

Programação Linear Inteira Mista aplicada ao Problema de Escalonamento de Salas de Cirurgia de um Hospital Público Brasileiro

João Paulo F. da Silva, Lucas R. Bortoletto, Rafael C. S. Schouery

Instituto de Computação - Universidade de Campinas

Av. Albert Einstein, 1251 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-852

joao.silva@ic.unicamp.br, 1173422@dac.unicamp.br, rafael@ic.unicamp.br

Edilson F. de Arruda

Southampton Business School - University of Southampton

Burgess Road, SO16 7QF - Hampshire, Southampton - UK

e.f.arruda@southampton.ac.uk

Fabricio F. Santos, Ana Paula C. I. Alves

Hospital de Clínicas - Universidade de Campinas

Rua Vital Brasil, 251 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-888

ffsantos@unicamp.br, anapcia@unicamp.br

RESUMO

Propomos um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o Problema de Escalonamento de Salas de Cirurgia em um hospital público brasileiro, focado no nível tático. Além de incluir restrições conhecidas na literatura para este problema, o modelo se diferencia por contemplar limitação de anestesiologistas, alocação simultânea de salas para transplantes e priorização de subespecialidades médicas. A validação com dados reais do Hospital de Clínicas da Universidade Estadual de Campinas demonstrou que a proposta, implementada com um resolvidor de licença livre, replica a escala tradicional feita no hospital e amplia a alocação de salas, evidenciando sua aplicabilidade.

PALAVRAS CHAVE. Otimização, Escalonamento de Salas Cirúrgicas, Programação Linear Inteira Mista.

Tópicos (Pesquisa Operacional na Área da Saúde; Otimização Combinatória)

ABSTRACT

We propose a Mixed Integer Linear Programming model for the Operating Theatre Scheduling Problem in a Brazilian public hospital, focusing on the tactical level. Whilst our model includes well-known restrictions from the literature, it also differs in that it includes constraints regarding the availability of anaesthetists, the simultaneous allocation of theatres for transplants, and the prioritisation of medical subspecialties. The validation with the real data from the University of Campinas Hospital of Clinics showed that the approach, implemented with free licence solver, is able to replicate the traditional schedule while extending operating theatre capacity, thus demonstrating its applicability.

KEYWORDS. Optimization, Operating Room Scheduling, Mixed Integer Linear Programming.

Paper topics (Operations Research in Healthcare; Combinatorial Optimization)

1. Introdução

O Hospital de Clínicas da Universidade Estadual de Campinas (HC-UNICAMP) é referência em saúde pública, ensino e pesquisa, atendendo uma população de aproximadamente 6,5 milhões de habitantes [HC - Unicamp, 2024c,a,d]. Entre seus principais serviços está a cirurgia eletiva, caracterizada pelo agendamento prévio e, no caso deste hospital, realizada em salas cirúrgicas exclusivas, cuja gestão é essencial para a eficiência do atendimento [HC - Unicamp, 2024b].

O planejamento destas salas é um desafio complexo que envolve a alocação de blocos de tempo a subespecialidades médicas, respeitando restrições como a disponibilidade de especialistas, anestesiologistas e a compatibilidade entre procedimentos e salas [Rahimi e Gandomi, 2021]. No HC-UNICAMP, dificuldades adicionais incluem a escassez de anestesiologistas e restrições para transplantes, aumentando a complexidade da gestão.

Esse planejamento pode ser formulado como um problema de otimização, visando maximizar a utilização de tais salas [Harris e Claudio, 2022]. Formalmente, o Problema de Escalonamento de Salas de Cirurgia (OTSP - *Operating Theatre Scheduling Problem*) consiste na alocação de recursos (e.g., equipes médicas e equipamentos) às salas cirúrgicas, respeitando restrições operacionais [Harris e Claudio, 2022].

A literatura sobre o OTSP vem crescendo rapidamente, impulsionada pela busca por maior eficiência hospitalar e pela necessidade de reduzir atrasos e custos, em especial no contexto pós-pandemia [de Melo e Fogliatto, 2025; Beliën et al., 2024; Childers e Maggard-Gibbons, 2018]. Entre as abordagens para resolução do OTSP, métodos exatos baseados em Programação Linear Inteira (ILP - *Integer Linear Programming*) e Programação Linear Inteira Mista (MILP - *Mixed ILP*) se sobressaem pela alta eficiência dos resolvers atuais, inclusive os de licença livre como o SCIP [Achterberg, 2009], e pela versatilidade na modelagem de problemas complexos [Clautiaux e Ljubić, 2025; Rachuba et al., 2024]. Adicionalmente, considerando que o problema frequentemente envolve múltiplos objetivos, Conforti et al. [2010] e Aringhieri et al. [2022] sugerem a utilização de formulações multiobjetivo, permitindo que os tomadores de decisão avaliem diferentes prioridades entre as medidas de desempenho envolvidas.

