntos, parâmetros, e variáveis descritivas do modelo.

Tabela 44: Definição de índices, conjuntos, parâmetros e variáveis para modelo genérico de PAF.

Elementos	Descrição
$i \in E / E = \{1, \dots, e\}$	Em que $E$ é o conjunto dos trabalhadores, $e$ é o número total de trabalhadores e $i$ é o índice de cada trabalhador
$j \in T / T = \{1, \dots, t\}$	Em que $T$ é o conjunto de períodos considerados, $t$ é o número total de períodos e $j$ é o índice de cada período
$k \in S / S = \{1, \dots, s\}$	Em que $S$ é o conjunto de turnos de trabalho considerados, $s$ é o número total de turnos e $k$ é o índice de cada turno
$\bar{S}_{i,j}$	Subconjunto de turnos os quais um trabalhador $i$ está disponível e autorizado a trabalhar no dia $j$
$d_{j,k}^{(l)}, d_{j,k}^{(h)}$	Valores mínimo e máximo de demanda por trabalhadores no dia $j$ , turno $k$
$a_i$	Número de alocações do trabalhador $i$ ao longo do horizonte de planejamento
$c_{i,j,k}$	Custo de alocação de um trabalhador $i$ no dia $j$ e turno $k$
$x_{i,j,k} \in \{0, 1\}$	Variável de decisão, com valor 1 caso o trabalhador $i$ esteja alocado no dia $j$ e turno $k$ , e valor 0 caso contrário

Fonte: Smet et al. (2016).

Um modelo genérico para o PAF é apresentado a seguir (SMET et al., 2016):

$$\min \sum_{i \in E} \sum_{j \in T} \sum_{k \in S} c_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} \quad (\text{B.1})$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in S} x_{i,j,k} \leq 1, \quad \forall i \in E, j \in T \quad (\text{B.2})$$

$$d_{j,k}^{(l)} \leq \sum_{i \in E} x_{i,j,k} \leq d_{j,k}^{(h)}, \quad \forall j \in T, k \in S \quad (\text{B.3})$$

$$\sum_{j \in T} \sum_{k \in S} x_{i,j,k} = a_i, \quad \forall i \in E \quad (\text{B.4})$$

$$\sum_{k \in S \setminus \tilde{S}_{i,j}} x_{i,j,k} = 0, \quad \forall i \in E, j \in T \quad (\text{B.5})$$

$$x_{i,j,k} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in E, j \in T, k \in S \quad (\text{B.6})$$

A função objetivo (B.1) trata da minimização dos custos de alocação dos trabalhadores em cada dia e turno, sujeito às seguintes restrições:

- As restrições (B.2) garantem o máximo de um turno de trabalho diário para cada trabalhador;
- As restrições (B.3) garantem a demanda entre os valores mínimo e máximo;
- As restrições (B.4) garantem a restrição de limite de alocações no horizonte de planejamento<sup>1</sup>;
- As restrições (B.5) garantem a não alocação de trabalhadores em turnos nos quais eles não estejam disponíveis ou autorizados;
- Finalmente, as restrições (B.6) definem o domínio das variáveis do problema.

Como comentário interessante, há o fato de que casos mais simples do PAF, como é o exemplo deste modelo, não pertencem à classe de problemas *NP-hard*, e podem ser resolvidos em tempo polinomial, fato demonstrado por meio da conversão do problema a um modelo de fluxo em redes (SMET et al., 2016).

---

<sup>1</sup>Embora pudesse ser tratado como uma restrição do tipo “ $\leq$ ”, a formulação original traz o sinal de “ $=$ ”.



