

Aplicação de um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista para a otimização da produção de uma refinaria brasileira

Maria Rita Rocha Mota^a, Bruno da Fonte Leite, Raphael Kramer^a

^aUniversidade Federal de Pernambuco

^aDepartamento de Engenharia de Produção

Av. da Arquitetura, s/n – Cidade Universitária, Recife - PE, Brasil, CEP: 50740-550

{maria.mrrm, raphael.kramer}@ufpe.br

bruno.leite@petrobras.com.br

RESUMO

A indústria petrolífera é composta por processos que envolvem cálculos para o balanceamento de massa e de energia, tornando bastante desafiador atividades como o planejamento e a programação da produção. Problemas envolvendo essas atividades são geralmente classificados como NP-Difíceis, dadas as diversas combinações envolvidas no processo, sendo necessário recorrer à aplicação de técnicas de pesquisa operacional para a geração de soluções de boa qualidade em tempo computacional viável. Assim, o presente trabalho propõe um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista para otimizar o envio de carga (mistura de petróleos) dos Tanques de Armazenamento para a Unidade de Destilação Atmosférica de uma refinaria brasileira, com o intuito de maximizar a carga processada, levando em consideração restrições operacionais e físico-químicas. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios, sendo possível obter soluções viáveis em curto tempo computacional e com processamento de carga superior ao apresentado pela empresa estudo de caso.

PALAVRAS CHAVE. Programação Quadrática. Otimização. *Lazy callback*.

EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás; OC – Otimização Combinatória; POI – PO na Indústria

ABSTRACT

The oil industry comprises processes that involve calculations for mass and energy balance, making activities such as production planning and scheduling quite challenging. Problems involving these activities are mostly classified as NP-Hard due to the various combinations involved in the process, necessitating the application of operations research techniques to generate high-quality solutions within feasible computational time. Therefore, this work proposes a Mixed-Integer Non-linear Programming model to optimize the transfer of loads (mixture of crude oils) between Storage Tanks and the Atmospheric Distillation Unit of a Brazilian refinery, aiming to maximize the processed load while considering operational and physico-chemical constraints. The obtained results were satisfactory, as it was possible to achieve feasible solutions in a short computational time with higher load processing compared to the company in the case study.

KEYWORDS. Quadratic Programming. Optimization. *Lazy callback*.

EN&PG – OR in the Energy, Petroleum, and Gas Sector; OC – Combinatorial Optimization; POI – OR in Industry

1. Introdução

A indústria de óleo e gás apresenta grande impacto na economia nacional e internacional. Segundo os dados apresentados pelo Anuário Estatístico da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), entre os países que compõem o grupo da América Central e do Sul, o Brasil é o país que possui a maior produção de petróleo, sendo responsável por 48,84% do volume produtivo médio diário desse grupo no ano de 2022, e é o terceiro maior produtor entre todos os países das Américas do Norte, Sul e Central, evidenciando, assim, o impacto dessa *commodity* brasileira em âmbito global [da Silva, 2023].

A cadeia de suprimentos da indústria petrolífera se divide em três partes principais: o *upstream*, que inclui a identificação e exploração das jazidas de petróleo; o *midstream*, que envolve o transporte e armazenamento do petróleo cru; e o *downstream*, que diz respeito ao refino do petróleo cru e à distribuição dos produtos refinados aos pontos de venda [Koroteev e Tekic, 2021]. No segmento *downstream* estão envolvidas as atividades que proporcionam o maior retorno financeiro, tendo em vista que os derivados obtidos possuem um maior valor aquisitivo no mercado.

Devido à natureza dos processos da indústria petrolífera que envolvem cálculos para o fluxo de materiais e de energia, há uma elevada complexidade para propor métodos de gerenciamento de processos, como o planejamento e a programação da produção. Esses métodos se caracterizam como problemas de otimização combinatória, sendo, na maioria dos casos, classificados como NP-Difíceis, havendo a necessidade de recorrer à aplicação de técnicas de pesquisa operacional (como programação linear e não linear) para a geração de soluções de boa qualidade em tempo computacional viável.