Desta forma, motivados pelo caso de estudo no HC-UNICAMP, propomos uma abordagem exata com um modelo MILP multiobjetivo para o OTSP. A proposta incorpora restrições ainda pouco exploradas na literatura, como as relacionadas à escassez de anestesiologistas, à alocação de salas para transplantes – que exigem duas salas no mesmo período, e à priorização de subespecialidades médicas. Além disso, contribuímos no quesito de aplicabilidade, pois o modelo é implementado com dados reais, utilizando um resolver de licença livre, e validado pela equipe hospitalar.

A validação desta proposta inclui: (i) a geração de uma escala para o mês de abril de 2024, comparada à escala real, e (ii) a análise do impacto da variação no número de anestesiologistas. Os resultados confirmam que o modelo amplia a alocação das subespecialidades e replica a escala manual, validando sua efetividade em um ambiente real.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 revisa a literatura sobre o OTSP; a Seção 3 define o problema e apresenta o modelo proposto; a Seção 4 detalha a obtenção das instâncias e a implementação do modelo; a Seção 5 discute os resultados; e, por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e perspectivas futuras.

2. Revisão Bibliográfica

O OTSP envolve três níveis de decisão definidos pelo horizonte de planejamento: estratégico, tático e operacional [Guerriero e Guido, 2011; Carneiro et al., 2025]. O nível

estratégico, de longo prazo (6 meses a 1 ano), define a quantidade de salas e sua distribuição entre subespecialidades; o tático, de médio prazo (1 a 6 meses), organiza a alocação de blocos de horários; e o operacional, de curto prazo (1 semana a 1 mês), agenda cirurgias específicas e gerencia imprevistos [Harris e Claudio, 2022].

Este trabalho insere-se no nível tático, voltado à definição da escala mensal de alocação de salas entre subespecialidades no HC-UNICAMP. Modelos táticos também são propostos por Patrão et al. [2022], que integram os níveis tático e operacional utilizando ILP, embora sua aplicação tenha sido limitada pela falta de dados hospitalares completos. Já Bargetto et al. [2023], também no nível tático, desenvolvem um MILP e um algoritmo *branch-and-price* para alocação de salas e cirurgias considerando a necessidade de recursos humanos (no caso, equipes de enfermagem); nosso estudo se aproxima deste por considerar anestesistas, mas avança ao tratar também da alocação simultânea de salas para transplantes.

A aplicabilidade prática do OTSP é um desafio recorrente, como apontado em diversas revisões [Gür e Eren, 2018; Demeulemeester et al., 2013; Gupta e Denton, 2008; Rahimi e Gandomi, 2021]. As principais barreiras são a falta de dados reais e a dificuldade de validação prática dos modelos. Nossa parceria com o HC-UNICAMP possibilita tanto o acesso aos dados¹ quanto a validação junto à equipe de gestão das salas. Além disso, segundo de Melo e Fogliatto [2025], há escassez de estudos sobre OTSP aplicados a hospitais públicos brasileiros, em contraste com países como Portugal e Bélgica, o que reforça a relevância desta pesquisa. Entre os poucos estudos nacionais deste tipo, destacam-se Siqueira et al. [2018], que propõem um MILP para maximizar o tempo de uso das salas cirúrgicas e promover um balanço das demandas a longo prazo no Instituto Nacional de Traumatologia e Ortopedia no Rio de Janeiro, e Carneiro et al. [2025], que abordam o planejamento de cirurgias e leitos em um hospital militar também no Rio de Janeiro.

Assim, esta proposta contribui para a literatura ao trazer um modelo MILP multiobjetivo para o OTSP no nível tático, que incorpora restrições raramente abordadas, e com validação prática em um hospital público brasileiro.

3. Definição do Problema

O HC-UNICAMP dispõe de 15 salas para cirurgias eletivas: 13 do Centro Cirúrgico Eletivo (CCE) e 2 do Centro Cirúrgico Ambulatorial (CCA), das quais estas duas últimas ficam disponíveis apenas no período da manhã. Estas salas são heterogêneas em função de infraestrutura e equipamentos, com compatibilidades que podem variar conforme o dia da semana, especialmente no CCA.

Mensalmente, tais salas devem ser alocadas entre 41 subespecialidades médicas. Definimos ainda subconjuntos relevantes em relação a elas: (i) subespecialidades que exigem dois blocos consecutivos; (ii) subespecialidades com demandas circunstanciais, que não acontecem em todos os meses, mas são obrigatórias; (iii) subespecialidades prioritárias que se antepõem às outras na escolha de alocação; e (iv) subespecialidades responsáveis por transplantes.

O horizonte de planejamento abrange cerca de 20 dias úteis por mês, cada um dividido em dois turnos (manhã e tarde). O dia e o turno definem um *bloco* de tempo – no decorrer do texto, usamos este termo para nos referirmos a um bloco de tempo em uma sala de cirurgia. Salientamos que este estudo foca na alocação tática dos blocos, sem tratar

¹O uso de dados para este projeto de pesquisa foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UNICAMP (CAAE 78909624.1.0000.5404)

o agendamento individual de cirurgias, típico do nível operacional e fora do escopo deste trabalho.