# APÊNDICE C – SOLUÇÕES ATUAIS DE GERAÇÕES DE ESCALAS DE TRABALHO

Encontra-se, no apêndice em questão, o detalhamento das soluções para geração de escalas de trabalho, sejam elas *softwares* ou interfaces:

## I. DoctorID

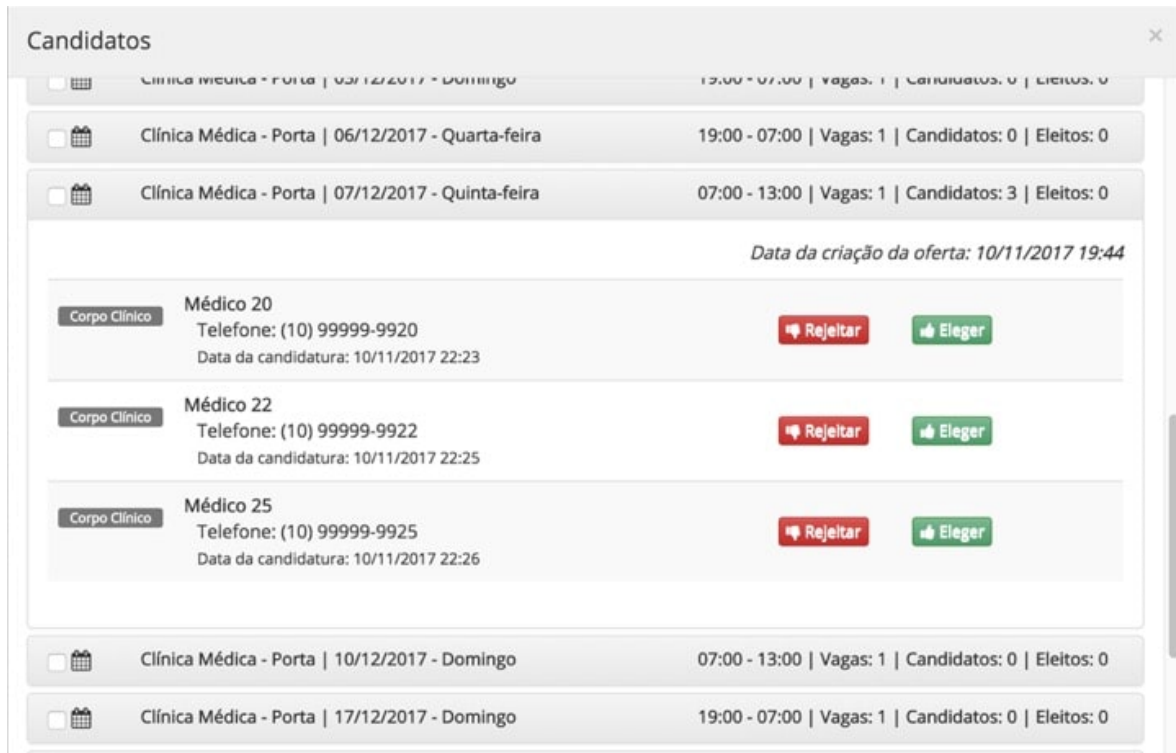
O *software* pago DoctorID se encontra como um dos mais conhecidos entre gestores de áreas médicas, justamente por buscar uma grande integração entre diversos aspectos de gestão, como a geração de escalas de maneira automatizada ou manual com auxílio de especialistas, controle do acompanhamento diário, pagamento, eventuais necessidades de troca e integração com outros sistemas gerenciais da organização, por meio de relatórios. As Figuras 27 e 28 trazem, respectivamente, imagens de exemplo de escalas geradas e de processo de substituição de plantões devido a uma falta não programada de médico em um período.

Figura 27: Exemplificação da escala gerada com a ferramenta DoctorID.



Fonte: DoctorID (2020).

Figura 28: Exemplificação da substituição de plantões com a ferramenta DoctorID.



Fonte: DoctorID (2020).

