LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

OTIMIZANDO O AGENDAMENTO DE CIRURGIAS ELETIVAS EM CENTROS MÉDICOS: UM ESTUDO DE CASO

Rafael Morais, Anderson Coutinho, Anand Subramanian
Universidade Federal da Paraíba
Centro de Informática, Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – R. dos Escoteiros, s/n – Mangabeira, João Pessoa – PB, CEP 58055-000
rafaelsobralm@gmail.com, andc876@gmail.com, anand@ci.ufpb.br

Matheus Silva, Oscar Porto
Dhauz
Rua Paraíba, 550, sala 900 – Savassi, Belo Horizonte – MG, CEP 30130-141
matheus.silva@dhauz.com, oscar.porto@dhauz.com

RESUMO

Este trabalho propõe uma abordagem baseada em programação linear inteira mista para o problema de agendamento diário de cirurgias em hospitais, com o objetivo de minimizar o número de cirurgias não alocadas, o número de salas utilizadas, a quantidade de salas usadas por cada médico, o atraso das cirurgias que excedem o horário de encerramento previsto, além de maximizar a utilização das reservas de salas. O problema foi modelado levando em conta as especificidades de um grupo hospitalar, que forneceu dados de dois hospitais para a validação do modelo. Os resultados demonstram que o modelo proposto é eficaz em alcançar os objetivos estabelecidos, destacando-se como uma ferramenta que pode proporcionar grandes benefícios para o processo de agendamento de cirurgias.

PALAVRAS CHAVE. Agendamento de cirurgias, Programação inteira, Estudo de caso.

Tópicos (PO na Área de Saúde; Otimização Combinatória)

ABSTRACT

This work proposes a mixed integer linear programming approach to the daily scheduling problem of surgeries in hospitals, aiming to minimize the number of unallocated surgeries, the number of rooms used, the quantity of rooms used by each surgeon, and the delay of surgeries that exceed the planned closing time, in addition to maximizing the utilization of room reservations. The problem was modeled to meet the specific needs of a hospital group, which provided data from two hospitals for model validation. The results demonstrate that the proposed model is effective in achieving the defined objectives, highlighting it as a tool that can bring significant benefits to the surgery scheduling process.

KEYWORDS. Surgery scheduling. Integer programming. Case study.

Paper topics (OR in healthcare; Combinatorial Optimization)

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

1. Introdução

Procedimentos cirúrgicos desempenham papel central em hospitais no que diz respeito tanto aos custos, que podem representar cerca de 40% das despesas, quanto às arrecadações, podendo representar até 70% da receita [Cardoen et al., 2010; Guerriero e Guido, 2011; Fügener et al., 2017; Bandi e Gupta, 2020; Park et al., 2021]. Um dos principais motivos é a utilização de recursos caros para seu funcionamento, como, por exemplo, funcionários (equipe médica especializada, por exemplo), equipamentos e remédios [Rahimi e Gandomi, 2021]. Apesar de tal importância, o agendamento de cirurgias geralmente é realizado com base na experiência gerencial, sem a utilização de ferramentas computacionais para automatizar e otimizar tal processo [Brunner et al., 2009; Dios et al., 2015; Park et al., 2021]. Um dos motivos para isso são as várias dificuldades impostas por diversos fatores que devem ser respeitados em um cenário real de operação [Wang et al., 2023].

No entanto, mesmo com profissionais experientes encarregados do agendamento das cirurgias, soluções geradas manualmente estão sujeitas a erros. Conforme observado por Wang et al. [2023], é comum haver salas especializadas na realização de procedimentos cirúrgicos específicos. Sendo assim, é possível que muitas cirurgias sejam agendadas nestas salas de forma que ocorram cirurgias fora do horário de expediente, acarretando em custo de horas extras. Outro exemplo apresentado por Wang et al. [2023] destaca a situação em que uma cirurgia é exclusivamente conduzida por um médico específico, o qual não pode realizar procedimentos cirúrgicos simultâneos. Caso duas cirurgias que dependem desse médico sejam agendadas de forma que ocorra sobreposição de horários, uma das cirurgias precisará ser adiada até que o médico esteja disponível para realizá-la. Essas restrições não apenas evidenciam os desafios do agendamento manual, mas também destacam a importância da aplicação de métodos computacionais para uma resolução eficaz desses problemas.

Devido a esses fatores, o interesse acadêmico nesse tópico tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas, passando de menos de 20 publicações anuais no ano 2000 para mais de 70 em 2020 [Rahimi e Gandomi, 2021], o que ressalta a relevância desse tema. O presente trabalho propõe uma estratégia para otimizar o agendamento de cirurgias em um cenário real utilizando programação linear inteira mista. O problema em questão objetiva reduzir a quantidade de cirurgias não alocadas, diminuir o número de salas utilizadas para realização de cirurgias, distribuir as cirurgias realizadas por cada médico entre as salas disponíveis de forma eficiente; reduzir o atraso no encerramento das operações, bem como maximizar o atendimento às reservas de sala.

Este trabalho é fruto de uma parceria entre a Universidade Federal da Paraíba e a empresa de consultoria DHAUZ (`https://www.dhauz.com`).

