



OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO LOGÍSTICA EM BIOTECNOLOGIA: UM MODELO MULTIPERÍODO PARA TRANSPORTE DE ISOTANQUES

Logistics management optimization in biotechnology: a multi-period model for Isotank transportation

Optimización de la gestión logística en biotecnología: un modelo multiperíodo para el transporte de Isotankes

Heitor Delivio Sanches Salinas¹, Lucas de Campos Soares², Isadora de Campos Tavares³, Mario Vinicio Garcia^{4*}, Gislaine Camila Lapasini Leal⁵, & Rafael Henrique Palma Lima⁶

^{1 2 3 4 5} Universidade Estadual de Maringá ⁶ Universidade Tecnológica Federal do Paraná

¹ heitor26@gmail.com ² lucasdecampossoares@gmail.com ³ isapradotavares@gmail.com ^{4*} marioviniciogarcia@gmail.com

⁵ gclleal@uem.br ⁶ rafaelhlhima@utfpr.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 19.03.2025

Aprovado: 23.07.2025

Disponibilizado: 24.09.2025

PALAVRAS-CHAVE: otimização logística; biotecnologia; transporte de isotanques; pesquisa operacional.

KEYWORDS: logistics optimization; biotechnology; tank container transport; operations research.

PALABRAS CLAVE: optimización logística; biotecnología; transporte de isotanques; investigación operativa.

***Autor Correspondente:** Garcia, M. V.

RESUMO

A gestão logística do transporte de isotanques em uma empresa multinacional de biotecnologia apresenta desafios significativos. A empresa, com operações no Brasil, utiliza fermentação de precisão com leveduras geneticamente modificadas para produzir moléculas específicas. O transporte dos extratos fermentados, que requer isotanques, deve ser otimizado para minimizar custos e melhorar a eficiência da cadeia de suprimentos. Este artigo apresenta um modelo matemático de otimização multiperíodo para enfrentar esses desafios logísticos, utilizando técnicas de pesquisa operacional. O modelo proposto visa otimizar as operações logísticas e foi validado com dados reais das operações da empresa. Os resultados mostram melhorias nos custos operacionais e na capacidade de resposta da cadeia de suprimentos. A aplicação de modelos de otimização, adaptados às necessidades da logística em biotecnologia, é destacada, promovendo melhorias no desempenho logístico em contextos industriais similares.

ABSTRACT

Logistics management of isotank transport in a multinational biotechnology company presents significant challenges. The company, with operations in Brazil, uses precision fermentation with genetically modified yeasts to produce specific molecules. The transport of fermented extracts, which requires isotanks, must be optimized to minimize costs and improve the efficiency of the supply chain. This article presents a multiperiod optimization model to address these logistical challenges, using operational research techniques. The proposed model aims to optimize logistical operations and was validated with real data from the company's operations. The results show improvements in operational costs and supply chain responsiveness. The application of optimization models, adapted to the needs of biotechnology logistics, is highlighted, promoting improvements in logistical performance in similar industrial contexts.

RESUMEN

La gestión logística del transporte de isotanques en una empresa multinacional de biotecnología presenta desafíos significativos. La empresa, con operaciones en Brasil, utiliza fermentación de precisión con levaduras genéticamente modificadas para producir moléculas específicas. El transporte de los extractos fermentados, que requiere isotanques, debe optimizarse para minimizar costos y mejorar la eficiencia de la cadena de suministro. Este artículo presenta un modelo de optimización multiperíodo para enfrentar estos desafíos logísticos, utilizando técnicas de investigación operativa. El modelo propuesto tiene como objetivo optimizar las operaciones logísticas y fue validado con datos reales de las operaciones de la empresa. Los resultados muestran mejoras en los costos operativos y en la capacidad de respuesta de la cadena de suministro. Se destaca la aplicación de modelos de optimización, adaptados a las necesidades de la logística en biotecnología, promoviendo mejoras en el desempeño logístico en contextos industriales similares.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o setor de biotecnologia se destacou ao criar produtos e processos inovadores, com uma maior atenção à sustentabilidade, predominantemente em produtos químicos finos, biofármacos, bem como na produção molecular de alto valor agregado. Como exemplo, a fermentação de precisão transformou o campo da síntese de compostos complexos, apresentando um meio para substituir técnicas convencionais por opções mais eficazes e sustentáveis (Aguilar, Twardowski, & Wohlgemuth, 2019). Tal desenvolvimento está intimamente relacionado à bioeconomia, definida como o conceito baseado no conhecimento que integra ciência, indústria e sociedade para usar de forma sustentável recursos biológicos renováveis, a fim de produzir alimentos, materiais e energia, contribuindo assim para a inovação e competitividade em todas as cadeias produtivas. Dado o desenvolvimento tecnológico, a sustentabilidade econômica e a redução dos custos operacionais estão entre os principais impulsionadores do sucesso da indústria, que são um pré-requisito para a expansão e consolidação de soluções biotecnológicas nos mercados globais (Bröring, Laibach, & Wustmans, 2020).

As otimizações dos processos logísticos vão além da simples minimização de custos de transporte e inventário. Elas englobam decisões estratégicas mais amplas, como a definição de localizações ideais, a expansão da capacidade produtiva, o balanceamento entre risco e retorno, e a busca por maior lucratividade. Essas ações são essenciais para garantir a competitividade em um ambiente de negócios dinâmico e incerto. De acordo com LeMay et al. (2017), a Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM) consiste na coordenação de redes que visam transferir produtos, informações e serviço de um fornecedor a um cliente para atender uma necessidade existente. Nesse contexto, ferramentas quantitativas, como a programação linear inteira mista, desempenham um papel crucial na identificação de oportunidades de melhoria e na tomada de decisão otimizada em diferentes frentes da logística (Krajewski, Ritzman & Malhotra, 2009; Blanco, Hinojosa & Zavala, 2024).

Um exemplo concreto de como essas estratégias logísticas se materializam na prática é a adoção de isotanques no transporte de líquidos e gases a granel, especialmente no setor da biotecnologia. O isotanque é a solução líder e mais sustentável para líquidos e gases a granel, com um crescimento médio de 7% entre 2013 e 2023 no contexto da biotecnologia (International Tank Container Organisation [ITCO], 2023). Esses contêineres são apresentados em torno de rigorosos requisitos de qualidade, englobando fatores como metal inoxidável e isolamento térmico, que proporcionam a satisfação dos produtos durante o transporte de carga. Esses contêineres especializados isolados são construídos de forma robusta e equipados com acessórios avançados, como medidores de pressão, volume e temperatura ou válvulas de segurança, tornando-os adequados para o transporte de substâncias sensíveis que exigem condições sérias que podem afetar sua qualidade (Liguori et al., 2021).

Um isotanque é projetado e construído de acordo com normas internacionais, como a ISO 1496-3, que define os requisitos para o transporte seguro de líquidos e gases a granel (Purnamasari et al., 2024). Embora os isotanques sejam uma solução de excelência técnica, sua adoção exige a análise de um delicado equilíbrio entre qualidade e custo. O gerenciamento da cadeia de suprimentos (GCS), definido como o planejamento e a coordenação de redes que conectam organizações e indivíduos para a movimentação de bens,

serviços e informações, desempenha papel fundamental na otimização desse equilíbrio (Panayides et al., 2018).

Em ambientes industriais dinâmicos como o da biotecnologia, caracterizados por incertezas na demanda, variabilidade operacional e restrições logísticas específicas, a utilização de modelos multiperíodo para a gestão da cadeia de suprimentos torna-se uma abordagem estratégica relevante. Dentre esses modelos, destaca-se o problema de fluxo de custo mínimo, cuja estrutura permite capturar decisões logísticas ao longo do tempo, considerando múltiplos períodos, locais e tipos de recursos. Tal modelagem promove um equilíbrio entre eficiência econômica e responsividade operacional, sendo especialmente útil em sistemas complexos e sensíveis a custos logísticos, como o transporte de isotanques (Ogbe et al., 2023). Segundo LeMay et al. (2017), a adoção de ferramentas quantitativas robustas, fundamentadas na teoria da otimização e na pesquisa operacional, proporciona ganhos significativos de desempenho e competitividade, ao transformar atividades logísticas em processos sustentáveis e economicamente racionais.