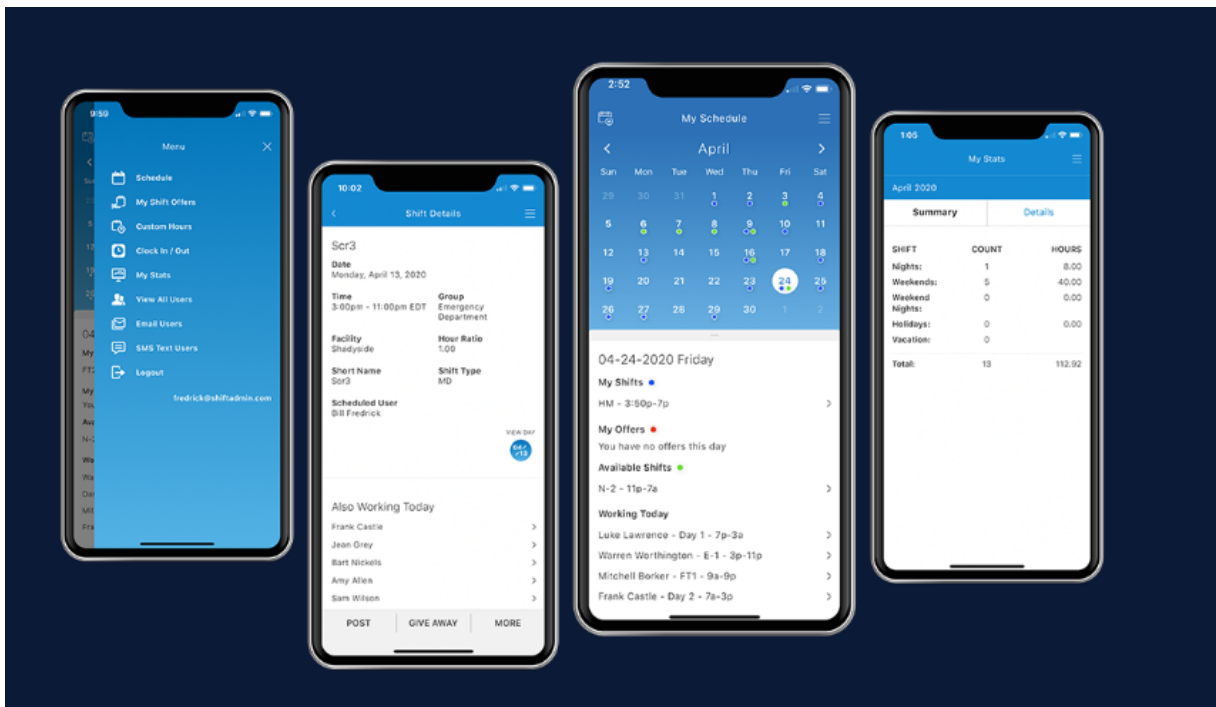
Torna-se interessante observar a facilidade da interface de escolha por parte do gestor, que consegue verificar todos os profissionais disponíveis para cobertura e escolher o mais capacitado.

## II. Shift Admin

A opção paga de mercado em questão possui grande aceitação principalmente nos Estados Unidos, com foco também em integração entre diversos sistemas, como suporte a pagamento, gestão de recursos humanos e integração com outros *softwares* de gestão de empresas. Como diferencial, a geração de escalas automáticas possui grande flexibilidade por parte do gestor da área médica, com a possibilidade de customização de regras para a modelagem (o usuário pode alterar o peso das restrições utilizadas para gerar a solução final) (SHIFTADMIN, 2020).

A Figura 29 traz ilustração da interface de usuário do Shift Admin, com suas funcionalidades tanto de criação de turnos de trabalho quanto de gestão após criação.

Figura 29: Ilustração da interface de usuário da solução Shift Admin.



Fonte: ShiftAdmin (2020).