O restante do artigo da seguinte forma. A Seção 2 faz uma breve revisão sobre trabalhos relacionados ao problema abordado. Na Seção 3 o problema estudado é definido e a notação matemática é apresentada. A Seção 4 apresenta o modelo de programação linear inteira mista (MILP) desenvolvido para o problema em questão. A Seção 5 contém os resultados obtidos. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as considerações finais.

2. Revisão Bibliográfica

Diversos estudos foram realizados na última década com o objetivo de fazer um levantamento e classificação dos trabalhos sobre problemas de escalonamento em centros cirúrgicos [Cardoen et al., 2010; Guerriero e Guido, 2011; Gür e Eren, 2018; Zhu et al., 2019; Rahimi e Gandomi, 2021; Wang et al., 2021; Schouten et al., 2023; Aktaş et al., 2024]. Guerriero e Guido [2011] classificam os tipos de trabalho sobre agendamento de cirurgias em três níveis hierárquicos sendo eles: (i) estratégico [Brandeau e Hopkins, 1984; Blake e Carter, 2002, 2003], no qual o principal objetivo é determinar os tipos de cirurgias realizada em cada bloco cirúrgico; (ii) tático [Blake et al., 2002; Olivares et al., 2008; van Oostrum et al., 2010], no qual são determinados a quantidade e

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

tipo de salas cirúrgicas disponíveis, o horário de funcionamento das mesmas, e quais médicos ou equipes médicas serão alocadas a elas; e (iii) operacional, que consiste na alocação diária de cirurgias eletivas, estabelecendo horários de início e fim, reserva dos equipamentos necessários para sua realização, dentre outros fatores. No que concerne ao presente trabalho, ele se encaixa no tipo operacional e, consequentemente, abrange cirurgias do tipo eletiva.

Fei et al. [2010] dividem o problema de agendamento de cirurgias em dois estágios. O primeiro estágio tem por objetivo definir a data de cada cirurgia considerando um horizonte de planejamento semanal. No segundo estágio, o agendamento das cirurgias é realizado resolvendo-se o problema para cada dia individualmente. Uma das restrições formuladas por Fei et al. [2010] impede todos os médicos de realizarem mais de uma cirurgia ao mesmo tempo. Apesar do presente trabalho considerar esse tipo de restrição, ela não se aplica a todos os médicos, havendo médicos que podem realizar múltiplas cirurgias.

Li et al. [2016] formulam um problema para reagendamento de cirurgias como uma variante do *bin packing problem* (BPP) a partir de uma solução inicial que já satisfaz as preferências dos médicos e todas as restrições práticas. Entretanto, assumem que todas as salas cirúrgicas podem acomodar qualquer cirurgia, não há restrição de equipamentos e que existem salas suficientes para acomodar todas as cirurgias. Bandi e Gupta [2020] abordam o problema de forma similar a Li et al. [2016], porém, diferente do último, geram uma solução inicial, a qual não necessariamente satisfaz as preferências dos médicos.

O presente trabalho considera que cada procedimento cirúrgico pode ser realizado por um subconjunto de salas cirúrgicas, existe restrição de quantidade de equipamentos e a quantidade e tipos de salas cirúrgicas são fixos. Além disso, apesar de não haver restrições que satisfaçam as preferências dos médicos, o não atendimento delas é penalizado na função objetivo. O estudo conduzido por Park et al. [2021] visa minimizar a quantidade de salas cirúrgicas utilizadas, bem como a utilização de horas para além do horário de expediente. Além disso, tentam gerar uma solução que considere as preferências dos médicos por salas específicas e levam em conta a necessidade de determinados equipamentos para os procedimentos cirúrgicos. O presente estudo possui grande semelhança com o desenvolvido por Park et al. [2021], entretanto, o último possui um enfoque no agendamento de cirurgias cooperativas, ou seja, nas quais mais de um médico pode estar alocado.

Apesar da natureza estocástica do tempo de duração das cirurgias, esse aspecto é frequentemente tratado como determinístico na literatura, sendo gerado a partir de base de dados hospitalares preexistentes [Park et al., 2021]. Isso se dá devido à complexidade do problema, que se torna ainda mais desafiador diante das restrições adicionais impostas pelas aplicações reais. O presente trabalho também considera a duração das cirurgias como um dado determinístico, visando mitigar a complexidade do problema e aumentando as chances de se obter soluções em tempo hábil. No caso de imprevistos no agendamento inicialmente gerado, realizar um reagendamento geralmente necessita de um tempo computacional relativamente baixo [Park et al., 2021]. Entretanto, vale ressaltar que a predição errada da duração das cirurgias pode resultar em fatores negativos, como, por exemplo, gastos adicionais e insatisfação dos pacientes [Dexter et al., 2009; Dexter e Epstein, 2009].

3. Definição do problema e notação

A notação utilizada para descrever o problema é apresentada na Tabela 1.

O problema abordado neste trabalho consiste em otimizar o agendamento diário de cirurgias em um hospital. O início de todas as cirurgias deve estar contido no intervalo $[t_{\text{início}}, t_{\text{fim}}]$. Cada cirurgia $j \in J$ tem duração p_j, que inclui o tempo de preparação, e só pode ser iniciada no intervalo $[b_j^{\min}, b_j^{\max}]$, que é definido de acordo com o horário de início originalmente agendado, o horário de disponibilidade do cirurgião associado e a flexibilidade da cirurgia s_j. As Equações (1) e (2) detalham o cálculo do intervalo.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

Tabela 1: Notação utilizada.