O problema considerado neste trabalho parece estar relacionado a uma abordagem incremental que abrange diferentes classes potenciais de otimização de redes, especialmente no contexto de formulações multiperíodo que lidariam com a incerteza do futuro uma característica comumente observada em aplicações práticas e mencionada em trabalhos como Bu (2021), Blanco, Hinojosa e Zavala (2024) e Glomb, Liers e Rösel (2022). Isso incorpora as dinâmicas de transporte e inventário não integrados, permitindo a otimização do uso de recursos ao longo do tempo (Bu, 2021). A abordagem multiperíodo cria flutuações na demanda com capacidade de transporte e custos operacionais que podem atender à demanda através da adição de uma variável temporal. Isso é crítico para indústrias com fluxos dinâmicos (por exemplo, cadeia de suprimentos, planejamento de produção industrial e distribuição de produtos perecíveis), onde o tempo de alguma forma se relaciona com eficiência e custos (Hu, Gao, & Guo, 2024; Glomb, Liers, & Rösel, 2022; Almeida & Conceição, 2021).

O problema de otimização de fluxo de rede multiperíodo pode ser resolvido usando o problema de fluxo de custo mínimo: um modelo matemático que visa minimizar os custos de transporte e armazenamento ao longo do tempo. Este modelo pode ser resolvido usando vários métodos, como programação linear inteira mista (MILP), algoritmos heurísticos ou métodos de decomposição, o que possibilita resolver problemas complexos de grande escala (Curry & Smith, 2021; Büsing, Koster & Schmitz, 2022; Almeida et al., 2018). O uso de métodos computacionais de ponta, como programação estocástica e técnicas de otimização robusta, permite que os modelos incluam incertezas e resultem em soluções menos sensíveis às mudanças inesperadas no contexto operacional. Tais abordagens têm sido amplamente empregadas por domínios que incluem, mas não se limitam, a transporte, energia, logística humanitária, biotecnologia para controlar o consumo de recursos ao longo do tempo, alicerce para a sustentabilidade do sistema e vantagem competitiva (Nezhadroshan et al., 2020).

O presente estudo tem por objetivo o desenvolvimento e a aplicação de um modelo matemático de otimização de redes logísticas multiperíodo com balanço de estoques, visando à minimização dos custos totais relacionados à movimentação de extrato fermentado em isotanques no contexto de uma operação industrial do setor de biotecnologia. Adicionalmente, busca-se diagnosticar e avaliar deficiências estruturais da cadeia de

suprimentos atualmente em vigor na organização analisada, com ênfase na redução dos custos de transporte e armazenagem, sem comprometer a sustentabilidade e a eficiência operacional do sistema logístico.

A principal contribuição científica deste trabalho reside na formulação de um modelo de fluxo de custo mínimo multiperíodo, estruturado por meio de programação linear inteira mista (MILP), o qual incorpora características operacionais frequentemente negligenciadas na literatura, como a presença de contratos logísticos híbridos (*leasing* e *spot*), requisitos obrigatórios de lavagem de isotanques, restrições de capacidade por localidade e a integração das decisões de produção e distribuição ao longo do tempo. Mais do que uma simples aplicação técnica a um estudo de caso, esta pesquisa avança sobre lacunas existentes ao demonstrar, com base em dados reais de uma planta situada no interior do estado de São Paulo, que a aplicação de modelos matemáticos robustos pode promover ganhos logísticos substanciais em cadeias de suprimentos biotecnológicas, contribuindo de forma relevante para o corpo teórico da pesquisa operacional aplicada à bioeconomia.






DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O modelo proposto foi desenvolvido para solucionar um problema real para uma empresa multinacional do ramo de biotecnologia especializada em fermentação de precisão utilizando leveduras geneticamente modificadas para produção de moléculas específicas de alto valor agregado. A empresa possui uma planta industrial de fermentação própria que é utilizada para a produção de extrato fermentado que é usado como matéria-prima em unidades fabris de purificação de parceiros em regime de contrato de manufatura mediante ao pagamento de taxa de industrialização.

Duas moléculas, A e B, competem pela utilização dos isotanques que são alugados pela empresa em duas modalidades: contrato de longa duração (*leasing*) de no mínimo 6 meses e contrato de curta duração (*spot*) sem tempo mínimo de utilização.

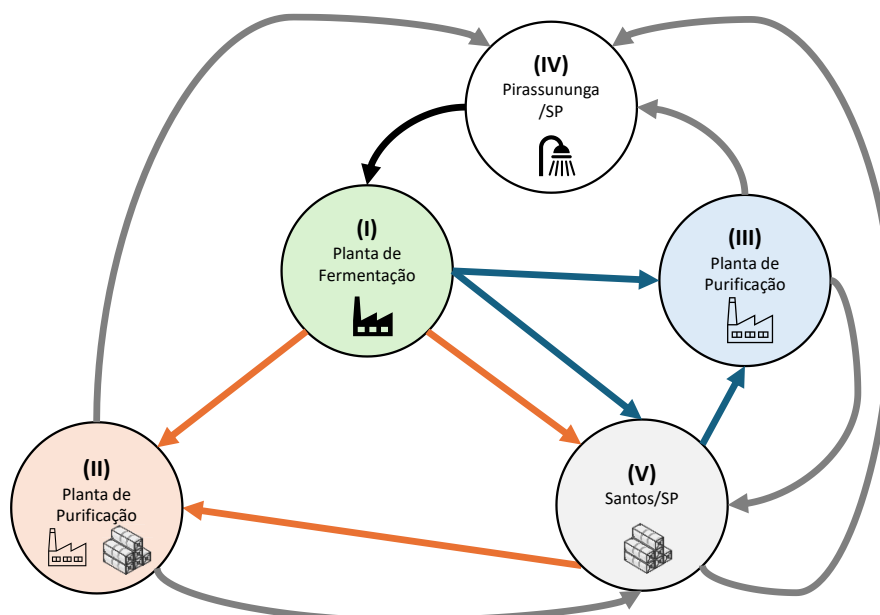
Além das unidades fabris, o estudo de caso inclui a utilização de um local externo para armazenagem das unidades de isotanques que excedem as capacidades de retenção existentes e uma estação de lavagem que garante a limpeza do tanque usado para reutilizá-lo. As localidades dentro do estudo com os respectivos posicionamentos geográficos (Tabela 1). Já a Figura 1 apresenta as possíveis rotas de transportes das unidades de isotanques entre localidades dentro do estudo de caso, bem como o tipo de isotanque transportado.

Tabela 1. Descrição de todas as localidades que foram incluídas no modelo de otimização em redes multiperíodo com as respectivas localizações geográficas e funções dentro da cadeia produtiva

Localidade	Localização Geográfica	Símbolo	Função
(I)	Interior de São Paulo		Produção de Extrato fermentado / Molécula A e Molécula B
(II)	Interior do Paraná		Purificação de Extrato Fermentado / Molécula A
(III)	Interior de São Paulo		Purificação de Extrato Fermentado / Molécula B
(IV)	Pirassununga/SP		Estação de lavagem de isotanques
(V)	Porto de Santos/SP		Armazenamento de isotanques

Fonte: Autores.

Figura 1. Possíveis rotas de transporte de isotanques entre as localidades no estudo de caso. Os círculos na figura representam as localidades e as flechas representam as rotas de transporte de isotanques.



Fonte: Autores.

A produção de extrato fermentado segue um plano de produção pré-definido pela empresa que normalmente planeja um semestre de produção para atender as demandas e minimizar o custo logístico total. Além disso, a unidade fabril no interior de São Paulo (I) possui três linhas de fermentação que possibilita a produção de ambas as moléculas em paralelo ou outras que porventura a empresa tenha demanda.