A alocação de subespecialidades depende da disponibilidade das equipes médicas e de anestesiologistas. Para que uma subespecialidade ocupe um bloco, é necessário haver equipe disponível no respectivo dia e turno. Além disso, alocações que exigem anestesiologista não podem exceder o número de profissionais disponíveis em cada período. Por exemplo, se em determinado dia de manhã houver 15 anestesiologistas, o número de alocações com necessidade de anestesia será no máximo 15.

Dia	PERÍODO-SALA	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	17	CCA	CCA
6	MANHÃ	CCARD	C TRAUMA		PROCTO	URO Onco	GAST FIG			ORL	ORT COLUNA	NEURO	VASC	VASC LOCAL		
	TARDE	CCARD		URO VLP	PROCTO	URO Onco	GAST FIG		GAST VB/OB	ORL	ORT COLUNA	NEURO	VASC	VASC LOCAL		
7	MANHÃ	CCARD		PLAST	GAST EED	URO Func				GAST EED	ORT Mão		ORT TRAUMA			
	TARDE	CCARD		PLAST	GAST EED	ORL	ORT TRAUMA	URO Andro	ORT INF	GAST EED	ORT Mão		ORT TRAUMA			
8	MANHÃ	CCARD	C PED	EDA ADULTO	CAB PESC	VASC LOCAL	C TORAX			ORL		NEURO	NEURO COLU	VASC	EDA Infantil	Oftalmo
	TARDE	CCARD	C PED	ORL		VASC LOCAL	C TORAX	URO Infantil	GAST VB/OB	ORL		NEURO	NEURO	VASC		
9	MANHÃ	CCARD	ORT Quadril	EDA ADULTO	GAST FIG	URO litíase	GAST VB/OB	ORL		ORL	GAST GDP	NEURO	NEURO COLU	VASC	Oftalmo	EDA Infantil
	TARDE	CCARD		Oftalmo	GAST FIG	URO litíase	GAST VB/OB	ORL	MARCAP	ORL	GAST GDP	NEURO	NEURO COLU	VASC		
10	MANHÃ	CCARD	ORT INF	URO GINECO	CAB PESC		C TORAX	PROCTO	PROCTO		C PED	NEURO	CAB PESC			
	TARDE				CAB PESC		C TORAX	PROCTO	PROCTO		C PED	NEURO	ORT TRAUMA			

Figura 1: Trecho de uma semana da escala de salas de cirurgia.

A Figura 1 ilustra um trecho da escala cirúrgica. Cada linha representa um bloco de tempo, e cada coluna uma sala; alocações a subespecialidades são destacadas por cores (azul para procedimentos que têm necessidade de anestesiologista, cinza para os que não têm). O número significativo de alocações não feitas (posições em branco) exprime a complexidade das restrições existentes nesse estudo.

Até o início deste projeto, escalas como essa da Figura 1 eram totalmente elaboradas manualmente em planilhas eletrônicas por pessoal altamente experiente, demandando mais de um dia de trabalho. Logo, a automação desse processo otimiza esse tempo gasto, liberando recursos humanos para outras atividades do hospital.

3.1. Modelo de Programação Linear Inteira Mista

Para formularmos o OTSP, utilizamos a notação da Tabela 1. Note que a variável x_{rbs} é uma variável que indica se a sala r no bloco b está alocada para a subespecialidade s . Portanto, no decorrer do texto, usaremos o termo *alocação* para nos referirmos a uma especialidade alocada.

As Funções Objetivo (FOs) são organizadas conforme a prioridade estabelecida pelas diretrizes do hospital. Para retratar essas prioridades, adotamos uma estratégia de otimização hierárquica, assim como feito no trabalho de Aringhieri et al. [2022]. Cada FO é otimizada sequencialmente, respeitando os valores ótimos obtidos nas etapas anteriores. Formalmente, estas FOs são definidas como

$$\text{Max } F_1 = \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{s \in \mathcal{S}_{prio}} x_{rbs}, \quad (1)$$

que visa maximizar o número de alocações de subespecialidades prioritárias ($\mathcal{S}_{prio}$), enquanto a segunda é dada por

$$\text{Max } F_2 = \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \sum_{s \in \mathcal{S}} x_{rbs}, \quad (2)$$

Tabela 1: Tabela de Símbolos.