Notação	Descrição
Conjuntos	
J	Cirurgias agendadas em um dia.
K	Salas cirúrgicas disponíveis.
D	Conjunto de médicos.
E	Tipos de equipamentos disponíveis.
R	Reservas de salas.
T	Horizonte de planejamento.
K_j	Salas que comportam a cirurgia $j \in J$.
E_j	Equipamentos utilizados pela cirurgia $j \in J$.
J_e	Cirurgias que necessitam do equipamento $e \in E$.
J_r	Cirurgias associadas à reserva $r \in R$.
D^+	Médicos que podem realizar múltiplas cirurgias simultaneamente em diferentes salas.
D^-	Médicos que não podem realizar cirurgias simultâneas.
Dados	
b_j	Horário inicialmente agendado para a cirurgia $j \in J$.
p_j	Duração da cirurgia $j \in J$.
q_e	Quantidade disponível do equipamento $e \in E$.
d_j	Médico cirurgião associado a uma cirurgia $j \in J$.
$t_d^{\min}$	Instante inicial em que o médico $d \in D$ está disponível.
$t_d^{\max}$	Instante final em que o médico $d \in D$ está disponível.
d_r	Médico associado à reserva $r \in R$.
k_r	Sala associada à reserva $r \in R$.
T_r	Intervalo de tempo da reserva $r \in R$.
$t_{\text{início}}$	Primeiro instante para início de cirurgias.
t_{fim}	Último instante para início de cirurgias.
s_j	Flexibilidade da cirurgia $j \in J$, indicando o quanto a cirurgia pode ser atrasada ou adiantada em relação ao horário agendado inicialmente.
$t_{\max}$	Horário estabelecido para o encerramento das atividades do centro cirúrgico.
Parâmetros	
δ	Discretização do horizonte de tempo.
α	Peso da minimização de cirurgias não alocadas.
β	Peso da minimização da quantidade de salas usadas.
γ	Peso da minimização do uso de salas por médico.
η	Peso da maximização da utilização de reservas de sala.
ρ	Peso da minimização do atraso em relação ao fim do expediente.

$$b_j^{\min} = \max(b_j - s_j, t_d^{\min}, t_{\text{início}}) \quad (1)$$

$$b_j^{\max} = \min(b_j + s_j, t_d^{\max}, t_{\text{fim}}) \quad (2)$$

Alguns hospitais oferecem a opção de reservar salas, permitindo que médicos frequentes do hospital reservem uma sala por um intervalo específico. Com a reserva, o médico tem preferência no uso da sala durante o período reservado, porém, caso o médico não utilize todo o tempo disponível para suas cirurgias, o restante pode ser utilizado por outros médicos.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

O problema também considera que determinados médicos possuem grandes equipes cirúrgicas, o que possibilita a realização de múltiplas cirurgias simultaneamente em diferentes salas. Nesses casos, o cirurgião pode circular entre salas, gerenciando sua equipe e realizando intervenções pontuais nos procedimentos.

Em resumo, o agendamento possui as seguintes restrições:

- uma cirurgia j só pode ser iniciada dentro do intervalo $[b_j^{\min}, b_j^{\max}]$;
- em cada sala $k \in K$, para todo instante $t \in T$, apenas uma cirurgia pode estar sendo realizada;
- em qualquer instante $t \in T$, no máximo q_e unidades do equipamento $e \in E$ podem estar sendo utilizadas;
- médicos que não possuem equipes grandes não podem realizar cirurgias simultâneas em diferentes salas.

A função objetivo do problema é composta pelos cinco seguintes pontos:

- minimizar o número de cirurgias não alocadas;
- minimizar o quantidade de salas usadas;
- minimizar a quantidade de salas em que cada médico realiza cirurgias;
- maximizar o número de cirurgias realizadas por médico dentro de sua reserva;
- minimizar o atraso das cirurgias que são finalizadas após o horário de encerramento $t_{\max}$.

Os pontos listados acima são ponderados pelos parâmetros α, β, γ, η, ρ, respectivamente.

A Figura 1 apresenta um exemplo de agendamento inicial em que três cirurgias são alocadas em duas salas. Na Figura 2 é apresentada a versão otimizada desse agendamento, no qual a cirurgia 3 foi adiantada e se inicia em $b_3^{\min}$, que é o primeiro instante do intervalo viável, e a cirurgia 2 foi deslocada para se iniciar no instante máximo de início $b_2^{\max}$. Dessa forma é possível alocar todas as cirurgias em uma única sala.

