

Exemplos de Uso de Programação Linear para Resolução de Problemas na Área de Gestão em Saúde

Examples of the Use of Linear Programming for Problem-solving in Healthcare Management

Ejemplos del Uso de Programación Lineal para la Resolución de Problemas en la Gestión Sanitaria

RESUMO

Objetivo: Demonstrar como a Pesquisa Operacional, e em particular a Programação Linear, oferece um conjunto robusto de ferramentas quantitativas para a otimização de processos em gestão na área da saúde. **Método:** Através de três exemplos práticos e realistas — a alocação de enfermeiros em turnos hospitalares, a otimização do acesso geográfico a serviços especializados e aumento da sensibilidade diagnóstica de serviços laboratoriais, — exploramos a formulação de modelos, a interpretação de resultados e as limitações inerentes à técnica. **Resultados:** O trabalho conclui que, embora a PL seja uma ferramenta poderosa, seu valor é maximizado quando combinada com o conhecimento técnico dos gestores e uma compreensão clara de suas limitações, ressaltando a necessidade de capacitação contínua para a aplicação eficaz de modelos de otimização.

DESCRIPTORES: Pesquisa Operacional, Programação Linear, Alocação de Recursos, Administração Hospitalar.

ABSTRACT

Objective: To demonstrate how Operations Research, and specifically Linear Programming, provides a robust set of quantitative tools for process optimization in healthcare management. **Method:** Through three realistic practical examples—nursing shift scheduling, the optimization of geographic access to specialized services, and the enhancement of diagnostic sensitivity in laboratory services—we explore model formulation, results interpretation, and the inherent limitations of the technique.

Results: The study concludes that while LP is a powerful tool, its value is maximized when combined with the technical expertise of managers and a clear understanding of its limitations, highlighting the necessity of continuous training for the effective application of optimization models.

DESCRIPTORS: Operations Research, Linear Programming, Resource Allocation, Hospital Administration.

RESUMEN

Objetivo: Demostrar cómo la Investigación Operativa, y en particular la Programación Lineal, ofrece un conjunto robusto de herramientas cuantitativas para la optimización de procesos en la gestión sanitaria. **Método:** A través de tres ejemplos prácticos y realistas —la asignación de enfermeros en turnos hospitalarios, la optimización del acceso geográfico a servicios especializados y el aumento de la sensibilidad diagnóstica en servicios de laboratorio— exploramos la formulación de modelos, la interpretación de resultados y las limitaciones inherentes a la técnica. **Resultados:** El trabajo concluye que, si bien la PL es una herramienta poderosa, su valor se maximiza cuando se combina con el conocimiento técnico de los gestores y una comprensión clara de sus limitaciones, resaltando la necesidad de una capacitación continua para la aplicación eficaz de los modelos de optimización.

DESCRIPTORES: Investigación Operativa, Programación Lineal, Asignación de Recursos, Administración Hospitalaria.

Anderson Sena Barnabe

Biólogo. Doutor em Epidemiologia. Professor do departamento de saúde das Faculdades Oswaldo Cruz, Universidade Cruzeiro do Sul e Instituto de Pesquisa e Educação em Saúde de São Paulo (IPESSP)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7463-6971>

Flaviane de Fátima Ramos

Aluna de graduação de Enfermagem das Faculdades Oswaldo Cruz. Componente dos programas de iniciação científica das Faculdades Oswaldo Cruz.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6778-9730>

Victor Cauê Lopes

Enfermeiro. Mestre em Enfermagem, Professor do departamento de saúde das Faculdades Oswaldo Cruz e do Centro Universitário Católico Ítalo Brasileiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7328-875X>

Luana Paula Gomes de Lima

Bióloga. Mestre em Biosistemas, professora do departamento de saúde das Faculdades Oswaldo Cruz

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7505-5283>

Recebido em: 26/02/2026

Aprovado em: 01/04/2026

INTRODUÇÃO

A gestão de sistemas de saúde, sejam eles públicos ou privados, opera em um ambiente de alta complexidade, caracterizado por recursos finitos, múltiplos objetivos e uma necessidade constante de aprimorar a qualidade e a eficiência do atendimen-

to. Nesse cenário, a tomada de decisão baseada puramente na intuição ou em métodos tradicionais de tentativa e erro torna-se insuficiente⁽¹⁾. A Pesquisa Operacional (PO) surge como uma ciência aplicada dedicada a fornecer uma base analítica para decisões mais eficazes, utilizando um arsenal de métodos matemáticos, estatísticos e computacionais⁽²⁾.