Conjunto	Descrição
$\mathcal{R}$	Salas de cirurgia (tanto eletivo, quanto ambulatorial)
$\mathcal{D}$	Dias do horizonte de planejamento, tal que $\mathcal{D} = \{1, 2, \dots, \mathcal{D} \}$
$\mathcal{T}$	Períodos (manhã ou tarde), tal que $\mathcal{T} = \{\text{manhã}, \text{tarde}\}$
$\mathcal{B}$	Blocos, tal que $\mathcal{B} = \mathcal{D} \times \mathcal{T}$
$\mathcal{S}$	Subespecialidades cirúrgicas
$\mathcal{S}_{seq}$	Subespecialidades cirúrgicas obrigatoriamente precisam dos dois blocos sequenciais alocados, tal que $\mathcal{S}_{seq} \subset \mathcal{S}$
$\mathcal{S}_{circ}$	Subespecialidades cirúrgicas circunstanciais (não acontecem todo mês), mas que tem alta prioridade, tal que $\mathcal{S}_{circ} \subset \mathcal{S}$
$\mathcal{S}_{prio}$	Subespecialidades cirúrgicas prioritárias, tal que $\mathcal{S}_{prio} \subset \mathcal{S}$
$\mathcal{S}_{trans}$	Subespecialidades cirúrgicas de transplante de órgãos, tal que $\mathcal{S}_{trans} \subset \mathcal{S}$
Índice	Descrição
r	Sala de cirurgia, com $r \in \mathcal{R}$
d	Dia do horizonte de planejamento, com $d \in \mathcal{D}$
t	Período (manhã ou tarde), com $t \in \mathcal{T}$
b	Bloco de cirurgia, com $b \in \mathcal{B}$
s	Subespecialidade cirúrgica, com $s \in \mathcal{S}$
Parâmetro	Descrição
λ_{rbs}	1, caso a sala $r \in \mathcal{R}$, no bloco $b \in \mathcal{B}$ possa ser utilizada pela subespecialidade $s \in \mathcal{S}$; 0 caso contrário
δ_s	Número de cirurgias demandadas da subespecialidade $s \in \mathcal{S}$
η_{bs}	Número de equipes da subespecialidade $s \in \mathcal{S}$ disponíveis no bloco $b \in \mathcal{B}$
A_b	Número de anestesiologistas disponíveis no bloco $b \in \mathcal{B}$
α_s	1, caso a subespecialidade $s \in \mathcal{S}$ precisa de anestesiologista; 0 caso contrário
β_s	Quantidade mínima de blocos para a subespecialidade $s \in \mathcal{S}$
κ	Limitante superior de número de blocos alocados para cada subespecialidade $s \in \mathcal{S}$
Variável	Descrição
x_{rbs}	1, caso a sala $r \in \mathcal{R}$, no bloco $b \in \mathcal{B}$, seja alocada para a subespecialidade $s \in \mathcal{S}$; 0, caso contrário
y_{rds}	1, quando a sala $r \in \mathcal{R}$, no dia $d \in \mathcal{D}$, for alocada somente para a subespecialidade $s \in \mathcal{S}$; 0, caso contrário
w_{bs}	Número de transplantes a serem realizados no bloco $b \in \mathcal{B}$ pela subespecialidade $s \in \mathcal{S}$
L	Mínima proporção de alocações por demanda dentre todas subespecialidades

que busca maximizar o número total de alocações, ou seja, aumentar a ocupação das salas. A terceira função objetivo é dada por

$$\text{Max } F_3 = L, \quad (3)$$

e tem como propósito promover o equilíbrio na distribuição de alocações entre as subespecialidades. Essa função trabalha em conjunto com uma restrição do modelo, que impõe que, para cada $s \in \mathcal{S}$, a razão entre o número de alocações e a demanda correspondente seja maior ou igual a L . Assim, a FO (3) maximiza a menor proporção de alocação relativa à demanda entre todas as subespecialidades, assegurando um balanceamento que evita a concentração excessiva de alocações em algumas subespecialidades em detrimento de outras. Por fim, a quarta FO é dada por

$$\text{Max } F_4 = \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{rds}, \quad (4)$$

que visa maximizar a quantidade de subespecialidades alocadas sequencialmente no mesmo dia em uma sala.

Com isso, formulamos o problema de planejamento de salas no HC-UNICAMP pelo modelo *OTSP – HC* com estas FOs e as restrições conforme o funcionamento atual do hospital.

(OTSP – HC) Maximize FOs (1)-(4)

$$\text{sujeito a} \quad \sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{rbs} \geq \beta_s \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (5)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{rbs} \leq (1 + \kappa) \cdot \delta_s \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (6)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} x_{rbs} \leq 1 \quad \forall r \in \mathcal{R}, b \in \mathcal{B} \quad (7)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \alpha_s \cdot x_{rbs} \leq A_b \quad \forall b \in \mathcal{B} \quad (8)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} x_{rbs} \leq \eta_{bs} \quad \forall b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S} \quad (9)$$

$$x_{rbs} = 0 \quad \forall r \in \mathcal{R}, b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S} : \lambda_{rbs} = 0 \quad (10)$$

$$x_{rbs} + x_{r(b+1)s} - 1 \leq y_{rds} \quad \forall r \in \mathcal{R}, b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S}, d \in \mathcal{D} : b \text{ e } b+1 \text{ são blocos do mesmo dia } d \quad (11)$$

$$x_{rbs} + x_{r(b+1)s} \geq 2 \cdot y_{rds} \quad \forall r \in \mathcal{R}, b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S}, d \in \mathcal{D} : b \text{ e } b+1 \text{ são blocos do mesmo dia } d \quad (12)$$

$$x_{rbs} = x_{r(b+1)s} \quad \forall r \in \mathcal{R}, b \in \mathcal{B}', s \in \mathcal{S}_{seq}, d \in \mathcal{D} : b \text{ e } b+1 \text{ são blocos do mesmo dia } d \quad (13)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} x_{rbs} = 2 \cdot w_{bs} \quad \forall b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S}_{trans} \quad (14)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{rbs} = \delta_s \quad \forall s \in \mathcal{S}_{circ} \quad (15)$$

