

Modelagem Matemática para a Alocação de Médicos em Unidades de Diagnóstico por Imagem

Vladimir Yuri Tasso e Neto
Thiago Rafael Mariotti Claudio
Caio Paziani Tomazella
Maristela Oliveira Santos

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (ICMC), Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro, CEP 13566-590, São Carlos - SP.

tasso.yuri@gmail.com
thiago.mariotti@usp.br
caio.tomazella@usp.br
mari@icmc.usp.br

RESUMO

A alocação de médicos para unidades de exames médicos e o estabelecimento de suas escalas em turnos são tarefas desafiadoras, tanto em nível operacional quanto financeiro. Nessas unidades, a escalação das equipes é comumente realizada manualmente e pode consumir um tempo considerável. Comumente, são necessários ajustes para lidar com faltas de profissionais. Neste artigo, foi desenvolvido um modelo de otimização inteira visando alocar médicos em unidades de saúde, considerando diferentes objetivos, como minimizar o número de exames não atendidos, maximizar a menor cobertura considerando as unidades e turnos, e minimizar as alocações diferentes entre as unidades. O problema foi motivado por uma aplicação em uma cidade brasileira, com testes computacionais realizados considerando instâncias de dados obtidas a partir de dados reais. Os resultados mostraram-se promissores para a alocação dos recursos médicos, evidenciando eficácia na otimização das escalas de médicos e no atendimento das necessidades das unidades de saúde.

PALAVRAS CHAVE. Otimização Inteira. Alocação de Médicos. Diagnósticos por imagem.

Tópicos: OC – Otimização Combinatória, SA – PO na Área de Saúde

ABSTRACT

Allocating physicians to medical examination units and establishing their shift schedules is challenging, operationally and financially. Personnel scheduling is typically done manually in these units and can consume considerable time. Sometimes, several adjustments are necessary, such as to handle staff absences. Thus, in this article, an integer optimization model was developed to allocate physicians to healthcare units, considering different objectives such as minimizing the number of unattended examinations, maximizing the lowest coverage considering units and shifts, and minimizing the discrepancies in allocations between units. The problem was motivated by a real-world application in a Brazilian city. Computational tests were conducted using instances generated based on real data. The results were promising for allocating medical resources, proving effective in optimizing the physicians' schedules and meeting the healthcare units' needs.

KEYWORDS. Integer Optimization. Physician allocation. Imaging Diagnostics.

Topics: OC - Combinatorial Optimization, SA - OR in Health Sector

1. Introduçāao

Grandes redes possuem múltiplas unidades de atendimento para a população, capazes de realizar diversos exames e atendimentos, demandando médicos de diferentes especialidades. Exames de imagem são parte fundamental da área da saúde, permitindo diagnósticos precisos e monitoramento das condições médicas, além de fornecer orientações e tratamentos, possibilitando diagnósticos precoces e intervenções adequadas. Entretanto, unidades de exames de imagem enfrentam alguns problemas orçamentários relacionados ao custo da operação e do maquinário, causando um rápido crescimento nos gastos, conforme apontado por Mitchell e LaGalia [2009], que aumentaram nas últimas décadas. Além disso, há o problema da escassez de mão de obra especializada, conforme o estudo Džakula e Relić [2022], que indica a redução na formação de profissionais qualificados, resultando em aumento no custo para a contratação e manutenção da força de trabalho.

O problema de alocação de médicos(as) em unidades de diagnóstico por imagem consiste, a partir de uma previsão da demanda de exames em múltiplas unidades, em determinar as unidades nas quais os médicos trabalharão em cada um de seus turnos de serviço. Neste setor, os médicos trabalham em turnos pré-definidos e podem ser alocados, no mesmo turno, para unidades situadas em uma determinada região.