Proposição 1. *O problema de otimização do agendamento de cirurgias em centros médicos considerado é $\mathcal{NP}$-difícil.*

Demonstração. O problema é $\mathcal{NP}$-difícil, pois pode ser reduzido do BPP, que é reconhecidamente $\mathcal{NP}$-difícil. No BPP, dado um conjunto I de itens, com cada item $i \in I$ possuindo um peso $w_i \in \mathbb{Z}$, e um número positivo B de caixas com capacidade C, busca-se encontrar uma partição de I em conjuntos disjuntos $I_1, I_2, ..., I_B$ de forma que $\sum_{i \in I_j} w_i \leq C$ para cada conjunto I_j, e que minimize a quantidade de caixas usadas. Seja L uma instância do BPP com o conjunto de n itens $I = \{1, 2, ..., n\}$, em que cada item i possui um peso $w_i \geq 0$, e existem B caixas com capacidade C disponíveis. Pode-se definir uma instância L' do problema de agendamento de cirurgias tal que $J = \{1, 2, ..., n\}$, $|K| = B$, e para toda cirurgia $i \in J$, $K_i = K$, e $p_i = w_i$. Cada sala $k \in K$ está disponível no horizonte $T = \{0, 1, ..., C\}$ (i.e., $t_{\max} = C$). Assim, considerando $\alpha = +\infty$ (i.e., obrigando a alocação de todas as cirurgias), que a flexibilidade das cirurgias e disponibilidade dos médicos permitam que qualquer cirurgia seja realizada em qualquer instante $t \in T$, que há quantidade infinita de equipamentos e que $\gamma = \eta = \rho = 0$ (i.e., descartando os objetivos associados aos respectivos pesos), pode-se enxergar o BPP como um caso do problema de agendamento em que busca-se encaixar as cirurgias no menor número de salas, respeitando o tempo máximo de término $t_{\max}$ em cada sala. □

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

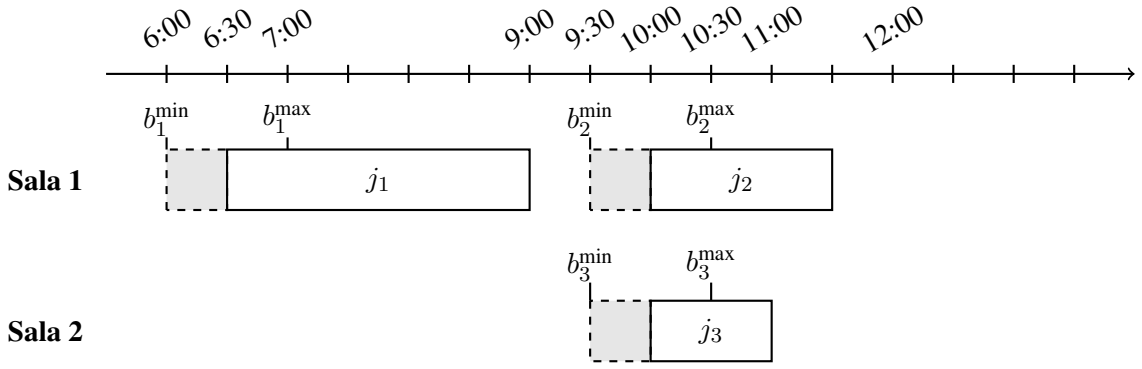


Figura 1: Agendamento inicial de 3 cirurgias

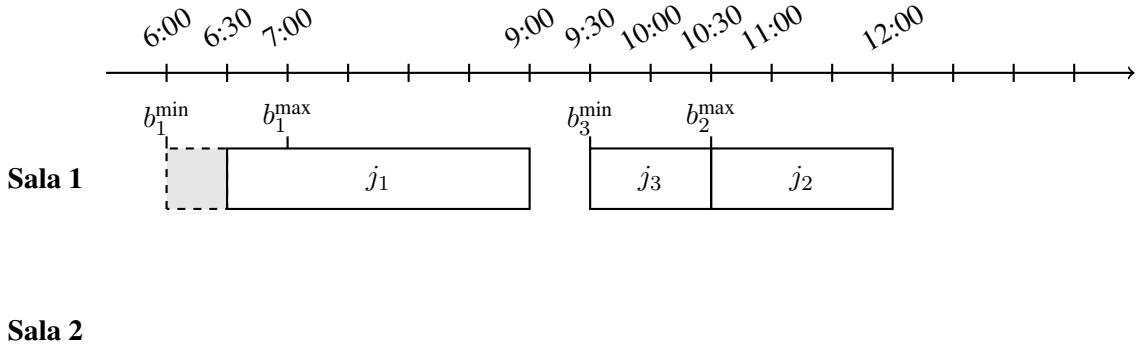


Figura 2: Agendamento otimizado de 3 cirurgias, no qual a Sala 2 deixou de ser utilizada

4. Modelo Matemático

Na formulação proposta, o horizonte de planejamento, denotado T, é discretizado pelo parâmetro δ. Assim, tem-se $T = \{t_{\text{início}}, t_{\text{início}} + \delta, ..., t_{\text{fim}}\}$. A variável binária x_{ik}^t assume valor 1 se a cirurgia $j \in J$ for iniciada no instante $t \in T$ e na sala $k \in K$, enquanto a variável binária w_j assume valor 1 se a cirurgia $j \in J$ não for alocada. A variável binária y_k assume 1 se ao menos uma cirurgia seja alocada na sala $k \in K$ e a variável binária z_{dk} assume 1 caso o médico $d \in D$ tenha alguma cirurgia alocada na sala $k \in K$. Por fim, a variável contínua h_j computa o quanto a cirurgia $j \in J$ excede o horário de encerramento do centro cirúrgico. O modelo proposto pode ser escrito da seguinte forma:

$$\min \alpha \sum_{j \in J} w_j + \beta \sum_{k \in K} y_k + \gamma \sum_{l \in D} \sum_{k \in K} z_{dk} - \eta \sum_{r \in R} \sum_{j \in J_r} \sum_{k \in K_r} \sum_{t \in T^r} x_{jk}^t + \rho \sum_{j \in J} h_j \tag{3}$$