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} \sum_{b \in \mathcal{B}} \frac{x_{rbs}}{\delta_s} \geq L \quad \forall s \in \mathcal{S} \quad (16)$$

$$x_{rbs} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in \mathcal{R}, b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S}$$

$$y_{rds} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in \mathcal{R}, d \in \mathcal{D}, s \in \mathcal{S}$$

$$w_{bs} \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall b \in \mathcal{B}, s \in \mathcal{S}$$

$$z_s \in \mathbb{Z}_+ \quad \forall s \in \mathcal{S}$$

$$L \in \mathbb{R}_+.$$

As restrições (5) e (6) impõem limites mínimos e máximos para a alocação de cada subespecialidade. O parâmetro β_s , de valores baixos (entre 1 e 3), garante que nenhuma subespecialidade fique completamente sem atendimento. O limite superior, controlado por $\kappa \in [0, 1]$, restringe a alocação a até $(1 + \kappa)$ vezes a demanda δ_s , reconhecendo que, devido às restrições e recursos limitados como anestesiistas, nem toda a demanda será atendida.

A restrição (7) assegura que cada sala e bloco recebam no máximo uma subespecialidade. A restrição (8) limita o número de alocações que requerem anestesiistas, segundo

a disponibilidade A_b em cada bloco. A restrição (9) restringe a alocação de cada subespecialidade conforme a disponibilidade de η_{bs} equipes médicas que as representam no bloco b .

A compatibilidade entre sala, bloco e subespecialidade é garantida pela restrição (10), enquanto as restrições (11) e (12), juntas, asseguram a alocação sequencial de blocos no mesmo dia, quando $y_{rds} = 1$. Subespecialidades que exigem dois blocos consecutivos são tratadas especificamente na restrição (13).

A restrição (14) impõe que o número de alocações para transplantes de órgãos seja par, evidenciando a necessidade de duas salas para este procedimento – uma para o doador e outra para o receptor. Por fim, a restrição (15) exige o atendimento completo das subespecialidades circunstanciais $\mathcal{S}_{circ}$ e a Equação (16) promove o balanceamento proporcional da alocação de blocos em conjunto com a FO (3).

4. Configurações da Instância e Execução

O modelo foi implementado em Python 3.11 utilizando a biblioteca Pyomo, que oferece suporte a diversos resolvidores MILP [Hart et al., 2011]. Para a resolução, foi utilizado o SCIP [Achterberg, 2009], um resolvidor de código aberto e gratuito. Os experimentos foram realizados em um computador com processador Intel Core i7-150U, 32 GB de RAM e sistema operacional Ubuntu 24.10 LTS.

A escala de salas de cirurgia de abril de 2024, fornecida pelo HC-UNICAMP para essa proposta², forma a base para elaboração da *Instância 1*, para a qual executamos experimentos com o modelo *OTSP – HC*. A demanda de número de alocações por subespecialidade é definida por diretrizes do hospital, porém existe a flexibilidade dela não ser atendida em sua totalidade ou até mesmo ser excedida, conforme a disponibilidade de alocação. Subespecialidades que não necessitam de anestesia, por exemplo, tendem a ser mais facilmente alocadas, o que pode resultar em uma alocação superior ao necessário. Por essa razão, definimos $\kappa = 0,2$ como limite superior na restrição (6), de forma que a alocação de blocos para cada subespecialidade não ultrapasse a demanda em mais de 20%.

A quantidade de anestesistas disponíveis no período da instância foi relativamente baixa, o que impacta diretamente na alocação de blocos. Este problema está sendo resolvido com a contratação de novos profissionais, mas, ainda assim, tal limitação continua a ser um fator restritivo. Para analisar o impacto dessa deficiência de recurso, elaboramos a *Instância 2*, na qual a quantidade de anestesistas foi aumentada ao máximo possível por bloco.

Parâmetros como o conjunto de subespecialidades prioritárias ($\mathcal{S}_{prio}$), demanda de blocos por subespecialidade (δ_s e β_s), a compatibilidade das salas com as subespecialidades (λ_{rbs}), disponibilidades de anestesista (A_b) e a quantidade de equipes disponíveis por subespecialidade e bloco (η_{bs}) foram fornecidos pelo hospital.

5. Resultados e Discussão

Comparamos o desempenho do modelo proposto *OTSP – HC* com a escala manual para validar a sua replicabilidade e o quanto ele pode melhorar no número de alocações.

A Figura 2 apresenta a comparação entre a demanda total, as alocações manuais e as obtidas pelo *OTSP – HC* nas duas instâncias distintas. O *OTSP-HC - Instância 1* apresenta uma quantidade de alocações ligeiramente superior em relação à abordagem manual,

²Obtivemos os dados relativos à escala cirúrgica a partir de tabelas eletrônicas previamente utilizadas no hospital. Realizamos análises de consistência desses dados, as quais foram validadas com profissionais experientes da instituição.