Na literatura visitada, a maioria dos artigos aborda o problema de escalonamento de médicos em unidades hospitalares. Algumas revisões podem ser encontradas, como a de Erhard et al. [2018], que foca no problema de alocação de médicos em hospitais, descrevendo as características dos problemas investigados na literatura, assim como as modelagens propostas. Na área de saúde, um dos problemas mais conhecidos e estudados é a escalação de equipes de enfermagem, com diversas revisões publicadas sobre o assunto, como as de Cheang et al. [2003], Burke et al. [2004] e Causmaecker e Berghe [2011], que destacam as abordagens de solução, as bases de dados existentes, assim como a proposta de classificação do problema [Portella, 2017]. O problema de alocação de médicos e de equipe de enfermagem em hospitais difere do problema de alocação de médicos em clínicas de exames médicos. Nos hospitais, existem restrições de turnos, pois estes operam 24 horas por dia, ao contrário das clínicas, que, apesar de trabalharem em turnos, funcionam em horários reduzidos. Esses problemas, tanto de escalonamento de médicos quanto de equipe de enfermagem, possuem algumas similaridades com o problema em estudo. No entanto, apresentam restrições mais complexas, especialmente no caso da alocação da equipe de enfermagem, que geralmente é composta por funcionários dos hospitais e está sujeita a regras trabalhistas. Abdalkareem et al. [2021] observam em seu estudo que, embora exista grande volume de pesquisas em Otimização na área da saúde, poucos trabalhos são específicos à área de Alocação de Médicos em Clínicas de Diagnósticos, e embora tais problemas sejam similares superficialmente a outros ramos de pesquisa, como Alocação de Enfermeiras, existem peculiaridades inerentes ao contexto, impedindo a generalização do sistema.

Neste trabalho, é proposto um modelo de otimização inteira visando identificar oportunidades para ajustar a agenda médica, visando uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis, especificamente as salas para a realização de exames, e, consequentemente, proporcionar uma melhor prestação de serviços pelas clínicas de exames de ultrassom.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: primeiramente, na Seção 2, descreve-se brevemente o problema em estudo. Em seguida, na Seção 3, é proposto um modelo matemático de otimização inteira mista para a representação do problema abordado. Na Seção 4, são descritos os dados e as instâncias utilizadas na realização dos experimentos computacionais. Por fim, as principais conclusões e direções para pesquisas futuras são discutidas na Seção 5.

2. Definição do Problema

O estudo foca em uma única especialidade médica: exames por ultrassonografia, onde todos os profissionais estão autorizados à realização dos procedimentos. Cada médico pode trabalhar

em apenas uma unidade por dia, cumprindo todos os seus turnos no mesmo local, sem a possibilidade de serem alocados em diferentes unidades no mesmo dia. As clínicas funcionam geralmente de segunda a sábado pela manhã, de segunda a sexta à tarde, e apenas algumas atendem no sábado à tarde e aos domingos.

As unidades de diagnóstico por imagem têm um número limitado de salas equipadas para exames de ultrassom. Portanto, a quantidade de médicos alocados deve respeitar a disponibilidade dessas salas. A alocação de mais médicos em uma unidade pode aumentar a capacidade de realização de exames, se houver demanda e salas disponíveis. Em cada unidade, é necessário garantir a presença de pelo menos um médico durante cada turno, mesmo que a demanda seja baixa. Se houver mais salas disponíveis, um médico deve estar presente em pelo menos uma delas, enquanto as demais podem permanecer vazias.

Considera-se que os médicos podem ser alocados e realocados apenas em clínicas previamente selecionadas, restringindo a flexibilidade à movimentação entre as unidades, mantendo o turno previamente escolhido. Essa flexibilidade de alocação visa melhorar o atendimento, minimizar o número de exames não realizados e manter um nível médio de ocupação nas unidades. Embora seja possível movimentar os médicos entre as unidades, mudanças frequentes podem causar desconforto. Destaca-se que uma distribuição inadequada pode resultar em problemas futuros, como o excesso de alocação de médicos em algumas unidades e a sobrecarga em outras, além do não atendimento da demanda, ou seja, exames não realizados, o que pode causar insatisfação aos pacientes. Dessa forma, propõe-se analisar esse problema sob a perspectiva de quatro funções objetivo, que serão discutidas na Seção 3.