Os isotanques podem ser transportados entre as 5 localidades e o custo do transporte depende de alguns fatores, cujo maior impactante é a distância entre as localidades. A lavagem do isotanque para posterior carregamento na planta de fermentação é um requisito de qualidade obrigatório, logo é necessário que o isotanque seja lavado em Pirassununga (IV) antes de ser transportado para a fábrica interior de São Paulo (I). O serviço de lavagem do isotanque tem um custo fixo por unidade limpa.

Cada localidade tem a própria capacidade máxima de armazenamento, e estocar isotanques incorre em custos de estoque, para a localidade de Santos/SP (V), custos fixos de operação do pátio de armazenagem no Interior do Paraná (II) ou custos por tempo de espera nas demais localidades uma vez que o isotanque permaneceria em cima do caminhão.

O modelo inclui os custos de transporte, custos de estocagem, custos de lavagem, custos fixos de operação e aluguel dos isotanques tanto no contrato *leasing* quanto no contrato *spot*.

O modelo define as quantidades e tipos de isotanques que devem ser transportados entre as localidades nos diferentes períodos avaliados, visando minimizar o custo total logístico e otimizando a cadeia de produção para atender ao plano de produção da planta de fermentação, pré-definido pela empresa, e a demanda das localidades de purificação.

PREMISSA DO MODELO

Para o modelo proposto foram realizadas as seguintes considerações:

- As localidades e os custos de transporte entre eles são conhecidos, bem como as rotas possíveis. As demais rotas, que não foram incluídas no estudo, não são praticadas na empresa e terão um custo suficientemente grande;
- As quantidades de unidades de isotanques a serem transportadas bem como o tipo dos isotanques são decisões do modelo;
- O plano de produção da fábrica de fermentação é conhecido e pré-definido pela empresa. A produção na fábrica de fermentação no interior de SP (I) é considerada como positiva (produzindo isotanques);
- Isotankes que são carregados com extrato das moléculas A e B na fábrica de fermentação consomem isotankes vazios;
- A demanda das fábricas de purificação de extrato fermentado é conhecida e pré-definido pela empresa. A produção nas localidades de purificação é considerada como negativa (consumindo isotankes);
- Para todas as demais localidades que não são de produção, o plano de produção foi considerado zero para todos os tipos de produtos dentro do período avaliado;
- Isotankes cheios com extrato das moléculas A e B são consumidos nas respectivas unidades de purificação e geram isotankes vazios;
- Ao final do período, todos os isotankes gerados na fábrica de fermentação deverão ser consumidos nas fábricas de purificação;
- A capacidade de armazenagem de cada uma das localidades é conhecida. Para as localidades sem armazém, uma capacidade relativamente pequena de armazenagem será considerada para permitir o “trânsito” de isotankes;
- O número de unidades de isotankes disponíveis está limitado pelo contrato de aluguel de longa duração, *leasing*. Se o número não for suficiente para atender o plano de produção, existe um número “infinito” de isotankes vazios e sujos armazenados em Santos/SP. Se usados, incorreram custos diários de locação conforme o uso dentro do contrato de curta duração, *spot*. Além disso, se o modelo encontrar uma solução mínima de custo utilizando isotankes *spot* ao invés de *leasing*, a solução será considerada como válida;
- Todos os isotankes vazios precisam passar pela estação de lavagem de isotankes como requisito de qualidade;
- Todos os estoques iniciais e finais de isotankes são conhecidos, sendo que todos os isotankes do contrato de *leasing* ficam armazenados no interior do Paraná (II) no início e fim do período, o estoque de isotankes vazios em Santos/SP do contrato *spot* é um número suficientemente grande no início e fim do período, já as demais localidades não devem possuir estoque no início e fim do período.

MODELO MATEMÁTICO

O problema de gerenciamento da cadeia de suprimentos pode ser formulado como um problema de otimização de redes multiperíodo com balanço de estoque. Para a formulação matemática do problema foram considerados os índices e conjuntos (Tabela 2). Os parâmetros usados como dados de entrada no modelo estão na Tabela 3 e as variáveis de decisão que serão encontradas pelo modelo estão na Tabela 4.

Tabela 2. Lista dos índices com as respectivas descrições e dos conjuntos com a relação do que representa cada um dos valores dentro dos conjuntos

Índice	Descrição	Conjunto
i	Localidade de Origem	$i \in I = \{1,2,3,4,5,6\}$ Onde: 1 – Planta de Fermentação SP – Unidade produtora (Geração) 2 – Planta de Purificação PR – Unidade produtora (Consumo) 3 – Planta de Purificação SP – Unidade produtora (Consumo) 4 – Pirassununga/SP – Estação de Lavagem (Sujo) 5 – Pirassununga/SP – Estação de Lavagem (Limpo) 6 – Santos/SP
j	Localidade de Destino	$j \in J = \{1,2,3,4,5,6\}$ Onde: 1 – Planta de Fermentação SP – Unidade produtora (Geração) 2 – Planta de Purificação PR – Unidade produtora (Consumo) 3 – Planta de Purificação SP – Unidade produtora (Consumo) 4 – Pirassununga/SP – Estação de Lavagem (Sujo) 5 – Pirassununga/SP – Estação de Lavagem (Limpo) 6 – Santos/SP
k	Tipo do Isotankue	$k \in K = \{1,2,3\}$ Onde: 1 – Isotankue cheio com a molécula A 2 – Isotankue cheio com a molécula B 3 – Isotankue vazio
t	Período de Produção em dias	$t \in P = \{0,1,2,\dots,p\}$ Onde: <p>p – Período total de campanha</p>

Fonte: Autores.

Note que para fins de modelagem e simulação a estação de lavagem foi dividida em duas localidades distintas mesmo que ocupem a mesma localização geográfica. Isso permite a correta alocação do custo de lavagem dentro do modelo. Note também que não existe distinção entre os isotankues vazios e sujos e isotankues vazios e limpos, isso acontece pois fica-se subentendido que todos os isotankues que passam pela estação de lavagem são limpos.

Tabela 3. Lista dos parâmetros de entrada do modelo com as respectivas descrições

Parâmetros	Descrição
PR_{ikt}	Plano de produção na localidade i , do produto k , no período t . Os valores serão positivos quando houver geração e negativos quando houver consumo
p	Período da campanha em dias
CT_{ij}	Custo de transporte entre as localidades i e j
CF_i	Custo fixo de operação diário na localidade i
W_i	Capacidade máxima de armazenamento na localidade i
LCN	Número de isotankues no contrato de <i>leasing</i>
CAL_t	Custo de aluguel diário no contrato de <i>leasing</i>
CAS_t	Custo de aluguel diário no contrato <i>spot</i>
M	Número suficientemente grande
N	Custo suficientemente grande

Fonte: Autores.

Tabela 4. Lista das variáveis de decisão que serão encontradas pelo modelo com as respectivas descrições

Variáveis de Decisão	Descrição
X_{ijkt}	Quantidade de isotankues transportados da localidade i para j , tipo k , no período t
I_{ikt}	Estoque na localidade i , isotankue k , no período t

Fonte: Autores.

A função objetivo para ser minimizada dentro do modelo matemático proposto de redes multiperíodo com balanço de estoque é apresentada na Eq. (1).

Função Objetivo:

$$\begin{aligned}
 FO = \min Z = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^P CT_{ij} X_{ijkt} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^P CE_i I_{ikt} - \sum_{t=0}^P CE_6 I_{63t} \\
 & + \sum_{i=1}^I CF_i p + \sum_{t=0}^P CAL_t LCN \\
 & + \sum_{t=0}^P CAS_t \left[\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{t=0}^P I_{ikt} - \sum_{t=0}^P I_{63t} \right) - LCN \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

A função objetivo visa minimizar os custos totais logísticos que incluem os custos com transporte, custos de estocagem, custos fixos de operação dos armazéns, custos de aluguel dos isotanques de *leasing* e custos de aluguel dos isotanques *spot*.