Dentre as ferramentas da PO, a Programação Linear (PL) destaca-se por sua versatilidade e poder na resolução de problemas de otimização. A PL tem sido aplicada com sucesso em diversas indústrias para minimizar custos e maximizar a produtividade, e seu potencial na área da saúde é igualmente vasto⁽³⁾.

Estudos demonstram sua utilidade em uma variedade de contextos, desde o planejamento de dietas e a otimização de tratamentos radioterápicos até a alocação de recursos em larga escala, como o agendamento de cirurgias, a gestão de leitos hospitalares e a otimização de escalas de trabalho de profissionais de saúde ^(4,5). No Brasil, pesquisas já exploraram o uso da PL para otimizar o acesso geográfico a redes de atenção à saúde no Sistema Único de Saúde (SUS) e para avaliar o desempenho de serviços de atenção primária ^(6,7).

No entanto, a mera apresentação de modelos teóricos é insuficiente. A aplicação bem-sucedida da PL requer uma compreensão profunda não apenas de como formular um problema, mas também de como interpretar seus resultados, reconhecer suas limitações e navegar pelos desafios práticos de sua implementação. Este artigo visa preencher essa lacuna, oferecendo uma análise aprofundada e crítica da aplicação da Programação Linear na saúde. Utilizaremos exemplos práticos e mais realistas para ilustrar o processo completo: desde a modelagem até a discussão sobre a análise de sensibilidade e a necessidade de extensões como a Programação Inteira. O objetivo final é capacitar gestores e analistas de saúde a enxergar a PL não como uma "caixa-preta" matemática, mas como uma ferramenta estratégica e transparente para aprimorar a tomada de decisão.

MÉTODO

Trata-se de um estudo de natureza aplicada e quantitativa, caracterizado como uma modelagem matemática e simulação de cenários. A pesquisa não envolveu a coleta de dados primários com seres humanos, baseando-se em parâmetros técnicos extraídos da literatura especializada e de normas regulamentadoras da saúde para a construção de modelos realistas.

O estudo foi desenvolvido entre fe-

vereiro de 2025 e dezembro de 2025. Os cenários simulados foram construídos com base no contexto do sistema único de saúde (SUS), considerando especificidades como a legislação trabalhista de enfermagem e a estrutura de redes de atenção à saúde do SUS.

A "amostra" deste estudo consiste em três problemas-tipo fundamentais na gestão em saúde, selecionados por sua representatividade e complexidade:

- 1. Dimensionamento de pessoal:** Alocação de turnos de enfermagem.
- 2. Gestão de redes:** Otimização de acesso geográfico e orçamentário a serviços de fisioterapia.
- 3. Eficiência diagnóstica:** Maximização da sensibilidade e custo-efetividade laboratorial. Os critérios de inclusão para a seleção desses problemas foram: (a) natureza linear das restrições e objetivos; (b) relevância direta para a tomada de decisão gerencial; e (c) disponibilidade de parâmetros técnicos para modelagem

A Programação Linear é uma técnica matemática para otimizar um resultado (por exemplo, minimizar um custo ou maximizar o atendimento) dadas certas restrições (como orçamento, tempo ou capacidade). Todo problema de PL é composto por três elementos essenciais:

1. Variáveis de Decisão: Representam as quantidades que se deseja determinar. São as "alavancas" que o gestor pode ajustar. Por exemplo, o número de enfermeiros a serem alocados em cada turno.

2. Função Objetivo: É a expressão matemática, em termos das variáveis de decisão, que se deseja otimizar (maximizar ou minimizar). Deve ser uma função linear.

3. Restrições: São equações ou inequações lineares que limitam os valores que as variáveis de decisão podem assumir, representando as limitações do mundo real (disponibilidade de pessoal, orçamento, demanda mínima, etc.).

Uma vez que um problema é formu-

lado, o Método Simplex, desenvolvido por George Dantzig em 1947, é o algoritmo mais tradicionalmente usado para resolvê-lo ⁽⁸⁾. Embora os detalhes matemáticos sejam complexos, a intuição por trás do método é geométrica e elegante. O conjunto de todas as soluções que satisfazem as restrições é chamado de "região viável". Em um problema com duas variáveis, essa região é um polígono no plano. O método Simplex demonstra que a solução ótima (se existir) sempre estará em um dos vértices (ou "quinas") desse polígono. O algoritmo funciona de maneira inteligente, partindo de um vértice inicial e movendo-se para vértices adjacentes que melhorem o valor da função objetivo, até que não seja mais possível encontrar um vértice melhor. Softwares modernos, como o Solver do Excel ou bibliotecas em Python (Scipy, PuLP), automatizam esse processo, permitindo a resolução de problemas com milhares de variáveis e restrições.