3. Modelagem Matemática

O problema é modelado como uma otimização inteira. Cada médico pode ser alocado em, no máximo, uma unidade por turno, sem a possibilidade de trabalhar em mais de uma unidade no mesmo dia. É necessário respeitar a disponibilidade de cada médico para os turnos e unidades. A quantidade de médicos alocados não pode exceder a capacidade da unidade, definida pelo número de salas disponíveis para exames. Por fim, se houver demanda em um turno/unidade, pelo menos um médico deve ser alocado. A notação usada para escrever o modelo é apresentada a seguir.

Índices e conjuntos

$i \in I$	Médicos
$u \in U$	Unidades
U_i	Unidades atendidas pelo médico i
I_u	Médicos que atendem na unidade u
$t \in T$	Turnos
$d \in D$	Dias
T_d	Turnos do dia d

Parâmetros

e_{ut}	Demanda por exames na unidade u no turno t
s_{ut}	Salas disponíveis para exames na unidade u no turno t
q_{iut}	Quantidades de exames que o médico i pode realizar na unidade u durante o turno t
a_{it}	Parâmetro binário de valor $\begin{cases} 1, & \text{se o médico } i \text{ estiver disponível para trabalho no turno } t \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

Variáveis

$$x_{iut} \begin{cases} 1, & \text{se o médico } i \text{ está alocado na unidade } u \text{ no turno } t \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$w_{iud} \begin{cases} 1, & \text{se o médico } i \text{ está alocado na unidade } u \text{ durante o dia } d \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O parâmetro q_{iut} é calculado com base na quantidade de horas do turno e no fato de que cada exame, gasta-se um tempo médio de 30 minutos. A modelagem matemática para o problema de alocação de médicos em clínicas de exame é apresentado da seguinte forma:

$$\sum_{u \in U_i} x_{iut} \leq a_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (1)$$

$$x_{iut} \leq w_{iud} \quad \forall i \in I, u \in U, d \in D, t \in T_d \quad (2)$$

$$\sum_{u \in U_i} w_{iud} \leq 1 \quad \forall i \in I, d \in D \quad (3)$$

$$w_{iud} = 0 \quad \forall i \in I, u \notin U_i, d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I_u} x_{iut} \leq s_{ut} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I_u} x_{iut} \geq 1 \quad \forall u \in U, t \in T \quad (6)$$

$$x_{iut}, w_{iud} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, u \in U, t \in T \quad (7)$$

As restrições (1) garantem que o médico seja alocado em ao máximo uma unidade por turno, respeitando as condições de disponibilidade. As restrições (2) e (3) impedem que um médico seja alocado em duas unidades no mesmo dia, e as restrições (4) impedem a alocação do médico em unidades não disponíveis. A quantidade de médicos alocados por turno é limitada pela quantidade de salas disponíveis na unidade através das restrições (5), e a condição de que haja ao menos um médico alocado por turno é garantida pelas restrições (6). Por último, as restrições (7) definem o domínio das variáveis.

Quatro funções objetivo são consideradas (FO1, FO2, FO3 e FO4):

FO1 - Minimizar exames não atendidos

Na primeira função objetivo, busca-se minimizar o número de exames não atendidos em cada unidade, dada a alocação dos médicos; em outras palavras, maximizando a cobertura média de atendimentos no horizonte de planejamento.

$$\min \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} c_{ut} \quad (8)$$

Em que c_{ut} é a quantidade absoluta de exames não atendidos na unidade u no turno t .

$$c_{ut} \geq e_{ut} - \sum_{i \in I_u} (q_{iut} \cdot x_{iut}) \quad \forall u \in U, t \in T \quad (9)$$

FO2 - Maximizar a menor cobertura

Esta função objetivo visa maximizar a menor cobertura individual dentre todos os turnos e unidades. Ao se utilizar esta abordagem, um nível de serviço mínimo é garantido para todos os turnos é garantido.