Para calcular o custo do transporte da localidade de origem para a localidade de destino, multiplica-se a quantidade de isotanques transportados em cada período pelo custo do transporte daquela rota. Para calcular o custo de estocagem em cada uma das localidades, multiplica-se a quantidade de isotanques armazenados nas unidades em cada período pelo custo de estocagem naquela localidade. Note que o custo de estocagem no armazém externo, Santos/SP, foi subtraído para todos os isotanques do tipo vazio indicando que o modelo não contabiliza o custo de armazenagem do isotanque quando ele está em posse do locador. Para calcular o custo fixo de operação dos armazéns, multiplica-se o custo fixo diário de todas as localidades pelo período total. Para calcular o custo do aluguel dos isotanques de *leasing*, multiplica-se o custo unitário de aluguel do isotanque *leasing* pelo número de isotanques dentro do contrato de longa duração. Por fim, para calcular o custo do aluguel dos isotanques *spot*, primeiramente verifica-se quantos isotanques estão armazenados em todas as localidades, subtrai-se deste número os isotanques vazios armazenados em Santos/SP, considerando que estes estão em posse do locador, e subtrai-se o número de isotanques dentro do contrato de leasing em todos os períodos, como resultado obtém-se o número de isotanques *spot* que por fim é multiplicado pelo custo unitário de aluguel dos isotanques *spot*.

Vale ressaltar que embora o termo *LCN* represente um constante na formulação da função objetivo, sua presença foi intencionalmente mantida para garantir a clareza e a transparência na leitura e interpretação dos resultados. A inclusão explícita desse termo permite que o tomador de decisão visualize o custo total logístico real da operação ao resolver o modelo, o que é essencial para fins gerenciais e de tomada de decisão estratégica. Assim, embora o *LCN* não afete a busca pela solução ótima, ele contribui significativamente para a compreensão do valor absoluto das soluções propostas pelo modelo.

Sujeito as seguintes restrições:

$$I_{ikt} = I_{ik(t-1)} + \sum_{j=1}^J X_{jikt} - \sum_{j=1}^J X_{ijkt} + PR_{ikt} \quad \forall k, t, i \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K I_{ikt} \leq W_i \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^2 PR_{1kt} \leq I_{13(t-1)} \quad \forall t \quad (4)$$

$$PR_{21t} + I_{21(t-1)} \geq 0 \quad \forall t \quad (5)$$

$$PR_{32t} + I_{32(t-1)} \geq 0 \quad \forall t \quad (6)$$

$$X_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (7)$$

$$I_{ikt} \geq 0 \quad \forall i, k, t \quad (8)$$

$$I_{(2,3,0)} = LCN \quad (9)$$

$$I_{(6,3,0)} = M \quad (10)$$

$$I_{ik0} = 0 \quad \forall (i, k) \neq \{(2,3); (6,3)\} \quad (11)$$

$$I_{(2,3,p)} = LCN \quad (12)$$

$$I_{(6,3,p)} = M \quad (13)$$

$$I_{ik(p)} = 0 \quad \forall (i, k) \neq \{(2,3); (6,3)\} \quad (14)$$

$$I_{(2,2)t} = 0 \quad \forall t \quad (15)$$

$$I_{(3,1)t} = 0 \quad \forall t \quad (16)$$

$$I_{ikt} = 0 \quad \forall i = 4e5, k = 1e2, t \quad (17)$$

$$X_{ijkt} \in \mathbb{Z} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (18)$$

$$I_{ikt} \in \mathbb{Z} \geq 0 \quad \forall i, k, t \quad (19)$$

A restrição (2) garante o equilíbrio de estoque para todas as localidades durante determinado período. Esse valor é obtido pela adição do número de isotanques que a localidade recebeu de todas as origens no período atual com o estoque do período anterior dessa localidade, subtraindo o número de isotanques que foram enviados dessa localidade para outras localidades no período atual somado ao número de isotanques gerados ou consumidos de acordo com o plano de produção no período atual. Note que gerações dentro do plano de produção serão valores positivos e consumos dentro do plano de produção serão valores negativos.

A restrição (3) refere-se à capacidade de armazenagem e garante que o estoque total em todas as localidades não exceda a capacidade máxima de armazenamento de cada localidade em qualquer período.

A restrição (4) assegura que o consumo de isotanques na Localidade 1 não exceda o estoque de isotanques vazios do período anterior. Já a restrição (5) garante que o estoque de isotanques cheios com a molécula A na Localidade 2, somado ao estoque do período anterior, seja sempre maior ou igual a zero assegurando atendimento ao plano de produção pré-definido. De forma semelhante, a restrição (6) garante que o estoque de isotanques cheios com a molécula B na Localidade 3, somado ao estoque do período anterior, seja sempre maior ou igual a zero assegurando atendimento ao plano de produção pré-definido.

As restrições (7) e (8) de não-negatividade garantem que todos os volumes transportados entre localidades, bem como os estoques de todas as localidades, sejam sempre maiores ou iguais a zero.

As condições iniciais são garantidas pelas restrições (9), (10) e (11), e especificam que todos os isotanques vazios do contrato de leasing estejam armazenados na Localidade 2 no período inicial, existe um estoque “infinito”, igual a M , de isotanques vazios na Localidade 6, referentes aos isotanques de contrato *spot*, no período inicial e todas as demais localidades não possuam estoque no período inicial.

As condições finais são garantidas pelas restrições (12), (13) e (14), e determinam que todos os isotanques vazios e sujos do contrato de leasing estejam armazenados na Localidade 2 no período final, existe um estoque “infinito”, igual a M , de isotanques vazios e sujos na Localidade 6, referentes aos isotanques de contrato *spot*, e todas as demais localidades não possuam estoque no período final. Para fins de otimização o valor M pode ser calculado como:

$$\sum_{k=1}^2 \sum_{t=0}^P PR_{1kt} \quad (18)$$

As restrições (15), (16) e (17) determinam que não pode haver armazenagem de isotanques cheios com extrato da molécula B na localidade 2 (Planta de purificação no Paraná), não pode haver armazenagem de isotanques cheios com extrato da molécula A na localidade 3 (Planta de purificação no interior de SP) e não pode haver armazenamento de isotanques cheios de ambas as moléculas na localidade Pirassununga/SP, respectivamente.

Por fim, as restrições (18) e (19) garantem que as variáveis de decisão assumam apenas valores inteiros positivos, uma vez que isotanques são unidades indivisíveis e não faz sentido considerar frações de unidades.

COLETA DE DADOS

Para o desenvolvimento do estudo foram coletados dados reais da empresa objeto do estudo de caso.

A Tabela 5 apresenta os custos de transporte entre as localidades, com as origens dispostas horizontalmente e os destinos verticalmente. Para representar rotas inexistentes ou inviáveis, foi atribuído um custo artificialmente elevado (denotado por N), de forma a desencorajar sua seleção pelo modelo de otimização. Embora essas rotas ainda sejam consideradas na formulação matemática, o valor elevado de N garante que elas só sejam escolhidas em situações excepcionais, como em casos de inviabilidade das demais rotas.

A Tabela 6 apresenta a capacidade máxima de armazenagem, o custo de estocagem e o custo fixo de operação do armazém para as diferentes localidades consideradas no modelo. Para a localidade 6, correspondente ao armazém externo localizado no porto de Santos/SP, foi atribuído um valor elevado, denotado por M , como capacidade máxima de armazenagem. Esse valor foi definido como a soma total de isotanques gerados no plano de produção (18), garantindo que, em um cenário extremo, toda a produção pudesse ser armazenada nessa localidade sem restrições de capacidade. Essa abordagem assegura que a capacidade do armazém externo não limite artificialmente a solução do modelo.