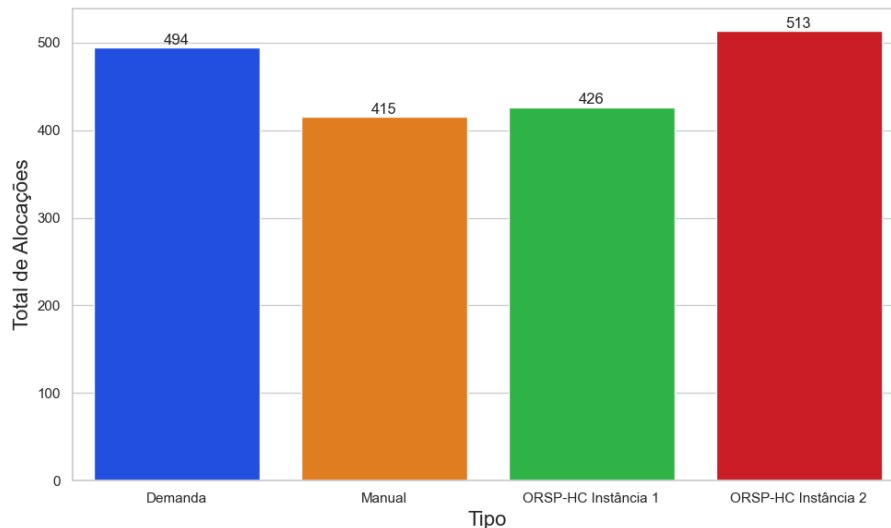


Figura 2: Total de alocações por abordagem.

evidenciando a capacidade do modelo de melhor alocar os recursos mesmo sob as restrições impostas. Como cada bloco pode comportar múltiplas cirurgias, esse aumento potencializa o número total de procedimentos realizados, um dos principais objetivos do hospital. Já a *OTSP-HC - Instância 2* demonstra um aumento ainda mais expressivo, superando a demanda, o que evidencia a importância da ampliação do número de anestesistas.

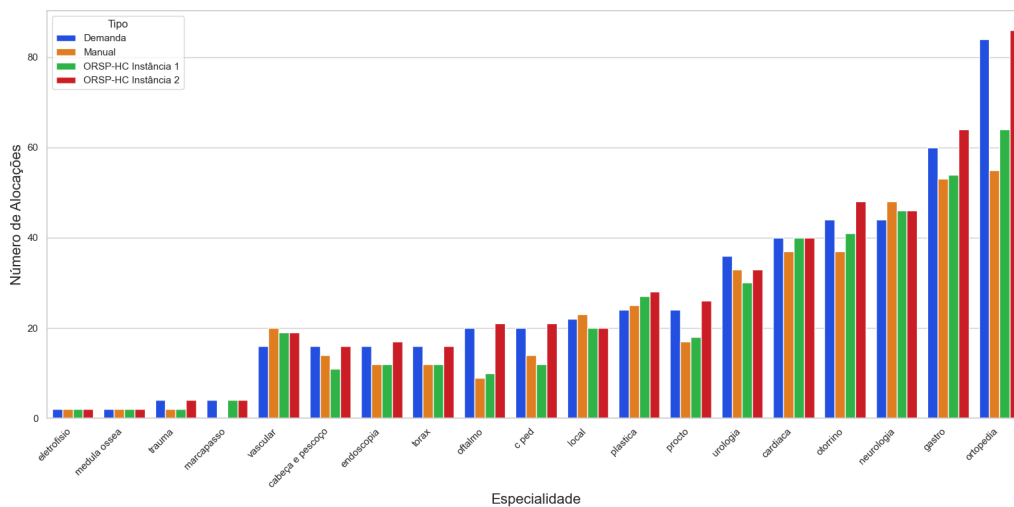


Figura 3: Número de alocações por especialidade.

Na Figura 3, detalhamos a comparação a nível de especialidade, em que somamos cada alocação das 41 subespecialidades em 19 delas. Nessa figura, observamos que o *OTSP-HC - Instância 1* se aproxima mais da demanda em comparação à escala manual, indicando que as FOs (1) e (2), que maximizam as alocações, estão sendo atendidas. Já o *OTSP-HC - Instância 2* supera a demanda em várias subespecialidades, mas não em todas, evidenciando que a restrição de anestesistas é um dos principais fatores limitantes, embora não o único.