Para ilustrar a aplicação, apresentamos dois exemplos adaptados de desafios comuns na gestão da saúde.

Exemplo 1: Alocação de Enfermeiros (Programação Inteira)

Problema: Um hospital precisa criar a escala de trabalho diária para uma unidade, minimizando os custos com pessoal e garantindo a cobertura mínima de enfermagem em diferentes turnos. A legislação trabalhista exige que cada enfermeiro trabalhe em um turno contínuo de 8 horas. Com base em dados históricos, a demanda por enfermeiros varia ao longo do dia, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Demanda mínima de profissionais em horários específicos

Período	Horário	Demanda Mínima
1	06:00 às 10:00	14
2	10:00 às 14:00	8
3	14:00 às 18:00	12
4	18:00 às 22:00	6
5	22:00 às 06:00	4

Fonte: Autores.

Variáveis de Decisão: Como o número de enfermeiros deve ser um valor inteiro, usamos a Programação Inteira, uma variante da PL. As variáveis são:

- x_1 : Nº de enfermeiros começando às 06:00 (trabalham de 06:00 a 14:00)
- x_2 : Nº de enfermeiros começando às 10:00 (trabalham de 10:00 a 18:00)
- x_3 : Nº de enfermeiros começando às 14:00 (trabalham de 14:00 a 22:00)
- x_4 : Nº de enfermeiros começando às 18:00 (trabalham de 18:00 a 02:00 do dia seguinte)
- x_5 : Nº de enfermeiros começando às 22:00 (trabalham de 22:00 a 06:00 do dia seguinte)
- Função Objetivo (Minimizar o total de enfermeiros contratados):
Minimizar $Z = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$
- Restrições (A cobertura em cada período deve atender à demanda):
- Período 1 (06-10h): $x_1 \geq 14$ (Apenas o turno que começa às 6h cobre este período)
- Período 2 (10-14h): $x_1 + x_2 \geq 8$ (Coberto por quem começou às 6h e às 10h)
- Período 3 (14-18h): $x_2 + x_3 \geq 12$

- Período 4 (18-22h): $x_3 + x_4 \geq 6$
- Período 5 (22-06h): $x_4 + x_5 \geq 4$
- Não-negatividade e Inteira: $x_i \geq 0$ e x_i deve ser inteiro para todo i .

Exemplo 2: Otimização de Acesso a Centros de Fisioterapia

Problema: Uma secretaria de saúde regional deseja alocar sua cota de 1.000 sessões de fisioterapia mensais entre dois novos centros (Centro A e Centro B) para maximizar o número total de pacientes atendidos. O Centro A, maior, tem um custo de R\$ 50 por sessão e uma capacidade máxima de 700 sessões/mês. O Centro B, menor e localizado em uma área de menor custo, tem um custo de R\$ 40 por sessão e capacidade de 500 sessões/mês. O orçamento total disponível para as sessões é de R\$ 45.000.

- Variáveis de Decisão:
- x_A : Número de sessões alocadas ao Centro A
- x_B : Número de sessões alocadas ao Centro B
- Função Objetivo (Maximizar o número de sessões):
Maximizar $Z = x_A + x_B$
- Restrições:
- Orçamento: $50x_A + 40x_B \leq 45000$

- Capacidade do Centro A: $x_A \leq 700$
- Capacidade do Centro B: $x_B \leq 500$
- Cota Total: $x_A + x_B \leq 1000$ (Esta restrição pode ser redundante, mas é bom explicitá-la)
- Não-negatividade: $x_A \geq 0, x_B \geq 0$

Exemplo 3: maximização da rotina laboratorial.

Um determinado laboratório efetua dois tipos de exames para a mesma finalidade (exames A e B), ambos se complementam e precisam ser repetidos mais de uma vez para a melhor preditividade diagnóstica. O Exame A tem uma sensibilidade diagnóstica de 60% ou B de 70%, o custo de A é de R\$ 5,00 e de B R\$ 10,00.

Tomando por base que o laboratório necessita emitir os laudos com a melhor acurácia diagnóstica (repetição dos exames) e em tempo máximo de 120 minutos, ao melhor preço, temos por objetivo: minimizar o custo dos exames e otimizar a resposta em nível de sensibilidade dos laudos e no melhor tempo possível. O controle de qualidade infere que a sensibilidade diagnóstica seja de no mínimo 60%, e o tempo de operação

em 20 e 40 minutos respectivamente.