Tabela 5. Custo de transporte entre as localidades dentro do modelo de redes

i	j	Destinos (j)					
		1	2	3	4	5	6
Origens (i)	1	N	R\$ 6.230	R\$ 2.858	N	N	R\$ 4.500
	2	N	N	R\$ 2.972	R\$ 6.700	N	R\$ 8.860
	3	N	R\$ 2.972	N	R\$ 2.149	N	R\$ 3.261
	4	N	N	N	N	R\$ 1.125*	N
	5	R\$ 2.400	N	N	N	N	N
	6	N	R\$ 8.860	R\$ 3.261	R\$ 4.364	N	N

*O custo apresentado é na realidade o custo de lavagem do isotanque que foi inserido dessa forma para simplificação do modelo. Fonte: Coleta de dados.

Tabela 6. Capacidade máxima de armazenagem e custos operacionais para as localidades

Localidade (i)	Capacidade máxima de armazenagem (W_i) (Unidades de Isotanques)	Custo de estocagem (CE_i) (R\$/dia)	Custo fixo (CF_i) (R\$/dia)
1	10	R\$ 1.080	R\$ 0
2	180	R\$ 0	R\$ 4.346
3	10	R\$ 1.080	R\$ 0
4	10	R\$ 1.080	R\$ 0
5	10	R\$ 1.080	R\$ 0
6	M	R\$ 60	R\$ 0

Fonte: Coleta de dados.

Além disso, o período total considerado foi de $p = 180$, o custo diário do aluguel de leasing foi considerado como $CAL = R\$50$ e custo diário com o aluguel *spot* foi considerado como $CAS = R\$175$.

Para o estudo, foram criadas 5 possibilidades de plano de produção. Isso foi possível pois a empresa forneceu os dados de geração isotanques e consumo de isotanques diários para cada unidade fabril. O plano de produção 1 considera produção de 1 mês de fermentação de cada molécula, o plano de produção 2 considera 2 meses de fermentação de cada molécula, e assim por diante até o plano 5, que considera 5 meses de fermentação de cada molécula. A ocupação da fábrica no período é de aproximadamente 26%, 47%, 68%, 89% e 100% para os planos de produção 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. O tempo ocioso pode ser ocupado por outras moléculas que a empresa também tem capacidade de produzir, devido a flexibilidade que as três linhas de fermentação possibilitam. A Tabela 7 traz em detalhes cada um dos planos de produção que foram propostos.

Tabela 7. Planos de produção propostos para o modelo com as informações de geração e consumo de isotanques totais e diários para cada uma das moléculas além da ocupação dentro do período $p = 180$ dias

Plano de Produção	Geração de Isotantes Total (Diário)	Consumo de Isotantes Total (Diário)	Ocupação do período ($p = 180$ dias) com o plano de produção					
			Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6
Plano 1	Molécula A	96 (3,2)	41 dias					
	Molécula B	78 (2,6)				51 dias		
Plano 2	Molécula A	192 (3,2)	76 dias					
	Molécula B	156 (2,6)				93 dias		
Plano 3	Molécula A	288 (3,2)	108 dias					
	Molécula B	234 (2,6)				137 dias		
Plano 4	Molécula A	384 (3,2)	142 dias					
	Molécula B	312 (2,6)				180 dias		
Plano 5	Molécula A	480 (3,2)	180 dias					
	Molécula B	312 (2,6)				180 dias		

Fonte: Autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CENÁRIO PADRÃO (PRÁTICA DE EMPRESA)

A partir dos dados coletados e do modelo proposto, simulações foram conduzidas para encontrar o custo logístico mínimo da função objetivo. Foram considerados 25 planos de operação, cujos resultados foram comparados à prática atual da empresa, que consiste em um contrato de leasing de 150 isotanques, complementado por aluguel spot quando há necessidade adicional. Para todas as condições testadas, o modelo foi resolvido em menos de 2 segundos, com soluções apresentando gap de 0,0% em relação à solução ótima. As simulações foram implementadas em Python utilizando o solver OR-Tools com o pacote “CBC – Coin-or Branch and Cut”, rodando em um computador com 8 GB de memória RAM, processador Intel Core i5 e sistema operacional Windows 10. Cada instância simulada envolveu mais de 22.000 variáveis de decisão e aproximadamente 29.000 restrições.

Além dos distintos planos de produção testados, o número de isotanques dentro do contrato de aluguel, *LCN*, também foi avaliado como variável. Testou-se os valores para *LCN*: 0 (Sem aluguel de isotanques do tipo *leasing* e apenas isotanques do tipo *spot*), 50, 100, 150 (Prática atual da empresa) e 180 (Máxima capacidade de armazenamento na fábrica do Paraná). E os resultados para as 25 simulações realizadas para o problema encontram-se na Tabela 8 e 9 e para entendimento, chama-se as condições usadas para estas simulações de “Padrão”.

Tabela 8. Custo logístico total em milhões de reais

Número de Isotantes do contrato de <i>leasing</i> (<i>LCN</i>)	Custo logístico total mínimo para cada uma das simulações em milhões de reais (MR\$)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	3,92	7,03	10,49	14,19	16,06
50	4,02	6,90	10,11	13,41	14,99
100	4,47	7,35	10,56	13,77	15,22
150	4,92	7,80	11,01	14,22	15,67
180	5,19	8,07	11,28	14,49	15,94

Fonte: Autores.

Tabela 9. Custo logístico por cada isotanque gerado durante campanha das moléculas A e B - milhares de reais

Número de Isotanches do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações em milhares de reais (kR\$)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	22,52	20,20	20,09	20,39	20,28
50	23,12	19,83	19,38	19,27	18,93
100	25,71	21,13	20,24	19,78	19,22
150	28,30	22,42	21,10	20,43	19,79
180	29,85	23,20	21,61	20,81	20,13

Fonte: Autores.

A Tabela 8 expõe resultados para as 25 simulações da condição padrão do custo logístico mínimo encontrado na resolução do modelo. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanches dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam custos totais mais baixos e em vermelho, custos totais mais altos.

É possível observar que o custo mínimo total aumenta conforme o plano de produção aumenta a quantidade total de Isotanches gerados, sendo que os menores custos logísticos totais são verificados no Plano 1 e os maiores no Plano 5. Com relação ao número de Isotanches do contrato de *leasing*, é possível observar que o menor custo logístico ótimo encontrado foi para $LCN = 50$ para todos os planos de produção, exceto para o Plano 1. Isso evidencia que a prática atual da empresa não é a mais vantajosa em termos de custo. Além disso, é possível observar que o maior custo logístico mínimo encontrado foi para $LCN = 180$ para todos os planos de produção, exceto para o Plano 5.

Já a tabela 9 apresenta resultados para as 25 simulações da condição padrão do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanches dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam custos unitários mais baixos e em vermelho, custos unitários mais altos.

Em relação ao custo logístico unitário para o cenário padrão, é possível observar que existe uma tendência de redução do custo unitário conforme o plano de produção aumenta a quantidade total de isotanches produzidos, exceto para a condição $LCN = 0$. Além disso, os menores valores são obtidos para $LCN = 50$ para todos os planos de produção, exceto para o Plano 1. Isso evidencia, que unicamente do ponto de vista de custo unitário, a prática atual da empresa ($LCN = 150$) é menos vantajosa que as condições de $LCN = 50$ e 100 para todos os planos de produção.