Muitos processos em refinarias são caracterizados como problemas de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), como demonstrado nas pesquisas de Yu et al. [2022], Baranwal et al. [2023] e Su et al. [2023]. Estes problemas envolvem variáveis tanto reais quanto inteiras e incluem pelo menos uma função não linear nas restrições e/ou na função objetivo. A complexidade dos problemas não lineares aumenta significativamente o desafio de resolvê-los, resultando em um elevado custo computacional. Esta complexidade pode até mesmo inviabilizar a obtenção de uma solução satisfatória em um curto período.

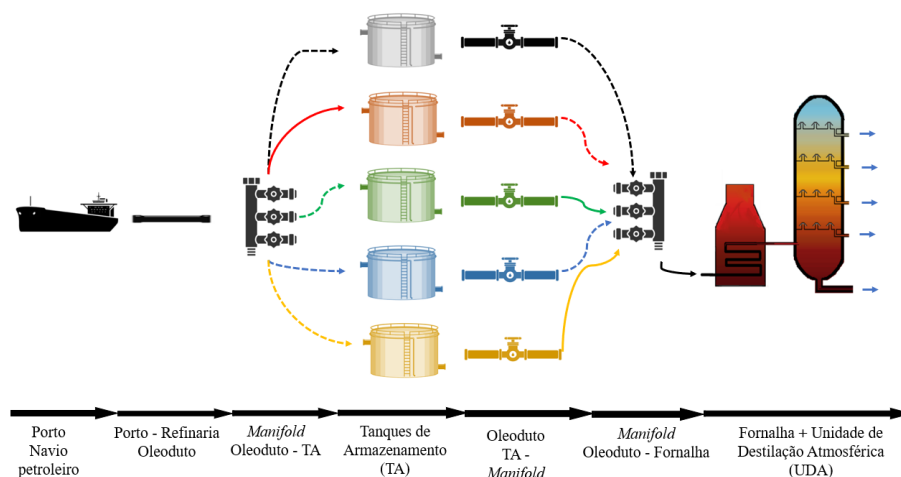
Dessa forma, frente ao grande impacto da indústria petrolífera no funcionamento de diversas outras indústrias e diante da complexidade no gerenciamento dos processos como a programação da produção, tem-se a necessidade de serem realizados estudos com o intuito de otimizar os processos que a compõem e de proporcionar maior rigor científico, por meio da aplicação de Otimização Combinatória, visando auxiliar na tomada de decisão para um melhor gerenciamento da produtividade e do atendimento da demanda em tempo hábil. Assim, o presente estudo visa otimizar o envio de carga para a Unidade de Destilação Atmosférica (UDA), buscando maximizar a carga média a ser processada, a partir da proposição e da implementação de um modelo de Programação Não Linear Inteira Mista que retorne soluções viáveis em um curto tempo computacional (*e.g.*, 30 minutos) respeitando as restrições operacionais e físico-químicas.

2. Descrição do Problema

Este estudo é uma continuidade da pesquisa apresentada pelos autores Mota et al. [2024], que está situada no segmento *downstream*, mais precisamente no processo de refino de petróleo de uma refinaria brasileira. A Figura 1 ilustra o cenário do problema que abrange desde o abastecimento dos Tanques de Armazenamento (TAs) pelo navio petroleiro até a definição da mistura de petróleo, conhecida como carga, que será processada na UDA. Nessa figura, os tanques foram identificados com cores diferentes para representar petróleos com diferentes composições.

Cada tanque de armazenamento serve como um estoque de petróleo e as decisões de quais tanques serão abastecidos pelo navio petroleiro, assim como quais tanques enviarão carga

Figura 1: Cenário do estudo de caso.



Fonte: Mota et al. [2024]

para a UDA são de responsabilidade do funcionário que realiza a programação da produção. Atualmente, ele baseia sua escolha na capacidade disponível dos tanques e em cálculos realizados por meio de planilhas, juntamente com a experiência prática diária, sem haver o auxílio de uma análise fundamentada em Pesquisa Operacional para apoiar a tomada de decisão.