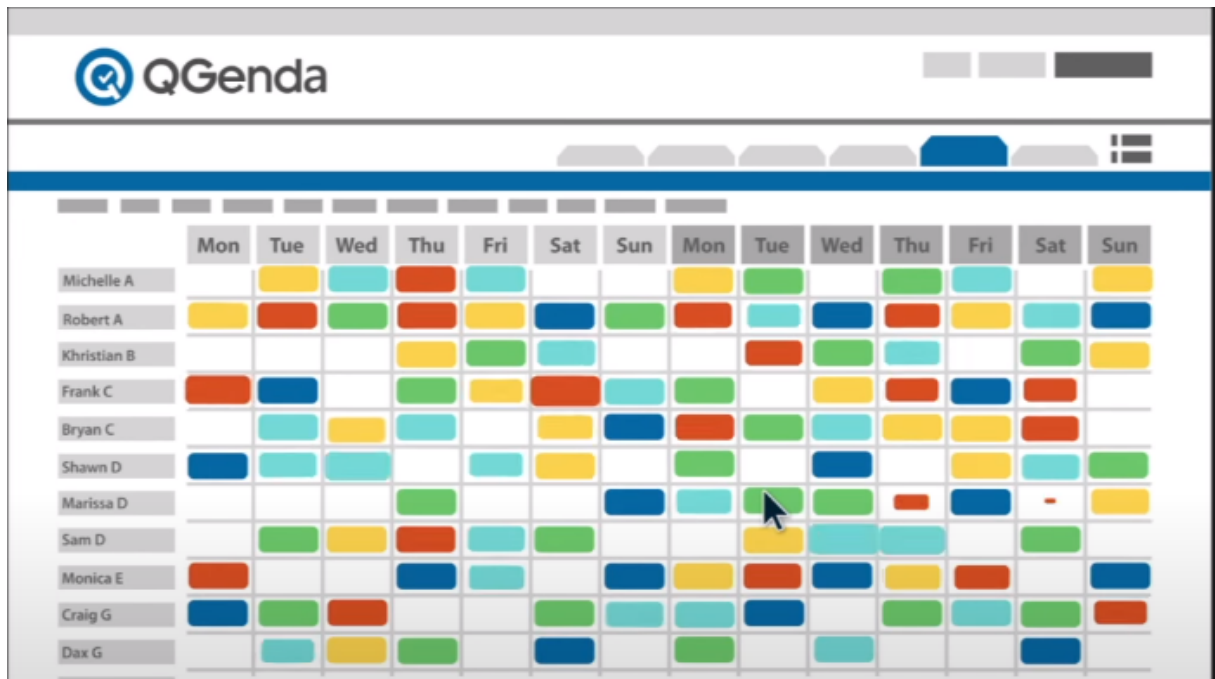
Como comentário interessante, há a observação de que este aplicativo permite que os médicos adicionem suas preferências individuais como *input* no *software*.

### III. Qgenda

O *software* pago QGenda traz solução que incorpora, assim como a última, sistema de ponderação de pesos a fim de customizar a modelagem de acordo com as necessidades de cada organização, assim gerando uma escala personalizada de modo a melhor satisfazer a realidade de cada cliente. Além disso, possui interface de modo a facilmente inserir períodos de indisponibilidade programada de médicos e períodos de férias, ao mesmo tempo em que auxilia na gestão de substituições (QGENDA, 2020).

A Figura 30 traz exemplificação da funcionalidade do aplicativo, na área de geração de escalas de trabalho.

Figura 30: Ilustração minimalista da interface de usuário da solução QGenda.



Fonte: QGenda (2020).

### IV. PACE Scheduler

Em contraposição às três soluções anteriores, o programa pago PACE Scheduler não é específico para a realidade médica, mas sim uma solução mais genérica, aplicável a diversas áreas como a médica, a policial e a de segurança. Apesar de não apresentar geração automatizada com a flexibilidade das demais aplicações, permite uma visão integrada da escala gerada, com controle de alocações atuais *versus* de-

manda mínima necessária e possibilidade de intercambialidade entre turnos (PACE, 2020).

As Figuras 31 e 32 trazem, respectivamente, ilustração de visão da escala gerada (por dia e por trabalhador) e funcionalidade de apontar quando um turno está com alocação abaixo da demanda prevista.

Figura 31: Ilustração da escala gerada pela solução PACE Scheduler.