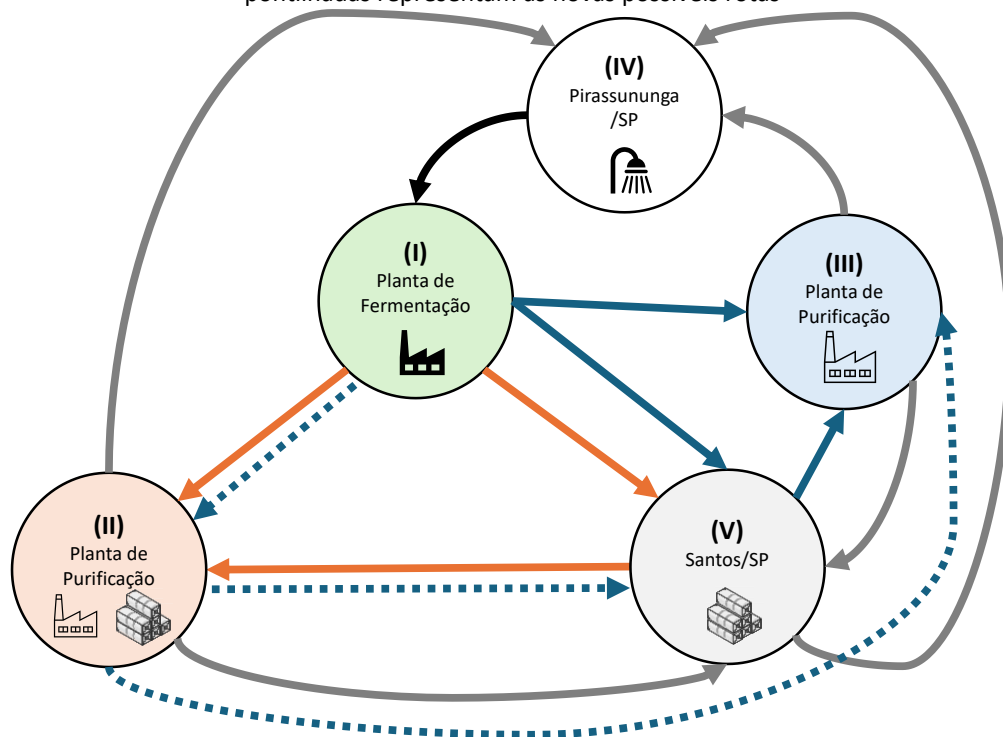
Avaliando os dados da solução do problema, pôde-se observar que por mais que houvesse isotanches do contrato *leasing* disponíveis vazios no pátio de armazenamento no interior do Paraná, a solução ótima de custo mínimo utilizou isotanches *spot* para transportar isotanches e atender a produção da molécula B. Isso aconteceu com maior evidência para os planos de produção com menor produção total e conforme esta produção aumentou, passou-se a utilizar alguns isotanches do tipo *leasing*. Essa solução foi encontrada pois o pátio de armazenamento em no Paraná não pode receber isotanches com a molécula B por não ter a sua atividade econômica (CNAE) classificada como armazenamento, o que torna mais

vantajoso do ponto de vista de custo, a utilização do armazém externo para atender a produção da molécula B por estar geograficamente mais bem localizado que o armazém do Paraná para armazenamentos do isotanques vazios.

CENÁRIO 1

A fim de avaliar se é possível diminuir o custo logístico total e unitário mínimo, retirando a restrição de que o armazém do Paraná não pode receber isotanques cheios com extrato de molécula B, Equação (15), o cenário 1 foi proposto. A Figura 2 representa a retirada da restrição com a adição das novas possíveis rotas.

Figura 2. Possíveis rotas de transporte de isotanques entre as localidades no cenário 1. Os círculos na figura representam as localidades e as flechas representam as rotas de transporte de isotanques. As flechas pontilhadas representam as novas possíveis rotas



Fonte: Autores.

Novas simulações foram conduzidas e os 25 resultados para o problema dentro das condições do cenário 1 podem ser encontrados na Tabela 10 e na Tabela 11.

A tabela 10 mostra os resultados para as 25 simulações da condição referente ao cenário 1 do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam custos unitários mais baixos e em vermelho, custos unitários mais altos.

Tabela 10. Custo logístico por cada isotanque gerado durante a campanha das moléculas A e B em milhares de reais no cenário 1

Número de Isotâques do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 1 em milhares de reais (KR\$)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	22,38	19,91	19,60	19,77	19,74
50	22,19	18,29	18,10	18,40	18,22
100	24,77	19,58	17,92	17,62	17,30
150	27,36	20,87	18,78	17,66	17,08
180	28,91	21,64	19,30	18,04	17,35

Fonte: Autores.

Em relação ao custo logístico unitário para o cenário 1, é possível observar que existe uma tendência de redução do custo unitário conforme o plano de produção aumenta a quantidade total de isotanques produzidos. Além disso, os menores valores obtidos dentro de cada um dos planos não são encontrados para o mesmo valor de LCN , variando de $LCN = 50$ para o Plano 1 até $LCN = 150$ para o plano 5. Isso evidencia, que unicamente do ponto de vista de custo unitário para o cenário 1, a escolha ótima do número de isotanques dentro do contrato de *leasing* vai variar conforme o aumento do número de isotanques produzidos na campanha. Já a tabela 11 mostra a comparação para as 25 simulações da condição referente ao cenário 1 do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo em comparação com o cenário padrão. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam diferenças negativas e maiores e em amarelo, diferenças negativas e menores.

Tabela 11. Diferença entre custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 1 em comparação com o padrão

Número de Isotanches do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Diferença entre custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 1 em comparação com o padrão (%)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	-0,6%	-1,5%	-2,5%	-3,0%	-2,7%
50	-4,1%	-7,8%	-6,6%	-4,5%	-3,8%
100	-3,6%	-7,3%	-11,4%	-10,9%	-10,0%
150	-3,3%	-6,9%	-11,0%	-13,5%	-13,7%
180	-3,1%	-6,7%	-10,7%	-13,3%	-13,8%

Fonte: Autores.

Baseado nos resultados apresentados na tabela 11, é possível reduzir o custo unitário logístico dos isotanques entre 0,6% e 13,8% se a restrição de recebimento de isotanques cheios com extrato da molécula B na planta de purificação do Paraná for retirada. A diferença dos custos logísticos unitários entre o cenário padrão e cenário 1 aumenta conforme o plano de produção aumenta a quantidade de isotanques produzidos. Vale ressaltar que não foi considerado nenhum tipo de taxa de estocagem na localidade 2.

CENÁRIO 2

O cenário 2 foi proposto a fim de avaliar o impacto no custo logístico caso decida-se instalar um pátio de armazenamento de isotanques na localidade 1 que é a planta de fermentação que gera os isotanques cheios com as moléculas A e B. Para tanto, além das alterações apresentadas no Cenário 1, as seguintes alterações foram feitas nos parâmetros de entrada: $W_1 = 10 \rightarrow 180$ (Mesma capacidade de W_2), $CE_1 = R\$1080 \rightarrow R\0 (Mesmo custo de estocagem de CE_2) e $CF_1 = R\$0 \rightarrow R\4346 (Mesmo custo fixo de CF_2).

Novas simulações foram conduzidas e os 25 resultados para o problema dentro das condições do cenário 2 podem ser encontrados na Tabela 12, na Tabela 13 e na Tabela 14 (Tempo de retorno do investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na Localidade 1 em meses para o cenário 2).

A tabela 12 mostra os resultados para as 25 simulações da condição referente ao cenário 2 do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de

leasing na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam custos unitários mais baixos e em vermelho, custos unitários mais altos.

Tabela 12. Custo logístico por cada isotanque gerado durante a campanha das moléculas A e B em milhares de reais no cenário 2

Número de Isotanches do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 2 em milhares de reais (kR\$)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	25,24	20,67	19,62	19,47	19,34
50	25,03	19,05	18,12	18,10	17,82
100	27,62	20,33	17,94	17,32	16,91
150	30,21	21,63	18,80	17,36	16,68
180	31,76	22,40	19,32	17,73	16,95

Fonte: Autores.

Em relação ao custo logístico unitário para o cenário 2, é possível observar que existe, assim como nos resultados do cenário 1, uma tendência de redução do custo unitário conforme o plano de produção aumenta a quantidade total de isotanches produzidos. Além disso, os menores valores obtidos dentro de cada um dos planos não são encontrados para o mesmo valor de *LCN*, variando de *LCN* = 50 para o Plano 1 até *LCN* = 150 para o plano 5. Isso evidência, que unicamente do ponto de vista de custo unitário para o cenário 2, a escolha ótima do número de isotanches dentro do contrato de *leasing* vai variar conforme o aumento do número de isotanches produzidos na campanha.