A refinaria em questão tem uma capacidade média de processamento diário de 115 mil barris de petróleo, produzindo principalmente diesel S-10, nafta, óleo combustível e gás liquefeito de petróleo (GLP). Cada um desses produtos refinados deve atender a especificações quanto à composição química para ser comercializado. Essas especificações são aplicáveis, legalmente, aos produtos finais e, para que seja possível atendê-las no final do processo de refino, a refinaria adota regras de negócio em cada etapa/estágio de processamento.

A definição dessas especificações começa no preparo da mistura que será processada na UDA sendo determinados limites máximos para o teor de nafta (em %) e para a concentração de enxofre (em partes por milhão - ppm) da carga a ser enviada, motivado por questões ambientais e operacionais. O preparo da mistura se trata da definição de quais tanques serão utilizados e o quanto que será enviado de cada um para o processamento de carga na UDA, além disso, como destacado por Mota et al. [2024], nesse conjunto de tipos de petróleo analisado, aqueles que têm baixo teor de nafta, por outro lado, possuem alta concentração de enxofre e vice-versa, necessitando haver um balanço entre eles.

Dada a caracterização deste cenário, temos um problema de otimização combinatória complexo, com múltiplas opções de escolha, como determinar o tanque ideal para receber o petróleo do navio, considerando que a mistura pode alterar as propriedades físico-químicas do petróleo. Além disso, há decisões a serem tomadas sobre as combinações de tanques a serem utilizados para a definição da mistura.

3. Modelo Matemático

O problema apresentado foi modelado matematicamente como um problema de PNLIM onde a não linearidade está nas restrições relacionadas ao cálculo da mistura para três propriedades: densidade, teor de nafta e concentração de enxofre. Foram realizadas as seguintes considerações: apenas um navio pode ser atendido por dia; a refinaria possui cinco TAs e uma UDA; o TA fica inoperante por dois dias, quando for abastecido; no mínimo um tanque e no máximo três devem

enviar carga para a UDA, por dia; primeiro ocorre o envio das cargas para a UDA e só depois ocorre o processamento; o planejamento foi realizado para sete dias; a vazão é tida como constante; a cada transferência de petróleo (navio→TA, TA→UDA) são realizados cálculos para atualização da densidade, teor de nafta e concentração de enxofre dessas propriedades na mistura resultante; o limite máximo para a densidade, o teor de nafta e para a concentração de enxofre, respectivamente, na carga que será processada é de 1kg/m^3 , $2.250\text{m}^3/\text{dia}$ e de $4.200\text{ppm}/\text{dia}$. A UDA deve receber no mínimo 12.000m^3 e no máximo 16.000m^3 de carga dos tanques por dia. Os dados e as variáveis usados na modelagem foram apresentados, descritos e classificados na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1: Descrição dos dados

Dados	Descrição	Natureza
$D = \{1, 2, \dots, D \}$	Conjunto de dias do horizonte de planejamento	Discreto
$L = \{1, 2, 3\}$	Conjunto de estágios de produção: navio, TA e UDA	Discreto
NC_l	Número de componentes do estágio $l \in L$	Discreto
$T = \{1, 2\}$	Conjunto de estágios de transferência: navio $\rightarrow$ TA e TA $\rightarrow$ UDA	Discreto
$P = \{1, 2, 3, 4\}$	Conjunto de parâmetros do petróleo: volume, densidade, teor de nafta e concentração de enxofre	Discreto
LB_p^l	Valor mínimo aceitável do parâmetro $p \in P$ no estágio $l \in L$	Contínuo
UB_p^l	Valor máximo aceitável do parâmetro $p \in P$ no estágio $l \in L$	Contínuo
$\{SVol, SDens, SNaft, SENx\}^d$	{Volume, Densidade, Teor de Nafta, Concentração de Enxofre} do petróleo recebido no estágio produção 1 (navio) no início dia $d \in D$	Contínuo
$\{initVol, initDen, initNaft, initEnx\}_{lj}$	{Volume, Densidade, Teor de Nafta, Concentração de Enxofre} do petróleo armazenado no componente $j \in NC_l$ do estágio produção $l \in L$ no início do horizonte de planejamento	Contínuo