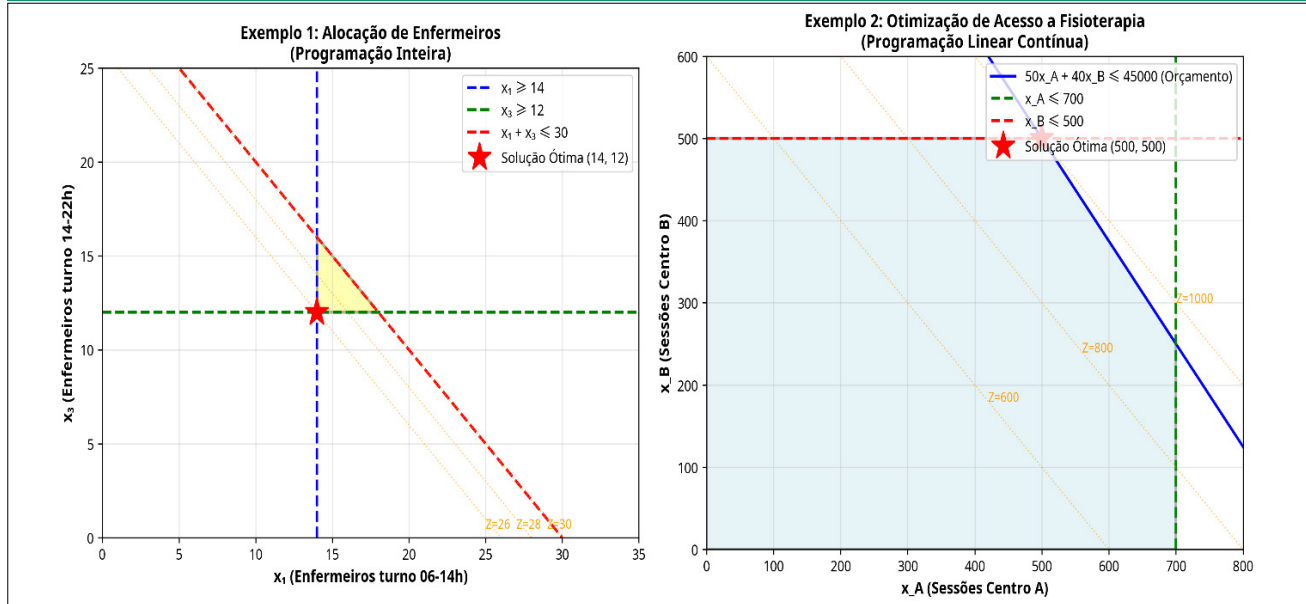
RESULTADOS

A figura abaixo apresenta a representação geométrica de ambos os

exemplos, mostrando a região viável (área sombreada) e o ponto ótimo (estrela vermelha). No Exemplo 1, a região viável é definida pelas restrições de demanda mínima, e a solução ótima está no vértice que minimiza o total de

enfermeiros. No Exemplo 2, a região viável é um polígono mais complexo, limitado pelo orçamento, capacidades dos centros e cota total, com a solução ótima maximizando o número de sessões (figura 1).

Figura 1: Representações gráficas das respostas sobre os problemas descritos nos exemplos 1 e 2, usando programação linear.



Fonte: Autores.

Solução do Exemplo 1 (Alocação de Enfermeiros)

Resolvendo o problema de Programação Inteira, a solução ótima é:

- $x_1 = 14$ (14 enfermeiros começando às 06:00)
- $x_2 = 0$ (Nenhum enfermeiro começando às 10:00)
- $x_3 = 12$ (12 enfermeiros começando às 14:00)
- $x_4 = 0$ (Nenhum enfermeiro começando às 18:00)
- $x_5 = 4$ (4 enfermeiros começando às 22:00)

O custo mínimo é de 30 enfermeiros no total ($Z = 14 + 0 + 12 + 0 + 4$).

Solução do Exemplo 2 (Acesso a Fisioterapia)

Este é um problema de PL clássico. A solução ótima é:

- $x_A = 500$ (500 sessões no Centro A)
- $x_B = 500$ (500 sessões no Centro B)

O número máximo de sessões é 1.000 ($Z = 500 + 500$). O custo total seria de $50 \cdot 500 + 40 \cdot 500 = 25000 + 20000 = R\$ 45.000$, utilizando todo o orçamento. A capacidade do Centro A não é totalmente utilizada, e a cota total é atingida.

Solução do Exemplo 3:

As equações referentes às restrições do exemplo 1 são: Tempo de execução: $x_1 + x_2 \leq 120$ Exame A: $x_1 \geq 20$ Exame B: $x_2 \geq 40$ Assim o modelo matemático é A solução ótima do problema está na intersecção das retas $x_1=20$ e $x_2=40$. O ponto ótimo do problema é $(x_1, x_2)=(20, 40)$, isto é, quatro repetições do exame A e quatro do exame B.