Na tabela 13 é possível observar a Comparação para as 25 simulações da condição referente ao cenário 2 do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo em comparação com o cenário padrão. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanches dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam diferenças negativas e em vermelho, diferenças positivas.

Tabela 13. Diferença entre custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 2 em comparação com o padrão

Número de Isotanches do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Diferença entre custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 2 em comparação com o padrão (%)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	+12,1%	+2,3%	-2,3%	-4,5%	-4,6%
50	+8,3%	-4,0%	-6,5%	-6,0%	-5,9%
100	+7,4%	-3,8%	-11,3%	-12,4%	-12,0%
150	+6,8%	-3,5%	-10,9%	-15,0%	-15,7%
180	+6,4%	-3,4%	-10,6%	-14,8%	-15,8%

Fonte: Autores.

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 13, nem todas as condições dentro do cenário 2 reduzem o custo unitário em relação ao cenário padrão. As diferenças variam entre +12,1% e -15,8%, sendo que planos de produção com menor produção total de isotanches (Plano 1) tendem a aumentar o custo do cenário 2 em relação ao padrão e planos de produção com maior produção total de isotanches (Plano 5) tendem a diminuir o custo do cenário 2 em relação ao padrão. Isso acontece, pois a instalação de um novo armazém, apesar de reduzir custos com transporte e estocagem, aumenta o custo fixo da operação do armazém fazendo com que produções menores não compensem o aumento do custo fixo.

A tabela 14 apresenta o tempo de retorno de investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na planta de fermentação, em meses, para as 25 simulações da condição referente ao cenário 2 em meses. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam os menores tempos e em vermelho, maiores tempos.

Tabela 14. Tempo de retorno do investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na planta de fermentação em meses para o cenário 2

Número de Isotâques do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Tempo de retorno do investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na planta de fermentação, em meses, para o cenário 2				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	-	-	122	47	40
50	-	110	46	37	34
100	-	109	25	18	16
150	-	109	25	14	12
180	-	109	25	14	12

Fonte: Autores.

É possível observar que o tempo de retorno do investimento para as diferentes simulações dentro do cenário 2 varia entre 12 e 122 meses. Para algumas condições, não há tempo de retorno pois o custo logístico unitário para o cenário 2 ficou maior que o cenário padrão.

CENÁRIO 3

O cenário 3 foi proposto a fim de avaliar o impacto no custo logístico caso decida-se, além de instalar um pátio de armazenamento de isotanques na localidade 1 (Cenário 2), pelo fechamento das operações no pátio de armazenamento na localidade 2. Para tanto, além das alterações apresentadas no Cenário 1 e 2, as seguintes alterações foram feitas nos parâmetros de entrada: $W_2 = 180 \rightarrow 10$ (Mesma capacidade de W_1 no cenário padrão), $CE_2 = R\$0 \rightarrow R\1080 (Mesmo custo de estocagem de CE_1 no cenário padrão) e $CF_2 = R\$4346 \rightarrow R\0 (Mesmo custo fixo de CF_1 no cenário padrão).

Novas simulações foram conduzidas e os 25 resultados para o problema dentro das condições do cenário 3 podem ser encontrados na Tabela 15, na Tabela 16 e na Tabela 17.

A tabela 15 apresenta os resultados para as 25 simulações da condição referente ao cenário 3 do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam custos unitários mais baixos e em vermelho, custos unitários mais altos

Tabela 15. Custo logístico por cada isotanque gerado durante a campanha das moléculas A e B em milhares de reais no cenário 3

Número de Isotâques do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 3 em milhares de reais (kR\$)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	21,34	19,02	18,72	18,94	19,01
50	19,97	16,54	16,65	17,23	17,44
100	22,56	17,73	16,11	16,28	16,38
150	25,15	19,02	16,98	16,04	16,00
180	26,70	19,79	17,49	16,34	16,25

Fonte: Autores.

Em relação ao custo logístico unitário para o cenário 3, é possível observar que existe, assim como nos resultados do cenário 1 e 2, uma tendência de redução do custo unitário conforme o plano de produção aumenta a quantidade total de isotanques produzidos. Além disso, os menores valores obtidos dentro de cada um dos planos não são encontrados para o mesmo valor de *LCN*, variando de *LCN* = 50 para o Plano 1 até *LCN* = 150 para o plano 5. Isso evidencia, que unicamente do ponto de vista de custo unitário para o cenário 3, a escolha ótima do número de isotanques dentro do contrato de *leasing* vai variar conforme o aumento do número de isotanques produzidos na campanha.

Além disso, para todas as condições propostas dentro do cenário 3 o custo logístico unitário foi menor que as mesmas condições dentro do cenário 2. Isso evidencia, que do ponto de vista unicamente de custo logístico, o cenário 3 é mais barato que o cenário 2 para as mesmas condições. Vale ressaltar que a disponibilidade de dois armazéns próprios aumentaria muito a flexibilidade da cadeia logística dos isotanques o que poderia justificar o incremento de custos no cenário 2 em relação ao cenário 3.

A tabela 16 nos mostra a comparação para as 25 simulações da condição referente ao cenário 3 do custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado encontrado na resolução do modelo em comparação com o cenário padrão. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam diferenças negativas e em vermelho, diferenças positivas.

Tabela 16. Diferença entre custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 3 em comparação com o padrão

Número de Isotanches do contrato de <i>leasing</i> (<i>LCN</i>)	Diferença entre custo logístico mínimo por unidade de isotanque gerado para cada uma das simulações do cenário 3 em comparação com o padrão (%)				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	-5,2%	-5,9%	-6,8%	-7,1%	-6,3%
50	-13,6%	-16,6%	-14,1%	-10,5%	-7,9%
100	-12,2%	-16,1%	-20,4%	-17,7%	-14,8%
150	-11,1%	-15,2%	-19,5%	-21,5%	-19,2%
180	-10,6%	-14,7%	-19,1%	-21,5%	-19,3%

Fonte: Autores.

Baseado nos resultados apresentados na Tabela 16, todas as condições dentro do cenário 3 reduzem o custo unitário em relação ao cenário padrão. As diferenças variam entre -5,2% e -21,5%, sendo que planos de produção com menor produção total de isotanques (Plano 1) possuem as menores diferenças de custo em relação ao padrão e planos de produção com maior produção total de isotanques (Plano 4 e 5) possuem as maiores diferenças de custo em relação ao padrão.

Por fim, a Tabela 17 exhibe o tempo de retorno de investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na planta de fermentação para as 25 simulações da condição referente ao cenário 3 em meses. Os resultados estão dispostos em diferentes valores de isotanques dentro do contrato de *leasing* na vertical e diferentes planos de produção na horizontal. Valores em verde indicam os menores tempos e em vermelho, maiores tempos

Tabela 17. Tempo de retorno do investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na planta de fermentação em meses para o cenário 3

Número de Isotankers do contrato de <i>leasing</i> (LCN)	Tempo de retorno do investimento de 5 MR\$ para a construção de um pátio de armazenagem na planta de fermentação em meses para o cenário 3				
	Plano 1	Plano 2	Plano 3	Plano 4	Plano 5
0	147	73	42	30	30
50	55	26	21	21	25
100	55	25	14	12	13
150	55	25	14	10	10
180	55	25	14	10	10

Fonte: Autores.

É possível observar que o tempo de retorno do investimento para as diferentes simulações dentro do cenário 3 varia entre 10 e 147 meses.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se um modelo de otimização para a gestão logística do transporte de isotankers em uma empresa multinacional de biotecnologia. O modelo proposto integra técnicas de pesquisa operacional em um contexto multiperíodo, visando minimizar custos e melhorar a eficiência da cadeia de suprimentos.