Tabela 2: Descrição das variáveis

Variáveis	Descrição
$\{vol, dens, naft, enx\}_{lj}^d$	{Volume, Densidade, Teor de Nafta, Concentração de Enxofre} no componente $j \in NC_l$ do estágio produção $l \in L$ no final do dia $d \in D$
x_{aij}^d	Volume transferido no estágio de transferência $a \in T$ do componente $i \in NC_a$ para o componente $j \in NC_{(a+1)}$ no dia $d \in D$
$y_{aij}^d \in \{0, 1\}$	Variável auxiliar binária que possuirá valor igual a 1 para indicar que existe alguma transferência no estágio de transferência $a \in T$, no dia $d \in D$, do componente $i \in NC_a$ para o componente $j \in NC_{(a+1)}$. Caso contrário, possuirá valor 0.

Considerando os dados e variáveis apresentados nas Tabelas (1) e (2), o modelo de PNLIM proposto é apresentado pelas equações e inequações (1)-(23). Esse modelo pode ser generalizado para outras situações mais complexas (*e.g.*, envolvendo mais de um recebimento por dia *e/ou* mais de uma UDA). Porém, optou-se pela representação limitada para o estudo de caso para priorizar uma melhor apresentação visual do mesmo, dada a limitação de espaço.

$$\text{Max } Z = \sum_{d \in D} \sum_{j \in NC_3} \sum_{i \in NC_2} x_{2ij}^d \quad (1)$$

sujeito a:

$$\{vol_{lj}^1, den_{lj}^1, naf_{lj}^1, enx_{lj}^1\} = \{initVol_{lj}, initDen_{lj}, initNaf_{lj}, initEnx_{lj}\}, \quad \forall l \in L, j \in NC_1, \quad (2)$$

$$\{vol_{11}^d, den_{11}^d, naf_{11}^d, enx_{11}^d\} = \{SVol^d, SDens^d, SNa f^d, SEnx^d\}, \quad \forall d \in D, \quad (3)$$

$$LB_1^2 \leq vol_{2j}^d \leq UB_1^2, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, \quad (4)$$

$$LB_1^3 \leq vol_{31}^d \leq UB_1^3, \quad \forall d \in D, \quad (5)$$

$$dens_{31}^d \leq UB_2^3, \quad \forall d \in D, \quad (6)$$

$$naf_{31}^d \cdot vol_{3j}^d \leq UB_3^3, \quad \forall d \in D, \quad (7)$$

$$enx_{31}^d \leq UB_4^3, \quad \forall d \in D, \quad (8)$$

$$(UB_1^2 - LB_1^2) \cdot y_{aij}^d \geq x_{aij}^d \geq 2000 \cdot y_{aij}^d, \quad \forall a \in T, i \in NC_a, j \in NC_{(a+1)}, d \in D, \quad (9)$$

$$y_{11j}^d + y_{2j1}^t \leq 1, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, t \in \{d, \min\{d+1, |D|\}\}, \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{NC_2} x_{11k}^d = vol_{11}^d, \quad \forall d \in D, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{NC_2} y_{2i1}^1 = 0, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{NC_2} y_{2i1}^d \leq 3, \quad \forall d \in D, \quad (13)$$

$$vol_{2j}^d = vol_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d - x_{2j1}^d, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, \quad (14)$$

$$vol_{31}^d = \sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d, \quad \forall d \in D, \quad (15)$$

$$dens_{2j}^d = \frac{vol_{2j}^{(d-1)} \cdot dens_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d \cdot dens_{11}^d - x_{2j1}^d \cdot dens_{2j}^{(d-1)}}{vol_{2j}^d}, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, \quad (16)$$

$$dens_{31}^d = \frac{\sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d \cdot dens_{2i}^{(d-1)}}{vol_{31}^d}, \quad \forall d \in D, \quad (17)$$

$$naf_{2j}^d = \frac{naf_{2j}^{(d-1)} \cdot vol_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d \cdot naf_{11}^d - x_{2j1}^d \cdot naf_{2j}^{(d-1)}}{vol_{2j}^d}, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, \quad (18)$$

$$naf_{31}^d = \frac{\sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d \cdot naf_{2i}^{(d-1)}}{vol_{31}^d}, \quad \forall d \in D, \quad (19)$$