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

$$\sum_{k \in K_j} \sum_{t=b_j^{\min}}^{b_j^{\max}} x_{jk}^t + w_j = 1 \qquad \forall j \in J \qquad (4)$$

$$\sum_{\substack{j \in J, \\ b_j^{\min} \leq t \leq b_j^{\max}}} \sum_{s=\max\{0, t-p_j+1\}}^{t} x_{jk}^s \leq 1 \qquad \forall k \in M, t \in T \qquad (5)$$

$$\sum_{\substack{j \in J_e, \\ b_j^{\min} \leq t \leq b_j^{\max}}} \sum_{k \in K_j} \sum_{s=\max\{0, t-p_j+1\}}^{t} x_{jk}^s \leq q_e \qquad \forall e \in E, t \in T \qquad (6)$$

$$\sum_{\substack{j \in J_d, \\ b_j^{\min} \leq t \leq b_j^{\max}}} \sum_{k \in K_j} \sum_{s=\max\{0, t-p_j+1\}}^{t} x_{jk}^s \leq 1 \qquad \forall d \in D^-, t \in T \qquad (7)$$

$$h_j \geq p_j - t_{\max} + \sum_{t=b_j^{\min}}^{b_j^{\max}} \sum_{k \in K_j} t(x_{jk}^t) \qquad \forall j \in J \qquad (8)$$

$$x_{jk}^t - y_k \leq 0 \qquad \forall j \in J, k \in K_j, t \in T \qquad (9)$$

$$x_{jk}^t - z_{dk} \leq 0 \qquad \forall d \in D, j \in J_d, k \in K_j, t \in T \qquad (10)$$

$$x_{jk}^t \in \{0, 1\} \qquad \forall j \in J, k \in K, t \in T \qquad (11)$$

$$w_j \in \{0, 1\} \qquad \forall j \in J \qquad (12)$$

$$y_k \in \{0, 1\} \qquad \forall k \in J \qquad (13)$$

$$z_{dk} \in \{0, 1\} \qquad \forall d \in D, k \in K \qquad (14)$$

$$h_j \geq 0 \qquad \forall j \in J. \qquad (15)$$

A função objetivo é composta por cinco termos: o primeiro minimiza a quantidade de cirurgias não alocadas; o segundo minimiza o número de salas utilizadas; o terceiro minimiza a quantidade de salas em que cada médico realiza suas cirurgias; o quarto maximiza a quantidade de reservas de sala respeitadas, isto é, o termo incentiva que as cirurgias de um médico que possui reserva sejam iniciadas na sala reservada durante o período da reserva; o quinto minimiza o atraso das cirurgias que são finalizadas após o horário de encerramento das operações do hospital.

As restrições (4) estabelecem a relação entre as variáveis w e x. As restrições (5) evitam a sobreposição de cirurgias na mesma sala. As restrições (6) garantem que, para cada tipo de equipamento e, a quantidade de equipamentos sendo utilizados em um mesmo instante não exceda a quantidade disponível. As restrições (7) impedem que um médico realize cirurgias simultâneas. As restrições (8) computam a quantidade de salas utilizadas, enquanto as restrições (9) calculam o número de salas utilizadas por cada médico. As restrições (10) computam o atraso do término de cada cirurgia em relação ao horário de encerramento. Por fim, as restrições (11)–(15) estabelecem o domínio das variáveis.

5. Resultados

O MILP foi implementado em linguagem Python 3.10.7, por meio do pacote Python-MIP 1.16, utilizando o resolvedor Gurobi 11.0, com tempo limite de 100 segundos e parâmetros padrão. Todos os experimentos foram executados em uma máquina com processador Intel Core i7-12700,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

com 16GB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu 20.04. Foram utilizados os parâmetros $\alpha = 100$, $\beta = 5$, $\gamma = 1$, $\eta = 1$, $\rho = 1$ e δ equivalente a 5 minutos.

Os experimentos foram realizados utilizando dados reais fornecidos por dois hospitais, referentes ao período de 01/07/2023 a 31/12/2023. O centro cirúrgico do Hospital A opera das 7:00 às 20:00 horas, apenas em dias úteis. Nesse hospital, cirurgias foram agendadas em apenas 148 dias durante o período analisado. No Hospital B foram agendadas cirurgias em 184 dias. Essa unidade funciona 24 horas por dia, mas as cirurgias eletivas se iniciam às 7:00 e devem ser encerradas até 0:00 horas. Não há o conceito de encerramento do expediente, tampouco a opção de reserva de sala. Portanto os experimentos com os dados desse hospital foram conduzidos com $\eta = 0$ e $\rho = 0$.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelo modelo. A análise dos dados mostra que o modelo foi capaz de encontrar o agendamento ótimo na grande maioria dos dias em um tempo computacional razoável. Especificamente, para o Hospital A, 96,6% dos dias foram resolvidos na otimalidade, enquanto para o Hospital B esse percentual foi ainda maior, atingindo 99,4%.