$$\max \beta_{max} \quad (10)$$

A letra β é usada para a variável que representa a cobertura, da mesma forma em que é feito na literatura de dimensionamento de lotes [Gruson et al., 2018], no qual o nível de serviço β representa a porcentagem de demanda atendida.

$$\beta_{max} \leq \frac{\sum_{i \in I_u} (q_{iut} \cdot x_{iut})}{e_{ut}} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (11)$$

FO3 - Minimizar a quantidade de exames não atendidos sujeito à FO2

Nesta estratégia, primeiro, resolve-se o modelo utilizando a função objetivo FO2 para determinar o valor máximo de β_{max} , denotado como β_{min} , conforme observado na FO2. Com o valor de β_{min} encontrado, o problema é resolvido novamente, agora minimizando a quantidade de exames não atendidos, ou seja, utilizando a função objetivo 1, sujeita às restrições 12.

$$\frac{\sum_{i \in I_u} (q_{iut} \cdot x_{iut})}{e_{ut}} \geq \beta_{min} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (12)$$

FO4 - Minimizar a troca de alocações, sujeito à FO1

Quando um médico inicialmente alocado em uma unidade é realocado para outra, essa mudança é contabilizada por meio de uma nova variável de decisão. Assim como na situação anterior, resolve-se o modelo utilizando a função objetivo FO1 para minimizar a quantidade de exames não atendidos. Em seguida, resolve-se o modelo novamente minimizando a quantidade de alocações diferentes de médicos, sujeito à condição de que a quantidade de exames não atendidos seja igual ao valor encontrado na primeira etapa. Com os valores de c_{ut} encontrados, minimiza-se a quantidade de alocações diferentes.

Nas duas últimas estratégias, segue-se uma abordagem sequencial, na qual primeiro otimiza-se um objetivo (cobertura mínima em FO3 e exames não atendidos em FO4) e, em seguida, utiliza-se o valor ótimo encontrado para construir uma nova restrição, otimizando então uma métrica secundária (exames não atendidos em FO3 e trocas de alocação em FO4), garantindo que a solução respeite os limites estabelecidos na primeira fase.

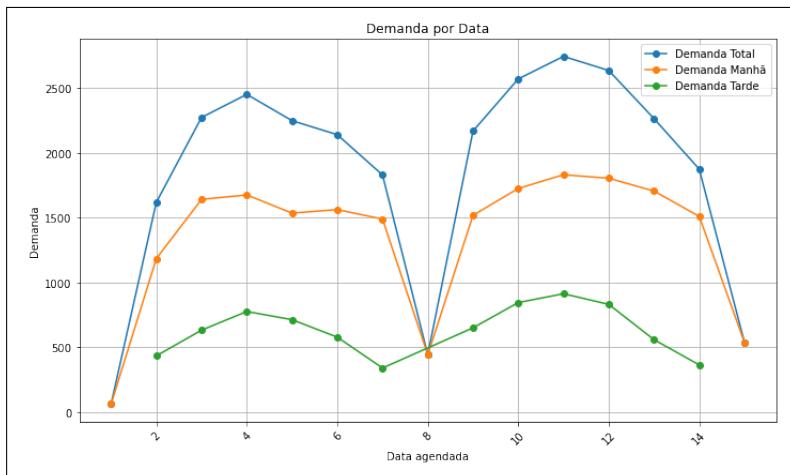
4. Avaliação dos resultados obtidos

Os testes foram realizados em um computador com processador *Intel Core i7-2600 CPU (3.40GHz)* e *16.0 GB* de memória *RAM*, sob o sistema operacional *Windows 10*. O modelo foi implementado em *Python*, utilizando o solver *Gurobi 10.0.2*, acessado via licença acadêmica.