$$enx_{2j}^d = \frac{vol_{2j}^{(d-1)} \cdot dens_{2j}^{(d-1)} \cdot enx_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d \cdot dens_{11}^d \cdot enx_{11}^d - x_{2j1}^d \cdot dens_{2j}^{(d-1)} \cdot enx_{2j}^{(d-1)}}{vol_{2j}^{(d-1)} \cdot dens_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d \cdot dens_{11}^d - x_{2j1}^d \cdot dens_{2j}^{(d-1)}}, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, \quad (20)$$

$$enx_{31}^d = \frac{\sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d \cdot dens_{2i}^{(d-1)} \cdot enx_{2i}^{(d-1)}}{\sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d \cdot dens_{2i}^{(d-1)}}, \quad \forall d \in D, \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 vol_{lj}^d, dens_{lj}^d, na_{lj}^d, en_{lj}^d &\in \mathbb{R}^+, & \forall l \in L, j \in NC_l, \\
 & & d \in D \cup \{0\}, \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_{aij}^d &\in \{0, 1\}, x_{aij}^d \in \mathbb{R}^+, & \forall a \in T, i \in NC_a, \\
 & & j \in NC_{(a+1)}, d \in D. \quad (23)
 \end{aligned}$$

A Função Objetivo (1) busca, ao longo do planejamento semanal, maximizar o processamento de carga na UDA. As Restrições (2) e (3) estabelecem, respectivamente, o estado inicial dos estágios de produção $l \in L$ e os recebimentos programados dos navios. O conjunto de restrições (4) estabelece o limite operacional do volume nos TAs, e as Restrições (5)-(8) estabelecem os limites operacionais para o volume e para as propriedades físico-químicas na UDA. O conjunto de Restrições (9) relaciona as variáveis y_{aij}^d e x_{aij}^d de modo que sempre que houver transferência, a variável binária y_{aij}^d deverá assumir valor 1 e essa transferência deverá ser de, no mínimo, 2.000m³. O conjunto de Restrições (10) informa que se um TA for abastecido, ele ficará inoperante por dois dias, a partir da data de recebimento de petróleo do navio. O conjunto de Restrições (11) estabelece que não existe estoque de petróleo no porto, dessa forma, todo o volume entregue pelo navio deve ser alocado no(s) TA(s). O conjunto de restrição (12) impede que haja envio de carga no primeiro dia do horizonte, pois esse dia é usado apenas a inicialização do modelo.

O conjunto de Restrições (13) informa que só é permitido ter, no máximo, três tanques enviando carga para a UDA por dia. Os conjuntos de Restrições (14) e (15) estabelecem o volume contido nos tanques e o volume que será processado na UDA, respectivamente. Os conjuntos de Restrições (16), (18) e (20) informam sobre os cálculos para atualização das propriedades densidade, nafta e enxofre nos TAs, quando ocorrer o abastecimento; enquanto que as Restrições (17), (19), (21) informam sobre o cálculo dessas três propriedades na UDA. O cálculo para o teor de nafta (18) e (19) levou em consideração a composição percentual feita em função do volume (%v/v) que pode ser compreendido como o quanto de nafta (em m³) está presente na solução (em m³) de petróleo. Os conjuntos de Restrições (20) e (21) demonstram os cálculos da concentração de enxofre nos TAs e na UDA, respectivamente, considerando a ponderação mássica.

Por fim, as Restrições (22) e (23) referem-se ao domínio das variáveis de decisão.

4. Metodologia de resolução

Essa pesquisa se caracteriza como um estudo de caso que ocorreu a partir de visita técnica e de reuniões com um funcionário da refinaria para o esclarecimento sobre a dinâmica dos processos e sobre as regras de negócio da empresa, viabilizando a modelagem matemática do cenário modelado.

Em particular, o cálculo da concentração de enxofre da mistura para os TAs e para a UDA, segundo as regras de negócio da empresa, é realizado por meio de uma ponderação mássica, que pode ser compreendida como uma conversão de unidades, de volume de soluto (enxofre) para massa de soluto, por meio da multiplicação da densidade do líquido que está sendo transferido. Porém, a fim de modelar o problema como um de Programação Quadrática, a concentração de enxofre foi calculada em duas etapas, na primeira etapa foram utilizados os conjuntos de restrições (24) e (25) que expõem os cálculos para a concentração de enxofre por meio de uma ponderação volumétrica, substituindo os conjuntos de restrições (20) e (21), respectivamente, durante a resolução desse modelo nessa etapa.