Tabela 2: Resumo dos experimentos com o modelo proposto

Hospital	Dias	Soluções Ótimas	Gap Médio	Tempo Médio
Hospital A	148	143	0,34%	8,00 s
Hospital B	184	183	0,00%	1,63 s

Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com o agendamento inicial feito pela equipe do hospital. Os valores médios dos resultados estão resumidos na Tabela 4, abrangendo o período analisado. O agendamento manual apresentava várias inconsistências, como a violação de restrições de equipamento e sobreposição de cirurgias, levando a um número de procedimentos agendados que excedia a capacidade viável de realização. Devido a essas inconsistências, algumas cirurgias não puderam ser alocadas pelo modelo, uma vez que violariam as restrições pré-estabelecidas. No entanto, em média, o modelo conseguiu alocar a maioria das cirurgias agendadas, utilizando um número menor de salas do que o planejado inicialmente.

Observa-se também que a solução do modelo tende a manter as cirurgias de um médico na mesma sala ao longo do dia, reduzindo significativamente o número de mudanças de sala. Além disso, na solução otimizada, houve uma maior utilização das reservas de sala. Uma reserva é considerada atendida se pelo menos uma cirurgia do médico responsável pela reserva for alocada na sala dentro do intervalo da reserva.

Em relação ao objetivo de minimizar o atraso no encerramento das cirurgias, que é considerado apenas no caso do Hospital A, o agendamento manual resultou em um atraso médio de 37 minutos, enquanto a otimização conseguiu reduzi-lo a zero.

A Figura 3 mostra o número médio de salas usadas agrupado por semanas no Hospital A, onde pode-se observar que há uma redução consistente na quantidade de salas usadas na solução otimizada. O mesmo pode ser observado na Figura 4, que apresenta os resultados para o Hospital B.

A fim de se avaliar os ganhos com a otimização do agendamento para cada hospital, um experimento foi realizado com a criação de um procedimento adicional cuja duração é a média da duração dos procedimentos realizados no hospital. Esse procedimento não utiliza nenhum equipamento e não possui médico associado. O experimento consiste em inserir o máximo de cirurgias adicionais nos espaços livres do agendamento otimizado e do agendamento original. Os resultados para cada hospital são apresentados nas Figuras 5 e 6, onde pode-se observar que o agendamento

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

Tabela 3: Comparação dos resultados obtidos pelo modelo com o agendamento inicial

	Hospital A		Hospital B	
	Agendado	**Otimizado**	**Agendado**	**Otimizado**
# Cirurgias	54,3	53,9	51,2	48,2
# Salas Usadas	11,4	7,1	15,7	10,7
# Médicos mudando de sala	5,75	1,11	3,63	1,48
# Salas usadas por médico	1,24	1,04	1,14	1,05
# Reservas utilizadas	2,94	3,22	–	–

Tabela 4: Comparação dos resultados obtidos pelo modelo com o agendamento inicial