Para a execução dos testes preliminares, foi utilizada uma instância com 35 unidades e um horizonte de 14 dias, sendo que cada dia possui dois turnos (manhã e tarde). Nesta instância, foram considerados 126 médicos e um total de 27.855 exames agendados, enquanto a capacidade disponível de exames foi de 29.950, conforme a disponibilidade de salas e médicos em cada unidade. Um total de 1.038 salas foram disponibilizadas, com uma quantidade mínima de 1 e máxima de 6 salas por unidade. Esta instância, baseada em dados reais, foi intitulada Instância Base. A distribuição de demanda, para esses 14 dias, é apresentada na Figura 1 de maneira agregada por dia e por turnos, sendo que domingo o primeiro e último dia, sendo assim, não tem demanda para o turno da tarde. Considerando as alocações históricas dos médicos nas unidades, os valores das demandas não atendidas, cobertura global, a quantidade total de médicos alocados, dentre outros (veja Tabela ??). A instância foi resolvida em um tempo inferior a 24 segundos considerando todas as funções objetivos.

Para cada função objetivo foi avaliado como resultado as métricas de impacto de cobertura e disponibilidade, demanda não-atendida, porcentagem de atendimento, cobertura global, maior

Figura 1: Demanda por dia e turnos para instância de 14 dias.



demanda não-atendida, menor cobertura, quantidade de médicos alocados, alocações em diferentes unidades e não alocados.

Na Tabela ?? são observados os resultados de cada função objetivo. A coluna "Base" representa uma alocação baseada nas informações obtidas, refletindo uma alocação padrão normalmente realizada pelas unidades, para possibilitar as comparações. É importante salientar que as métricas 'Médicos Alocados' e 'Médicos Não Alocados' representam a quantidade total de médicos alocados ou não ao longo de todo o horizonte de planejamento, considerando todos os dias analisados.

FO1 - Minimizar quantidade de exames não atendidos: A solução obtida com essa função gerou um total de 722 demandas não atendidas, resultando em uma porcentagem de atendimento de 97%. Dos 126 médicos, 11 não foram alocados. Foram realizadas 645 alocações diferentes, com a menor cobertura sendo de 33%. Na alocação inicial, houve unidades sem médico alocado (0% de cobertura).

FO2 - Maximizar menor cobertura (Unidade-turno): A solução obtida com esta função apresenta um total de 1.594 demandas não atendidas, resultando em uma porcentagem de atendimento de 94%. Além disso, houve um desempenho inferior na alocação de médicos, com 64 profissionais não alocados. Em comparação com a abordagem anterior (FO1), a menor cobertura foi de 75%, indicando uma diferença significativa em relação à FO1.

FO3 - Minimizar quantidade de exames não atendidos sujeito à FO(2): Nesta estratégia, foram registrados 760 exames não atendidos, com uma porcentagem de atendimento de 97%. A menor cobertura também foi de 75%, e apenas 14 médicos não foram alocados. Foram realizadas 643 alocações diferentes, mantendo a ordem de grandeza das estratégias anteriores.

FO4 - Minimizar a quantidade de alocações diferentes sujeito a FO(1): Com esta função, um total de 722 exames não foram atendidos, resultando em uma porcentagem de atendimento de 97%. A menor cobertura foi de 62%, superando a solução obtida com a FO1, embora o valor esteja muito próximo dos resultados das FO2 e FO3. O número de médicos não alocados foi de 12, e esta função apresentou o melhor desempenho em alocações diferentes, com um total de 240 alocações diferentes.

Observando os resultados na Tabela 4, nota-se que é possível obter soluções com coberturas superiores à alocação histórica (base) com um número reduzido de médicos e realizando poucas trocas de médicos entre unidades (alocações diferentes), principalmente no caso do modelo com a função objetivo FO4.