As soluções inteiras obtidas nessa primeira etapa foram analisadas, em uma segunda e última etapa, por uma função de *lazy callback* que utiliza os conjuntos de restrições (20) e (21) para calcular a ponderação mássica, e, caso essa solução obtida viole, em algum dia, o limite máximo permitido pela UDA, a mesma é rejeitada, impedindo, assim, que soluções inviáveis sejam aceitas.

$$enx_{2j}^d = \frac{vol_{2j}^{(d-1)} \cdot enx_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d \cdot enx_{11}^d - x_{2j1}^d \cdot enx_{2j}^{(d-1)}}{vol_{2j}^{(d-1)} + x_{11j}^d - x_{2j1}^d}, \quad \forall j \in NC_2, d \in D, \quad (24)$$

$$enx_{31}^d = \frac{\sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d \cdot enx_{2i}^{(d-1)}}{\sum_{i=1}^{NC_2} x_{2i1}^d}, \quad \forall d \in D. \quad (25)$$

A programação semanal proposta usou como *input* para os cálculos os mesmos dados que a empresa apresentou para aquele período, incluindo: o estado inicial do sistema, os limites de armazenamento dos tanques e de processamento na UDA, assim como os limites de nafta e de enxofre para a mistura que será processada. Isso foi feito com a finalidade de comparar a eficiência dos resultados oriundos do método proposto com os da empresa, que foi realizado sem a influência desse método.

A implementação da modelagem matemática descrita na Seção 3 foi realizada em linguagem de programação Julia, utilizando os pacotes JuMP, CPUTime, Gurobi, DataFrames e XLSX, sendo resolvida por meio do solucionador comercial Gurobi versão 11.0.0, por um tempo limite de 1800s considerando 5 cenários. Os experimentos computacionais foram realizados em uma máquina com processador Intel(R) Core(TM) i7-11370H 3.30 GHz com 10GB de RAM e sistema operacional Windows 11.

5. Resultados Preliminares

No panorama apresentado, a empresa dispõe de 4 tipos de petróleo (denotados aqui por “I”, “B”, “J”, “R”) para abastecer os TAs, eles diferem entre si com base nos valores de 3 propriedades: densidade, nafta e enxofre, como pode ser visto na Tabela 4. Nos experimentos computacionais, foram consideradas diversas combinações entre: os tipos de petróleo, os respectivos volumes recebidos e os dias de abastecimento, para compor a programação semanal. Isso foi feito, pois percebeu-se que a data e o volume escolhido para a realização do abastecimento impactam no valor da função objetivo, algumas dessas combinações podem ser visualizadas na Tabela 3, na qual a linha “Petróleo” refere-se ao tipo desse óleo que foi usado, a linha “Dia” ao dia do horizonte de planejamento em que ocorreu o abastecimento e a linha “FO” ao valor da Função Objetivo resultante em cada Cenário.

Tabela 3: Cenários para o abastecimento

	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
Petróleos	I	R	I	R	B	J	B	R
Dia	2	5	3	5	2	4	2	5
Volume(m ³)	48.000	22.000	48.000	22.000	52.000	35.000	40.000	32.000
FO(m ³)	100.057,233		103.670,676		102.643,942		97.075,012	

O impacto do dia do abastecimento no valor da função objetivo é uma consequência dos limites impostos para o teor de nafta e para a concentração de enxofre na UDA, tendo em vista que essa primeira propriedade é medida de forma relativa com base no volume, enquanto que a concentração de enxofre, além de considerar o volume, incorpora no cálculo a densidade do óleo, como pode ser visto nos conjuntos de Restrições (18) e (19), (20) e (21), respectivamente. Esse impacto também tem relação com o período em que um TA fica inoperante ao ser abastecido, reduzindo o conjunto de possíveis combinações a serem realizadas entre os tanques, durante esse período.