Day Shift													Wednesday	Thursday	Friday	Saturday
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3	4	5
ID	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S			
Sgt. Rice	71			D	D	D	D	D	D					S Aaron Rice	S Aaron Rice	S Aaron Rice
Sgt. Wilson	74	D	D	D				D	D	D	D	D	D	S Joseph Wilson	P Henry Herd	P Henry Herd
Ofc. Herd	65	D	D	D	D					D	D	D	D	P Henry Herd	P Roland Sander	P Randolph Trega
Ofc. Trega	50	D				D	D	D	D	D	D			P Wade Valentin	P Harold Frizzell	P Harold Frizzell
Ofc. McElroy	86	D	D				D	D	D	D	D	D		P Roland Sander	P Dale Dean	P Dale Dean
Ofc. Valentin	44	D	D	D						D	D	D	D	P Harold Frizzell	P Chuck Petillo	P Chuck Petillo
Ofc. Sander	45	D	D	D	D				D	D	D	D		P Dale Dean	P James Stratton	P James Stratton
Ofc. Frizzell	80	D	D	D	D	D				D	D	D		P Chuck Petillo		
Ofc. Dean	83	D	D	D	D	D	D				D	D		P James Stratton		
Ofc. Petillo	78		D	D	D	D	D					D	D			
Ofc. Stratton	72			D	D	D	D	D					D			
06:00-14:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
06:00-14:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
Afternoon Shift													Wednesday	Thursday	Friday	Saturday
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	3	4	5
ID	T	W	T	F	S	S	M	T	W	T	F	S	S			
Sgt. Griffith	43				A	A	A	A	A					AD Tim Torres	AD Tim Torres	S Roger Griffith
Sgt. Hill	84	A	A	A				A	A	A	A	A	A	AD Anthony Ramsey	AD Anthony Ramsey	P Steve Mancione
Ofc. Nugent	31		A	A	A	A	A	A				A	A	AD William Cano	AD William Cano	P Sam White
Ofc. White	61				A	A	A	A	A	A				AD Nadine Hill	AD Nadine Hill	P Mike Cedlin
Ofc. Cedlin	88	A				A	A	A	A	A	A					P Jim Keiper
Ofc. Grimes	75	A	A				A	A	A	A	A	A				P Donald Hoover
Ofc. Prieur	49	A	A	A				A	A	A	A	A				P Fred Nugent
Ofc. Smith	41	A	A	A	A				A	A	A	A	A			P David Hunt
Ofc. Keiper	32	A	A	A	A	A				A	A	A	A			
Ofc. Hoover	33	A	A	A	A	A	A				A	A	A			
07:30 - 15:30	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
07:30 - 15:30	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
08:00 - 14:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
08:00 - 14:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
08:00 - 16:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
08:00 - 16:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
14:00 - 22:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
14:00 - 22:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
08:00 - 16:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
08:00 - 16:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
14:00 - 22:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
14:00 - 22:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
08:30 - 16:30	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
08:30 - 16:30	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6
22:00 - 06:00	Supervisors	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	1
22:00 - 06:00	Officers	7	7	7	6	6	5	5	5	6	7	7	7	6	6	6

Fonte: PACE (2020).

Figura 32: Ilustração de aviso de não satisfação da demanda pela solução PACE Scheduler.



Fonte: PACE (2020).

Vale como comentário que as primeiras quatro soluções de mercado apresentadas nesse apêndice são pagas e demandam conversas com a equipe de suporte das aplicações para a geração de escalas de trabalho, em troca da facilidade e possibilidade de integração com outros sistemas e com a esfera de contabilidade. As duas próximas soluções podem ser obtidas ou sem custos ou por meio de interfaces que usualmente organizações já têm acesso à assinatura.

## V. Microsoft Excel

Em se tratando de ferramenta que é amplamente utilizada na grande maioria das organizações e que possui grande aceitação de mercado e conhecimento por parte de gestores, uma saída encontrada para o auxílio na criação de escalas de trabalho de custo relativamente baixo é o *software* Excel. Por meio de *templates* existentes, há a possibilidade de criação manual de escalas de trabalho, preenchendo em formatos tanto de calendário quanto de diagrama de Gantt (MICROSOFT, 2020).

A Figura 33 mostra interface da ferramenta com o *template* de criação de turnos de trabalho, com as limitações de ser manual e de não possuir qualquer ferramenta de trocas, caso haja algo inesperado ao longo do acompanhamento após criação da escala.