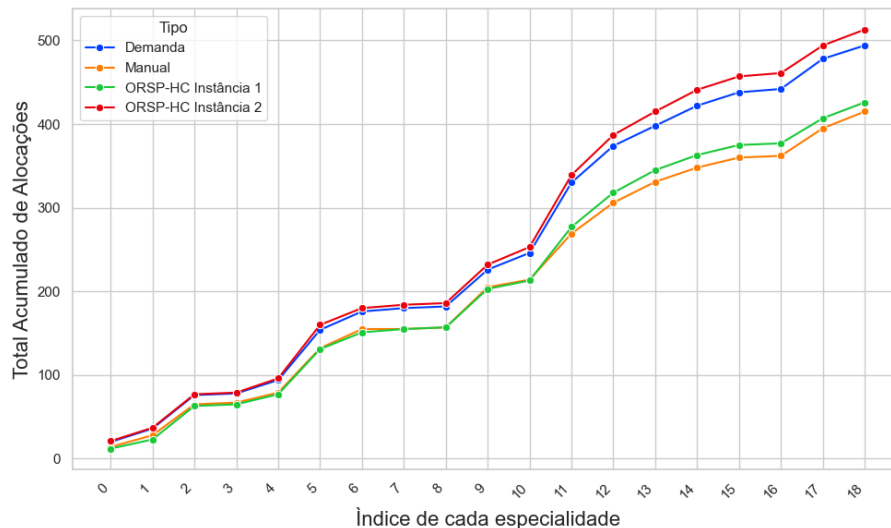


Figura 4: Valores acumulados do número de alocações. Cada valor de índice representa uma subespecialidade adicionada no valor acumulado.

Essa informação é relevante para o hospital por mostrar quais são os reais gargalos para aumentar o número de alocações.

A Figura 4 também detalha a comparação por especialidade, apresentando o total acumulado de alocações que reforçam as análises anteriores. Nesta figura, a linha do *OTSP-HC - Instância 1* se mantém abaixo da demanda, mas acima da abordagem manual. Já a do *OTSP-HC - Instância 2* ultrapassa a demanda de forma controlada, apresentando o melhor desempenho geral. Esses resultados corroboram os dados da Figura 2, confirmando que o modelo maximiza as alocações mantendo um equilíbrio entre as subespecialidades.



Figura 5: Desvio Percentual em relação a demanda. Quanto mais próxima do zero a barra está, melhor distribuído e mais próximos da demanda estão as alocações.

Casos pontuais, como “cabeça e pescoço” e “urologia”, apresentaram menos alo-

cações no *OTSP-HC - Instância 1* do que na escala manual, porém ainda próximas da demanda. Esse comportamento está relacionado ao objetivo FO (3), que busca balancear as alocações entre as subespecialidades após a maximização anterior. A Figura 5 ilustra de forma mais clara esse balanço, mostrando o desvio percentual em relação à demanda, onde se observa que o modelo gera uma distribuição mais equilibrada, com a *OTSP-HC - Instância 2* apresentando o menor desvio.

Quanto ao objetivo FO (4), o *OTSP - HC* aumentou em 15% o número de blocos alocados sequencialmente no mesmo dia e sala em comparação com a escala manual. Isto auxilia o gerenciamento de eventuais atrasos nos turnos da manhã, também evitando cancelamentos, já que o bloco da tarde é da mesma subespecialidade.

Por fim, o modelo apresentou tempo de execução de aproximadamente 30 segundos, em comparação a mais de um dia de trabalho exigido na elaboração manual da escala. Esse ganho de eficiência operacional permite, em uma possível aplicação completa, que as pessoas responsáveis pela escala possam direcionar seu tempo a outras atividades, melhorando a gestão hospitalar. Adicionalmente, esse rápido tempo de execução possibilita explorar cenários alternativos, como a alocação de novos anestesiistas ou a inclusão de novas subespecialidades.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho, propomos o *OTSP - HC*, um modelo MILP multiobjetivo para o OTSP no HC-UNICAMP. Seu desenvolvimento contou com colaboração interdisciplinar entre pesquisadores e membros do hospital, possibilitando a compreensão detalhada do CCE e essa parceria reflete na modelagem proposta.

O modelo superou a escala tradicional em número de alocações, melhorou o balanceamento entre subespecialidades e aumentou as alocações sequenciais em uma mesma sala, respeitando todas as restrições mapeadas no hospital. Na análise do impacto sobre os anestesiistas, evidenciamos que ampliar esse recurso aumenta consideravelmente o número de alocações possíveis; contudo, mesmo com número suficiente destes profissionais, a demanda não é integralmente atendida. Este resultado traz informações significativas para a gestão hospitalar, como a necessidade de avaliar o aumento de recursos limitantes, ou ainda a revisão das demandas de cada especialidade.

O *OTSP - HC* também apresenta flexibilidade para ser adaptado a outros contextos hospitalares com restrições similares, podendo ser estendido para considerar novas limitações, como disponibilidade de equipamentos ou equipes de enfermagem. Destacamos ainda a modelagem específica para transplantes, relevante para instituições que realizam esse tipo de procedimento.

Como trabalho futuro, propomos a integração do *OTSP - HC* com o escalonamento de cirurgias eletivas, isto é, integrando o nível tático ao operacional, incorporando fatores estocásticos, como duração das cirurgias e cancelamentos. Essa integração exigiria também a disponibilidade de leitos, um dos principais gargalos na gestão de cirurgias eletivas [Siqueira et al., 2018]. Entretanto, tal expansão demanda um mapeamento mais detalhado do fluxo de pacientes e da demanda real de cirurgias, o que representa um desafio adicional em ambientes hospitalares complexos.