Com base na Tabela 3, percebe-se que o Cenário 2 foi o que apresentou o valor mais significativo para a Função Objetivo, sendo esse o melhor valor dentre as soluções encontradas no tempo computacional do experimento. O abastecimento realizado para esse cenário foi feito com

petróleo “I” e com o petróleo “R” cujos valores para as propriedades podem ser visualizados na Tabela 4, assim como dos demais tipos de petróleos. Além disso, é possível perceber o impacto do dia de abastecimento no valor da função objetivo, como pode ser visto ao serem comparados os Cenários 1 e 2 que diferem entre si apenas no dia de recebimento do petróleo “I”, resultando em um valor de “FO” 3,61% maior para o Cenário 2, frente ao Cenário 1.

Tabela 4: Propriedades dos petróleos

Petróleos	B	I	J	R
Densidade(kg/m³)	0,8838	0,8800	0,9522	0,9291
%Nafta	16,9	17,7	5,3	9,7
Enxofre(ppm)	3220	2530	5600	6480

As informações completas sobre a programação da produção semanal para o Cenário 2 podem ser vistas na Figura 2 que expõe, para cada TA, os valores dos volumes: inicial, transferido e final e as respectivas propriedades, o que também pode ser visto para a UDA. O dia 1 chamado de “Inicialização” apresenta o *input* dos dados com os quais foram realizados os experimentos computacionais. Na linha “Vol p/ processamento” da UDA, tem-se o valor da função objetivo para cada dia da programação semanal. O abastecimento dos tanques pode ser identificado pelos valores em vermelho nessa figura, representando o volume atualizado após o abastecimento.

Figura 2: Programação semanal considerando o Cenário 2

	Tanque\ Dia	Inicialização	2	3	4	5	6	7	8
TA 1	Volume Inicial (m³)	94.000,00	94.000,00	81.515,35	69.351,74	60.603,49	50.623,59	40.306,20	40.306,20
	Vol. Transferido (m³)	0,00	12.484,65	12.163,61	8.748,25	9.979,90	10.317,39	0,00	0,00
	Densidade (kg/m³)	0,000	0,889	0,889	0,889	0,889	0,889	0,889	0,889
	% de Nafta	15,90%	15,90%	15,90%	15,90%	15,90%	15,90%	15,90%	15,90%
	Enxofre (ppm)	0,0036	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
	Volume Final (m³)	94000,00	81.515,35	69.351,74	60.603,49	50.623,59	40.306,20	40.306,20	40.306,20
TA 2	Volume Inicial (m³)	69.580,00	69.580,00	67.493,86	67.493,86	64.731,37	59.509,35	54.709,86	54.709,86
	Vol. Transferido (m³)	0,00	2.086,15	0,00	2.762,49	5.222,01	4.799,49	0,00	2.000,00
	Densidade (kg/m³)	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911	0,911
	% de Nafta	12,70%	12,70%	12,70%	12,70%	12,70%	12,70%	12,70%	12,70%
	Enxofre (ppm)	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052	0,0052
	Volume Final (m³)	69.580	67.493,86	67.493,86	64.731,37	59.509,35	54.709,86	54.709,86	52.709,86
TA 3	Volume Inicial (m³)	94.969,00	94.969,00	94.969,00	94.969,00	91.581,06	91.581,06	91.581,06	89.581,06
	Vol. Transferido (m³)	0,00	0,00	0,00	3.387,94	0,00	0,00	2.000,00	0,00
	Densidade (kg/m³)	0,891	0,891	0,891	0,891	0,891	0,891	0,891	0,891
	% de Nafta	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%
	Enxofre (ppm)	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045	0,0045
	Volume Final (m³)	94.969,00	94.969,00	94.969,00	91.581,06	91.581,06	91.581,06	89.581,06	89.581,06
TA 4	Volume Inicial (m³)	23.657,00	23.657,00	23.657,00	21.550,42	35.579,14	35.579,14	35.579,14	29.866,44
	Vol. Transferido (m³)	0,00	0,00	2.106,58	0,00	0,00	0,00	5.712,71	4.869,96
	Densidade (kg/m³)	0,891	0,891	0,891	0,891	0,906	0,906	0,906	0,906
	% de Nafta	15,00%	15,00%	15,00%	15,00%	12,90%	12,90%	12,90%	12,90%
	Enxofre (ppm)	0,0038	0,0039	0,0039	0,0039	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
	Volume Final (m³)	23.657,00	23.657,00	21.550,42	21.550,42	35.579,14	35.579,14	29.866,44	24.996,47
TA 5	Volume Inicial (m³)	36.132,00	36.132,00	84.132,00	84.132,00	92.103,28	92.103,28	92.103,28	85.039,44
	Vol. Transferido (m³)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7.063,84	7.965,70
	Densidade (kg/m³)	0,873	0,873	0,877	0,877	0,881	0,881	0,881	0,881
	% de Nafta	18,10%	18,10%	17,90%	17,90%	17,20%	17,20%	17,20%	17,20%
	Enxofre (ppm)	0,0034	0,0035	0,0029	0,0029	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
	Volume Final (m³)	36.132,00	36.132,00	84.132,00	84.132,00	92.103,28	92.103,28	85.039,44	77.073,74
UDA	Vol p/ processamento	0	14.570,80	14.270,18	14.898,69	15.201,91	15.116,88	14.776,55	14.835,67
	% Nafta	0	15,40%	15,80%	15,10%	14,80%	14,90%	15,20%	15,20%
	Nafta (m³/dia)	0	2.250,00	2.250,00	2.250,00	2.250,00	2.250,00	2.250,00	2.250,00
	Enxofre (ppm)	0	3.877,0	3.689,0	4.139,0	4.192,0	4.151,0	4.062,0	4.060,0