Figura 33: Interface do usuário para *template* de geração de escalas de trabalho em Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1		<b>Shift Schedule</b>											
2		For the Week of:	Date _____										
3		Department Name:	Name _____										
4													
5		MONDAY	7:00 AM	8:00 AM	9:00 AM	10:00 AM	11:00 AM	12:00 PM	1:00 PM	2:00 PM	3:00 PM	Sick?	TOTAL
6		Name 1	manager	manager	manager	manager	manager	manager	manager	manager	manager		9
7		Name 2		cashier	cashier	cashier	cashier						4
8		Name 3		front desk	front desk	front desk	front desk	front desk	front desk	front desk			7
9		Name 4		front desk	front desk	front desk	front desk	front desk	front desk	front desk			7
10		Name 5									Sick		0
11													
12													

Fonte: MICROSOFT (2020).

### VI. Google Agenda

Por fim, uma última alternativa que se observa para a questão de geração de escalas de trabalho é a incorporação da funcionalidade de agendamentos, por meio do uso da plataforma Google, para o auxílio na organização dos turnos de trabalho. A vantagem na utilização dessa ferramenta é que, além de não se ter custos associados, existe a praticidade em conectar os compromissos da agenda com os *smartphones* e permitir maior controle por parte dos médicos.

A Figura 34 traz agenda utilizada para a gestão de plantões de profissionais da área médica, feita de forma manual e com necessidade de modificações manuais ao longo do acompanhamento, de acordo com necessidades de trocas entre profissionais.

Figura 34: Interface do usuário para calendário/agenda da empresa Google.

The screenshot shows a Google Calendar interface for August 2020. The view is set to 'Semana' (Week). The days of the week are labeled: DOM (2), SEG (3), TER (4), QUI (5), QUI (6), SEX (7), SÁB (8). The calendar grid shows various shifts and events for medical professionals, with color-coded blocks for different times and days. The current date is August 5th (Quinta-feira).

Fonte: GOOGLE (2020).

# APÊNDICE D – NÍVEIS DE DEMANDA PARA CADA GRUPO REPRESENTATIVO UTILIZADO NO TESTE DE VIABILIDADE DO MODELO ESTOCÁSTICO.

Para cada respectivo número de grupos representativos utilizado no teste de viabilidade computacional do Modelo Estocástico, as Tabelas 45, 46, e 47 trazem as demandas segmentadas pelos fatores relevantes.

Tabela 45: Demanda, em diferentes níveis, referente a cada grupo para o cenário com 3 agrupamentos.

Grupo	Setor	Demanda Baixa	Demanda Alta
1	Setor 1	2	5
2	Setor 2	2	4
3	Setor 3	1	2

Fonte: O autor.



Tabela 46: Demanda, em diferentes níveis, referente a cada grupo para o cenário com 6 agrupamentos.

Grupo	Dias	Setor	Demanda Baixa	Demanda Alta
1	Segunda-Sexta	Setor 1	2	5
2	Sábado e Domingo		1	2
3	Segunda-Sexta	Setor 2	2	4
4	Sábado e Domingo		1	2
5	Segunda-Sexta	Setor 3	0	1
6	Sábado e Domingo		1	2

Fonte: O autor.

Tabela 47: Demanda, em diferentes níveis, referente a cada grupo para o cenário com 12 agrupamentos.

Grupo	Dias	Turnos	Setor	Demanda Baixa	Demanda Alta
1	Segunda-Sexta	Manhã e Tarde	Setor 1	3	5
2	Sábado e Domingo			2	3
3	Segunda-Sexta	Noite		2	3
4	Sábado e Domingo			1	2
5	Segunda-Sexta	Manhã e Tarde	Setor 2	3	4
6	Sábado e Domingo			3	4
7	Segunda-Sexta	Noite		2	3
8	Sábado e Domingo			1	2
9	Segunda-Sexta	Manhã e Tarde	Setor 3	1	2
10	Sábado e Domingo			1	2
11	Segunda-Sexta	Noite		0	1
12	Sábado e Domingo			0	1

Fonte: O autor.