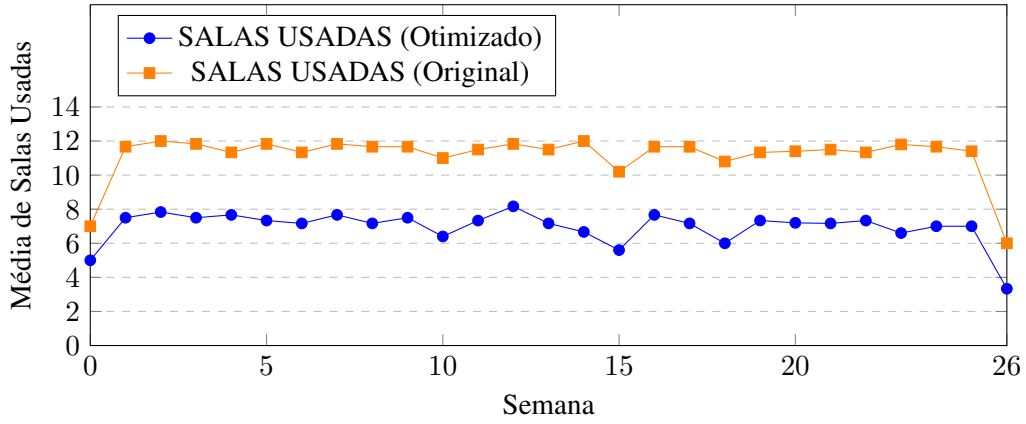


Figura 3: Média de salas usadas no Hospital A

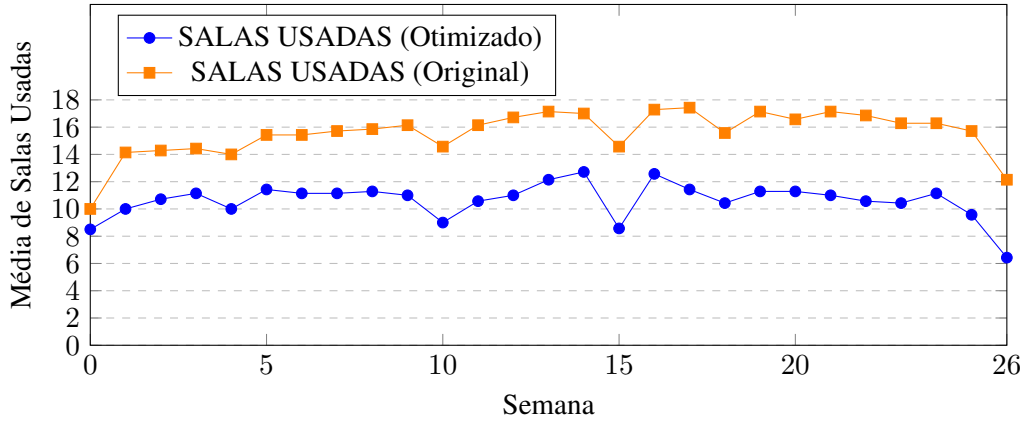


Figura 4: Média de salas usadas no Hospital B

otimizado permite que mais cirurgias sejam inseridas. No Hospital A, o agendamento otimizado permitiu um aumento médio de 17,7% na quantidade de cirurgias inseridas, enquanto no Hospital

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

B o ganho foi de 6,6%.

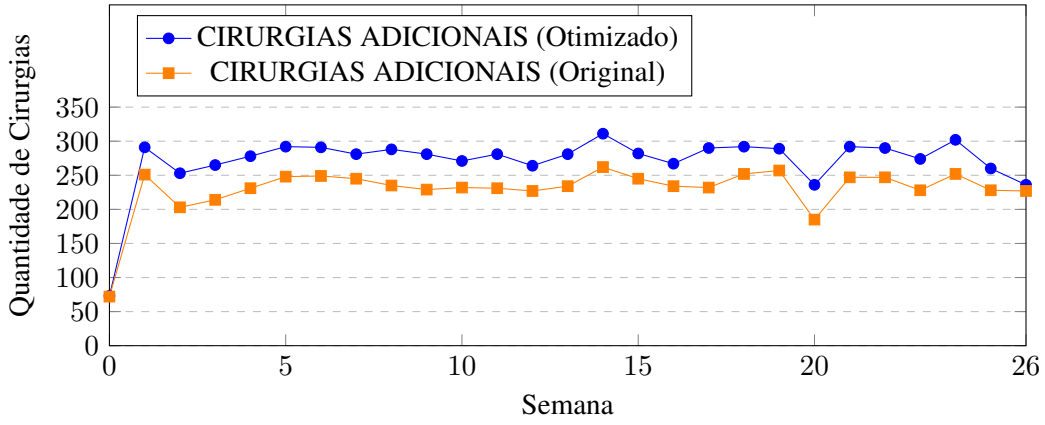


Figura 5: Cirurgias adicionadas no agendamento do Hospital A

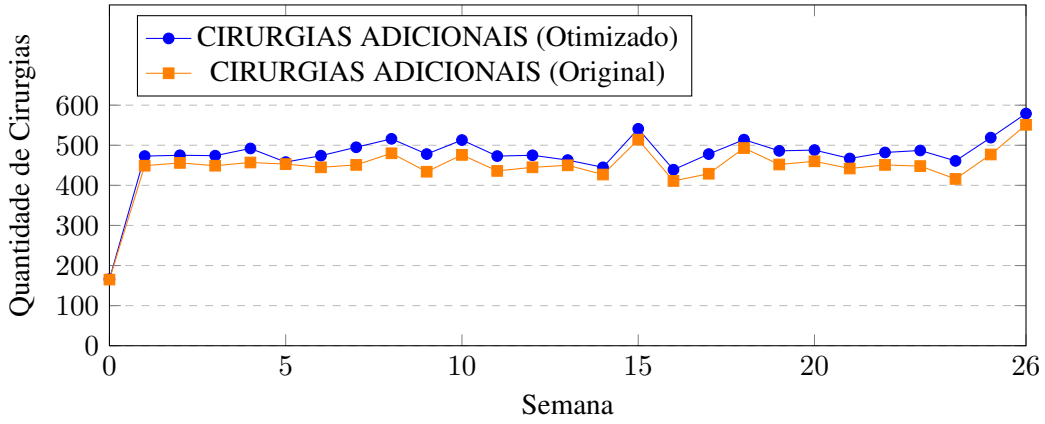


Figura 6: Cirurgias adicionadas no agendamento do Hospital B

6. Considerações Finais

Neste trabalho foi proposto um modelo de programação linear inteira mista para otimizar o agendamento de cirurgias em hospitais, minimizando o número de cirurgias não alocadas, o número total de salas utilizadas, a quantidade de salas utilizadas por cada médico e o atraso em relação ao fim do expediente do centro cirúrgico, além de maximizar o uso das reservas de sala. O modelo foi desenvolvido para seguir as regras de um grupo hospitalar, que forneceu dados da operação de dois hospitais para validação.

Um dos principais objetivos do trabalho foi otimizar o uso dos recursos disponíveis, especialmente as salas de cirurgia, que frequentemente se encontram sobrecarregadas em muitos hospitais. O modelo proposto demonstrou uma capacidade notável de reduzir o número de salas utilizadas, maximizando sua eficiência e minimizando os períodos ociosos. Ao mesmo tempo, foi possível

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

notar que as soluções propostas pelo modelo permitem o agendamento de um número maior de cirurgias quando comparado ao agendamento realizado manualmente.