Tabela 4: Análise da instância Base (14 dias)

	Real	FO 1	FO 2	FO 3	FO 4
Demandas não-atendidas	1.143	722	1.594	760	722
Porcentagem atendida	96%	97%	94%	97%	97%
Cobertura Global	107%	107%	102%	107%	107%
Maior demanda não-atendida	36	20	37	23	20
Menor cobertura	0%	33%	75%	75%	62%
Médicos alocados	1.075	1.064	1.011	1.061	1.063
Alocações diferentes		645	660	643	240
Não alocados		11	64	14	12

4.1. Testes Adicionais

Para analisar o modelo desenvolvido com as quatro funções objetivo, foram realizados testes em 3 instâncias baseadas em dados reais. A instância 1 abrange um período de 28 dias, com 2 turnos diários, 35 unidades e 141 médicos. O tempo total de execução para esse conjunto de dados foi de 2 minutos, sendo que o solucionador levou mais tempo na função objetivo 4, com 100 segundos para sua execução. Os resultados obtidos para essa instância estão na Tabela 5, onde a capacidade total é o somatório de todas as salas disponibilizadas ao longo dos períodos. Nas tabelas, a demanda total representa a quantidade de exames agendados, enquanto a demanda oferecida corresponde ao número total de exames que podem ser realizados por todas as unidades, considerando todos os recursos médicos e salas disponíveis. Os resultados mostram o mesmo comportamento.

Tabela 5: Análise dos resultados da instância 2

Métricas	Base	FO1	FO2	FO3	FO4
Alocações Diferentes	0	1352	1389	1361	166
Capacidade Total	2531	2531	2531	2531	2531
Cobertura Global	107.08%	106.61%	102.2%	106.65%	106.88%
Demandas Atendidas	52473	53313	51434	53237	53313
Demandas Não-Atendidas	2086	1246	3125	1322	1246
Demandas Ofertadas	58424	58166	55760	58186	58314
Demandas Solicitadas	54559	54559	54559	54559	54559
Maior Falta – Total	36	19	30	23	19
Médicos Alocados	2139	2121	2025	2123	2128
Médicos Não Alocados	0	18	114	16	11
Menor Cobertura – Porcentagem	0%	55.56%	74.67%	74.67%	55.56%
Porcentagem Atendida	96.18	97.72%	94.27%	97.58%	97.72%
Troca de unidades	135	319	259	323	202

Já a instância 2 considerou um período de 56 dias, ainda com 2 turnos diários, 145 unidades e 126 médicos. Para esse conjunto foram gastos novamente 2 minutos na execução total, onde a função objetivo 4 novamente tomou maior parte do tempo gasto, com 63 segundos, menor que a instância 2. Os resultados, para essa instância, estão na Tabela 6.

Por fim, a instância 4 considera um período de 84 dias, com 2 turnos diários, 35 unidades e 154 médicos, sendo a maior instância em termos de volume de dados, e, portanto, o maior tempo computacional, com 5 minutos totais para execução, onde a função 4 demandou 2 minutos. Os

Tabela 6: Análise dos resultados da instância 3

Métrica	Base	FO2	FO3	FO4	FO1
Alocações Diferentes	0	2986	3210	3042	393
Capacidade Total	5463	5463	5463	5463	5463
Cobertura Global	104.99%	104.66%	98.9%	104.67%	104.83%
Demandas Atendidas	117565	119356	113068	119198	119356
Demandas Não-Atendidas	5194	3403	9691	3561	3403
Demandas Ofertadas	128883	128481	121406	128491	128683
Demandas Solicitadas	122759	122759	122759	122759	122759
Maior Falta – Total	37	23	43	26	23
Médicos Alocados	4739	4709	4429	4710	4719
Médicos Não Alocados	0	30	310	29	20
Menor Cobertura – Porcentagem	0%	41.67%	70.89%	70.89%	41.67%
Porcentagem Atendida	95.77%	97.23%	92.11%	97.1%	97.23%
Troca de unidades	301	714	496	739	443

resultados para a instância 4 estão na Tabela 7.