Com a metodologia podemos verificar a hipótese ótima em relação tempo de execução dos laudos e a que custo mínimo. Sendo que se pode obter um custo mínimo de R\$60,00 se for realizado quatro repetições de ambos os exames de forma simultânea.

DISCUSSÃO

No exemplo dos enfermeiros, a solução de não contratar ninguém para os turnos das 10h e 18h pode criar gargalos ou sobrecarga nos turnos adjacentes, mesmo que a demanda mínima seja atendida. O modelo não captura a fadiga ou a flexibilidade da equipe. A Análise de Sensibilidade é uma etapa crucial aqui. Ela responde a perguntas como: "Até que ponto o custo de um turno pode aumentar antes que a solução ótima mude?" ou "Qual o impacto no cus-

to total se a demanda no período 3 aumentar em uma unidade?". Essa análise fornece ao gestor uma compreensão da robustez da solução e das variáveis mais críticas do sistema.

No exemplo da fisioterapia, a solução aloca o máximo possível de sessões (500) no centro mais barato (B) e o restante no centro A até esgotar o orçamento. O que aconteceria se o orçamento fosse de R\$ 48.000? A solução mudaria para $x_A = 700$ e $x_B = 300$, mostrando que a capacidade do Centro A se torna a restrição ativa. A análise de sensibilidade permite ao gestor entender o valor de cada recurso. Por exemplo, cada real a mais no orçamento (até certo ponto) pode gerar mais sessões, e a análise quantifica exatamente esse ganho.

CONCLUSÃO

A Programação Linear é uma ferramenta comprovadamente eficaz para

enfrentar desafios complexos de alocação de recursos na área da saúde. Como demonstrado, sua aplicação vai muito além de simples problemas teóricos, podendo informar decisões estratégicas sobre escalas de trabalho, alocação de serviços e utilização de orçamentos. No entanto, este trabalho buscou ressaltar que o poder da PL não reside em uma aplicação cega de seus algoritmos, mas em uma utilização crítica e informada.

O verdadeiro valor emerge quando os gestores compreendem a formulação do modelo, questionam suas premissas, realizam análises de sensibilidade e estão cientes de suas limitações. A decisão de usar Programação Inteira, por exemplo, é um reflexo dessa compreensão mais profunda. A implementação bem-sucedida não é apenas um desafio técnico, mas também gerencial, exigindo dados de qualidade, ferramentas adequadas e uma cultura que valorize a tomada de decisão baseada em evi-

dências.

A tomada de decisões na área de assistência à saúde abre espaço para aplicação de técnicas de otimização em problemas de alocação de recursos apresentando-se como uma ferramenta complementar aos modelos de avaliação econômica, a estatística passa a ser uma ferramenta de uso em saúde de implicação extremamente necessária.

Portanto, mais do que apenas uma técnica matemática, a Programação Linear deve ser vista como uma filosofia de gestão: uma abordagem estruturada para pensar sobre problemas complexos, identificar as principais alavancas de decisão e encontrar, de forma transparente e defensável, o melhor caminho a seguir. O investimento na capacitação de profissionais de saúde para utilizar essas ferramentas não é um luxo, mas uma necessidade para a sustentabilidade e a eficiência dos sistemas de saúde do futuro.

Referências

1. Rais A, Viana A. Operations Research in Healthcare: A survey. *International Transactions in Operational Research*. 2011;18(1):1-31.
2. Hillier FS, Lieberman GJ. *Introduction to Operations Research*. 10th ed. New York: McGraw-Hill; 2015.
3. Moreira FR. Programação linear aplicada a problemas da área de saúde. *Einstein (São Paulo)*. 2003;1(1):1.
4. Hughes WL, Soliman SY. Short-Term Case Mix Management With Linear Programming. *Journal of Healthcare Management*. 1985;30(1):34-42.
5. Biswas T, Das MC. A Linear Programming Problem Analysis for Improving the Nurse Rostering. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*; 2015.
6. Battesini M, Coelho HS, Dionísio EA, Fogliatto FS. Uso de programação linear para otimizar o acesso geográfico em redes temáticas de atenção à saúde. *Cadernos de Saúde Pública*. 2018;34(7):e00055017.
7. Colussi CF, Calvo MCM, Freitas SFT. A Programação Linear na avaliação do desempenho da Saúde Bucal na Atenção Primária. *Einstein (São Paulo)*. 2013;11(3):324-330.
8. Cottle RW, George B, Dantzig (1914–2005). *Notices of the AMS*. 2007;54(3):344-362.