Em suma, o modelo proposto neste trabalho demonstrou ser uma ferramenta valiosa para otimizar o agendamento de cirurgias em hospitais, oferecendo benefícios em termos de eficiência operacional e qualidade do serviço prestado.

Para trabalhos futuros, pode-se adaptar o método proposto para lidar com incertezas, considerando variações nas durações das cirurgias, disponibilidade de equipamentos médicos, cancelamentos de último minuto, e outras fontes de incerteza que são comuns no ambiente hospitalar. Isso poderia ser alcançado através da incorporação de técnicas de otimização robusta ou de programação estocástica, permitindo ao modelo lidar de forma mais eficaz com situações imprevistas.

Referências

Aktaş, E., Atmaca, H. E., e Akbulut, H. E. (2024). Operating room and surgical team members scheduling: A comprehensive review. *Journal of Project Management*, 9(2):149–162.

Bandi, C. e Gupta, D. (2020). Operating room staffing and scheduling. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(5):1–17.

Blake, J. T. e Carter, M. W. (2002). A goal programming approach to strategic resource allocation in acute care hospitals. *European Journal of Operational Research*, 140(3):541–561.

Blake, J. T. e Carter, M. W. (2003). Physician and hospital funding options in a public system with decreasing resources. *Socio-Economic Planning Sciences*, 37(1):45–68.

Blake, J. T., Dexter, F., e Donald, J. R. N. (2002). Operating room managers' use of integer programming for assigning block time to surgical groups: A case study. *Anesthesia & Analgesia*, 94 (1):143–148.

Brandeau, M. L. e Hopkins, D. S. P. (1984). A patient mix model for hospital financial planning. *Inquiry*, 21(1):32–44.

Brunner, J. O., Bard, J. F., e Koliisch, R. (2009). Flexible shift scheduling of physicians. *Health Care Manag Sci*, 12:285–305.

Cardoen, B., Demeulemeester, E., e Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 201:921–932.

Dexter, E. U., Dexter, F., Masursky, D., Garver, M. P., e Nussmeier, N. A. (2009). Both bias and lack of knowledge influence organizational focus on first case of the day starts. *Anesthesia & Analgesia*, 108(4):1257–1261.

Dexter, F. e Epstein, R. H. (2009). Typical savings from each minute reduction in tardy first case of the day starts. *Anesthesia & Analgesia*, 108(4):1262–1267.

Dios, M., Molina-Pariente, J. M., Fernandez-Viagas, V., e Andrade-Pineda, J. L. (2015). A decision support system for operating room scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 88:430–443.

Fei, H., Meskens, N., e Chu, C. (2010). A planning and scheduling problem for an operating theatre using an open scheduling strategy. *Computers & Industrial Engineering*, 58:221–230.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br

Fügener, A., Schiffles, S., e Kolisch, R. (2017). Overutilization and underutilization of operating rooms - insights from behavioral health care operations management. *Health Care Manag Sci*, 20:115–128.

Guerriero, F. e Guido, R. (2011). Operational research in the management of the operating theatre: a survey. *Health Care Manag Sci*, 14:89–114.

Gür, Ş. e Eren, T. (2018). Application of operational research techniques in operating room scheduling problems: Literatura overview. *Journal of Healthcare Engineering*, p. 5341394.

Li, F., Gupta, D., e Potthoff, S. (2016). Improving operating room schedules. *Health Care Manag Sci*, 19:261–278.

Olivares, M., Terwiesch, C., e Cassorla, L. (2008). Structural estimation of the newsvendor model: An application to reserving operating room time. *Management Science*, 54(1):41–55.

Park, J., Kim, B.-I., Eom, M., e Choi, B. K. (2021). Operating room scheduling considering surgeons' preferences and cooperative operations. *Computer & Industrial Engineering*, 157:107306.

Rahimi, I. e Gandomi, A. H. (2021). A comprehensive review and analysis of operating room and surgery scheduling. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28:1667–1688.

Schouten, A. M., Flipse, S. M., van NieuWenhuizen, K. E., Jansen, F. W., van der Eijk, A. C., e van den Dobbelsteen, J. J. (2023). Operating room performance optimization metrics: a systematic review. *Journal of Medical Systems*, 47(19):1–13.

van Oostrum, J. M., Bredenhoff, E., e Hans, E. W. (2010). Suitability and managerial implications of a master surgical scheduling approach. *Annals of Operations Research*, 178:91–104.

Wang, L., Demeulemeester, E., Vansteenkiste, N., e Rademakers, F. E. (2021). Operating room planning and scheduling for outpatients and inpatients: A review and future research. *Operations Research for Health Care*, 31:100323.

Wang, S., Su, H., Wan, G., e Zhong, L. (2023). Surgery scheduling in the presence of operating room eligibility and dedicated surgeon: an adaptive composite dispatching method. *International Journal of Production Research*, 61(6):1866–1881.

Zhu, S., Fan, W., Yang, S., Pei, J., e Pardalos, P. M. (2019). Operating room planning and surgical case scheduling: a review of literature. *Journal of Combinatorial Optimization*, 37:757–805.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193399
https://proceedings.science/p/193399?lang=pt-br