Tabela 7: Análise dos resultados da instância 3

Métrica	Base	FO2	FO3	FO4	FO1
Métricas	Base	FO1	FO2	FO3	FO4
Alocações Diferentes	0	4595	5003	4587	612
Capacidade Total	8357	8357	8357	8357	8357
Cobertura Global	104.16%	103.87%	98.41%	103.89%	104%
Demandas Atendidas	181357	183845	173820	183705	183845
Demandas Não-Atendidas	8058	5570	15595	5710	5570
Demandas Ofertadas	197287	196749	186406	196780	196994
Demandas Solicitadas	189415	189415	189415	189415	189415
Maior Falta – Total	37	23	44	25	23
Médicos Alocados	7260	7217	6810	7221	7231
Médicos Não Alocados	0	43	450	39	29
Menor Cobertura – Porcentagem	0%	35.71%	65.52%	65.52%	37.04%
Porcentagem Atendida	95.75%	97.06%	91.77%	96.99%	97.06%
Troca de unidades	466	1115	748	1106	687

Observa-se que as diferentes funções objetivo produziram resultados variados em termos de cobertura e atendimento. Por exemplo, a função que minimizou a quantidade de exames não atendidos (FO1) resultou em uma alta porcentagem de atendimento, mas com menor cobertura em algumas unidades. Por outro lado, a função que maximizou a menor cobertura (FO2) melhorou a cobertura mínima, mas aumentou significativamente a demanda não atendida e o número de médicos não alocados. A função FO4, que minimizou as alocações diferentes, apresentou uma das melhores coberturas globais, com um número reduzido de alocações distintas, mostrando-se eficiente em determinar soluções desejadas pela rede de exames.

5. Conclusões

Os experimentos realizados com o modelo de otimização para alocação de recursos apresentaram resultados promissores na busca por uma (re)distribuição eficiente dos médicos nas unidades, visando aumentar o número de exames agendados e reduzir a ociosidade (coberturas). A análise das diferentes funções objetivas revelou que o modelo com a função objetivo FO4, que minimiza a quantidade de alocações diferentes sujeitas à minimização da quantidade de exames não atendidos, pode ser a escolha mais apropriada para as unidades de exames. Ao comparar os resultados obtidos com as alocações-base (construídas com base nas regras das unidades), o modelo com a função objetivo FO4 demonstrou uma redução significativa na demanda não atendida, além de uma cobertura global superior, mostrando-se como uma abordagem eficaz na otimização da alocação de recursos médicos. No entanto, novos testes e novas instâncias devem ser gerados, bem como a inclusão, na modelagem, da restrição de que todos os médicos devem ser alocados. Além disso, deve-se considerar incertezas na demanda em uma próxima etapa.

Referências

- Abdalkareem, Z. A., Amir, A., Al-Betar, M. A., Ekhan, P., e Hammouri, A. I. (2021). Healthcare scheduling in optimization context: a review. *Health Technol (Berl)*, 11(3):445–469.
- Burke, E. K., Causmaecker, P. D., Berghe, G. V., e Landeghem, H. V. (2004). The state of the art of nurse rostering. *Journal of Scheduling*, 7:441–499.
- Causmaecker, P. D. e Berghe, G. V. (2011). A categorisation of nurse rostering problems. *Journal of Scheduling*, 14:3–16.
- Cheang, B., Li, H., Lim, A., e Rodrigues, B. (2003). Nurse rostering problems—a bibliographic survey. *European Journal of Operational Research*, 151(3):447 – 460.
- Džakula, A. e Relić, D. (2022). Health workforce shortage - doing the right things or doing things right? *Croat Med J*, 63(2):107–109.
- Erhard, M., Schoenfelder, J., Fügner, A., e Brunner, J. O. (2018). State of the art in physician scheduling. *European Journal of Operational Research*, 265(1):1–18.
- Gruson, M., Cordeau, J. F., e Jans, R. (2018). The impact of service level constraints in deterministic lot sizing with backlogging. *Omega*, 79:91–103.
- Mitchell, J. M. e LaGalia, R. R. (2009). Controlling the escalating use of advanced imaging: The role of radiology benefit management programs. *Medical Care Research and Review*, 66(3): 339–351. URL <https://doi.org/10.1177/1077558709332055>. PMID: 19208823.
- Portella, V. S. (2017). Metaheurística late acceptance hill climbing aplicada ao problema de escalonamento de enfermagem.