Agradecimentos. Agradecemos os membros do HC-UNICAMP que contribuíram com seus conhecimentos para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial, a Ana Paula, que nos explicou todo o funcionamento do CCE e a importância do planejamento das salas;

e o Fabrício que nos ajudou com o fornecimento e entendimento dos dados; e o Prof. Dr. Elcio Hirano que foi nosso primeiro contato no hospital e incentivou a realização deste trabalho. Este projeto tem apoio da FAPESP (Processos 2024/02641-8 e 2022/05803-3), CNPq (Processo 312345/2023-2) e FAEPEX (Processo 2372/23).

Referências

- Achterberg, T. (2009). Scip: solving constraint integer programs. *Mathematical Programming Computation*, 1(1):1–41.
- Aringhieri, R., Duma, D., Landa, P., e Mancini, S. (2022). Combining workload balance and patient priority maximisation in operating room planning through hierarchical multi-objective optimisation. *European Journal of Operational Research*, 298(2):627–643.
- Bargetto, R., Garaix, T., e Xie, X. (2023). A branch-and-price-and-cut algorithm for operating room scheduling under human resource constraints. *Computers & Operations Research*, 152:106136.
- Beliën, J., Brailsford, S., Demeulemeester, E., Demirtas, D., Hans, E. W., e Harper, P. (2024). Fifty years of operational research applied to healthcare. *European Journal of Operational Research*. artigo no prelo. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.12.040.
- Carneiro, G., Ferreira Filho, V. J., Bahiense, L., e Arruda, E. F. (2025). Integrated surgery planning and bed allocation with multiple routes of post-surgical care, with application to a military hospital's orthopaedic department. *Pesquisa Operacional*, 45:e284818.
- Childers, C. P. e Maggard-Gibbons, M. (2018). Understanding costs of care in the operating room. *JAMA Surgery*, 153(4):e176233–e176233.
- Clautiaux, F. e Ljubić, I. (2025). Last fifty years of integer linear programming: A focus on recent practical advances. *European Journal of Operational Research*, 324(3):707–731.
- Conforti, D., Guerriero, F., e Guido, R. (2010). A multi-objective block scheduling model for the management of surgical operating rooms: New solution approaches via genetic algorithms. In *2010 IEEE Workshop on Health Care Management (WHCM)*, p. 1–5.
- de Melo, I. E. S. e Fogliatto, F. S. (2025). Integration of decision levels in operating room scheduling problems: Systematic review and proposition of a decision support framework. *Computers & Operations Research*, 180:107063.
- Demeulemeester, E., Beliën, J., Cardoen, B., e Samudra, M. (2013). *Operating Room Planning and Scheduling*, p. 121–152.
- Guerriero, F. e Guido, R. (2011). Operational research in the management of the operating theatre: a survey. *Health Care Management Science*, 14(1):89–114.
- Gupta, D. e Denton, B. (2008). Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities. *Institute of Industrial Engineers (IIE) Transactions*, 40(9):800–819.
- Gür, Ş. e Eren, T. (2018). Application of operational research techniques in operating room scheduling problems: Literature overview. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018:1–15.

- Harris, S. e Claudio, D. (2022). Current trends in operating room scheduling 2015 to 2020: A literature review. *Operations Research Forum*, 3(1):21.
- Hart, W. E., Watson, J.-P., e Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: modeling and solving mathematical programs in python. *Mathematical Programming Computation*, 3(3):219–260.
- HC - Unicamp (2024a). Ensino no hospital de clínicas da unicamp. URL <https://hc.unicamp.br/institucional/ensino/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- HC - Unicamp (2024b). Especialidades médicas do hospital de clínicas da unicamp. URL <https://hc.unicamp.br/institucional/especialidades/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- HC - Unicamp (2024c). História do hospital de clínicas da unicamp. URL <https://hc.unicamp.br/institucional/historia/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- HC - Unicamp (2024d). Pesquisa no hospital de clínicas da unicamp. URL <https://hc.unicamp.br/institucional/pesquisa/>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- Patrão, R. L., Garcia, R. C., e da Silva, J. M. (2022). An integrated two-level integer linear program (ilp) model for elective surgery scheduling: A case study in an italian hospital. *Mathematics*, 10(11):1901.
- Rachuba, S., Reuter-Oppermann, M., e Thielen, C. (2024). Integrated planning in hospitals: a review. *OR Spectrum*, p. 1–54.
- Rahimi, I. e Gandomi, A. H. (2021). A comprehensive review and analysis of operating room and surgery scheduling. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3): 1667–1688.
- Siqueira, C. L., Arruda, E. F., Bahiense, L., Bahr, G. L., e Motta, G. R. (2018). Long-term integrated surgery room optimization and recovery ward planning, with a case study in the brazilian national institute of traumatology and orthopedics (into). *European Journal of Operational Research*, 264(3):870–883.