Os resultados reais da empresa validaram a aplicabilidade do modelo proposto, evidenciando melhorias potenciais nos custos operacionais e na responsividade da cadeia de suprimentos. Tais achados estão em consonância com a literatura recente, como o estudo de Almeida *et al.* (2021), que demonstra ganhos superiores a 15% na margem de contribuição em cadeias industriais integradas mediante o uso de modelos estocásticos para planejamento tático multiperíodo. Da mesma forma, Faria *et al.* (2024) aplicaram uma abordagem de simulação-otimização em operações intermodais no agronegócio, evidenciando benefícios financeiros e ambientais concretos a partir da alocação eficiente de recursos logísticos em múltiplos períodos. Esses estudos reforçam que o uso de modelos baseados em programação matemática, ajustados às especificidades do setor analisado, contribui não apenas para a redução de custos, mas também para o aumento da sustentabilidade e da coordenação operacional. Assim, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento ao demonstrar, por meio de um caso empírico no setor de biotecnologia, que abordagens quantitativas de otimização logística são não apenas viáveis, mas também alinhadas às melhores práticas científicas consolidadas na literatura internacional.

No entanto, é importante reconhecer que o modelo proposto pode beneficiar-se de futuras investigações que considerem o plano de produção como uma variável de decisão endógena, a adição de novas localidades não previstas no estudo, bem como a inclusão de fatores sazonais que influenciam na demanda e na disponibilidade de recursos logísticos. Essas direções estão em consonância com tendências observadas na literatura recente. Por exemplo, Condé *et al.* (2025) propõem um modelo multiobjetivo e multiperíodo que integra não apenas fatores econômicos, também sociais e ambientais, considerando múltiplos modais e localizações industriais em um planejamento estratégico nacional para a cadeia do aço.

De forma similar, Faria *et al.* (2024) adotam uma abordagem de simulação-otimização para o planejamento intermodal da logística de exportação de grãos no Brasil, incorporando incertezas operacionais e forte sazonalidade no transporte ferroviário, o que demonstra a relevância de incluir a variabilidade temporal e fatores operacionais reais nas decisões

logísticas. Esses achados confirmam que a ampliação do modelo proposto neste trabalho com inclusão de variáveis sazonais, expansão geográfica e indicadores de sustentabilidade está plenamente alinhada às demandas atuais da ciência e às melhores práticas de pesquisa em otimização de cadeias de suprimentos sustentáveis.

Em suma, este trabalho não apenas oferece uma solução para os desafios logísticos enfrentados pela empresa de biotecnologia estudada, mas também estabelece uma base para pesquisas futuras que visem aprimorar ainda mais a eficiência e a sustentabilidade das operações logísticas na indústria de biotecnologia.

REFERÊNCIAS

- Aguilar, A., Twardowski, T., & Wohlgemuth, R. (2019). Bioeconomy for sustainable development. *Biotechnology Journal*, 14(8), 1800638. <https://doi.org/10.1002/biot.201800638​>
- Almeida, J. F. D. F., & Conceição, S. V. (2021). A decomposition approach for the two-stage stochastic supply network planning in light of the rolling horizon practice. *Pesquisa Operacional*, 41(s1), e234451. <https://doi.org/10.1590/01017438.2021.041s1.00234451>
- Almeida, J. F. F., Conceição, S. V., Pinto, L. R., Oliveira, B. R. P., & Rodrigues, L. F. (2022). Optimal sales and operations planning for integrated steel industries. *Annals of Operations Research*, 315(2), 773–790. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03928-7>
- Almeida, J. F. D. F., Conceição, S. V., Pinto, L. R., de Camargo, R. S., & Júnior, G. d. M. (2018). Flexibility evaluation of multiechelon supply chains. *PLOS ONE*, 13(3), e0194050. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194050>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). ABNT NBR ISO 22000:2019: Sistemas de gestão de segurança de alimentos — Requisitos para qualquer organização na cadeia produtiva de alimentos. Rio de Janeiro: ABNT.
- Blanco, V., Hinojosa, Y., & Zavala, V. M. (2024). The waste-to-biomethane logistic problem: A mathematical optimization approach. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(22), 8453–8466. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01429>
- Bröring, S., Laibach, N., & Wustmans, M. (2020). Innovation types in the bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121939>
- Bu, S. (2021). Logistics engineering optimization based on machine learning and artificial intelligence technology. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(2), 2505–2516. <https://doi.org/10.3233/JIFS-189244>
- Büsing, C., Koster, A. M. C. A., & Schmitz, S. (2022). Robust minimum cost flow problem under consistent flow constraints. *Annals of Operations Research*, 312, 691–722. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04426-0>
- Curry, R. M., & Smith, J. C. (2021). Minimum-cost flow problems having arc-activation costs. *Naval Research Logistics*, 68(6), 585–605. <https://doi.org/10.1002/nav.22006>
- Faria, C. H. F., Almeida, J. F. F., & Pinto, L. R. (2024). Simulation–optimisation approach for sustainable planning of intermodal logistics in the Brazilian grain export industry. *Decision Analytics Journal*, 10, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100388>
- Glomb, L., Liers, F., & Rösel, F. (2022). A rolling-horizon approach for multi-period optimization. *European Journal of Operational Research*, 300(1), 189–206. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.043>
- Hu, C., Gao, Y., & Guo, E. (2024). A novel improved genetic algorithm for multi-period fractional programming portfolio optimization model in fuzzy environment. *Mathematics*, 12(11), 1694. <https://doi.org/10.3390/math12111694>
- International Tank Container Organisation (ITCO). (2023). *ITCO 2023 global fleet report: Growth and sustainability in the tank container industry (2013–2023)*. Recuperado de: https://www.international-tankcontainer.org/storage/uploads/ITCO_2023_Global_Fleet_Report.pdf
- ISO. (2019). *ISO 1496-3:2019 - Series 1 freight containers — Specification and testing — Part 3: Tank containers for liquids, gases and pressurized dry bulk (5ª ed.)*. International Organization for Standardization. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/73655.html>
- Krajewski, L., Ritzman, L. & Malhotra, M. (2009). Administração de Produção e operações — 8ª ed. Suplemento E, 505–523pp. São Paulo: Pearson.
- LeMay, S., Helms, M. M., Kimball, B., & McMahon, D. (2017). Supply chain management: The elusive concept and definition. *The International Journal of Logistics Management*, 28(4), 1425–1453. <https://doi.org/10.1108/IJLM-10-2016-0232​>
- Liguori, A., Formato, A., Pellegrino, A., & Villecco, F. (2021). Study of Tank Containers for Foodstuffs.

Machines, 9(2), 44.
<https://doi.org/10.3390/machines9020044>.

Nezhadroshan, A. M., Fathollahi-Fard, A. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2020). A scenario-based possibilistic-stochastic programming approach to address resilient humanitarian logistics considering travel time and resilience levels of facilities. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 8(4), 321–347.
<https://doi.org/10.1080/23302674.2020.1769766>.

Ogbe, E., Almansoori, A., Fowler, M., & Elkamel, A. (2023). Optimizing renewable injection in integrated natural gas pipeline networks using a multi-period programming approach. *Energies*, 16(6), 2631.
<https://doi.org/10.3390/en16062631>.

Panayides, P. M., Lambertides, N., & Savva, C. S. (2018). The impact of corporate governance on internal control and logistics performance. *International Journal of Logistics Management*, 29(1), 68–87. <https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2016-0036>.

Purnamasari, D., Tuswan, T., Muttaqie, T., Sandjaja, I. E., Machfudin, A., Rizal, N., Rahadi, S. J. A., Sasmito, A., Zakki, A. F., & Mursid, O. (2024). Structural assessment of 40 ft mini LNG ISO tank: Effect of structural frame design on the strength performance. *Curved and Layered Structures*, 11(1), 20220219.
<https://doi.org/10.1515/cls-2022-0219>.