Fonte: Autores, 2024

Para analisar a eficiência da modelagem proposta, foi construída a Tabela 5 que compara 3 abordagens: resultados da empresa obtidos de modo empírico sem influência da modelagem desse trabalho, modelo proposto no Cenário 2 e uma abordagem que utilizou os mesmos volumes e dias de abastecimento da empresa, mas aplicou a programação da produção conforme a modelagem proposta nesta pesquisa. A comparação dos resultados considerou as seguintes informações: o valor da carga processada pela UDA (valor da função objetivo) e a quantidade de abastecimentos com os respectivos volumes. Ao ser comparada a segunda com a quarta coluna dessa tabela, observa-se que o resultado foi superior ao utilizar este modelo proposto.

Considerando o Cenário 2, os resultados obtidos pelo método proposto apresentaram um ganho de 9,24% frente aos da empresa, além disso, foi utilizado um volume menor para o abastecimento, nesse horizonte de planejamento.

Um outra informação interessante é que, nem sempre, abastecer os tanques com um volume muito elevado garantirá um aumento significativo na função objetivo, como pode ser visto ao serem comparadas a segunda e a terceira coluna da Tabela 5, além disso, a carga a ser processada pela UDA é apenas 0,52% maior na abordagem da quarta coluna do que a da terceira coluna e necessitou de 92.000m³ a mais. Assim, para se ter uma melhor eficiência na programação é necessário realizar um *trade-off* entre as seguintes informações: data do abastecimento, tipo de petróleo e o respectivo volume, pois, a cada abastecimento, ocorre mistura e as propriedades do tanque podem ser alteradas. É importante destacar que, na modelagem proposta, a escolha dos tanques a serem abastecidos e as quantidades recebidas por cada um são determinadas pelo solver com base nas restrições do modelo.

Tabela 5: Comparação dos resultados

Análise da eficiência	Resultados da empresa	Resultados do modelo proposto - Cenário 2	Modelo proposto usando o mesmo abastecimento da empresa
Função Objetivo	94.900 m ³	103.670,676 m ³	104.219,072 m ³
Abastecimentos e volumes solicitados	Dia 2 - 62.000 m ³ do petróleo <i>J</i> para o TA4; Dia 6 - 27.000 m ³ do petróleo <i>I</i> para o TA2; Dia 7 - 73.000 m ³ do petróleo <i>I</i> para o TA5.	Dia 3 - 48.000,00 m ³ do petróleo <i>I</i> para o TA5; Dia 5 - 14.028,71 m ³ do petróleo <i>R</i> para o TA4 e 7.971,28 m ³ para o TA5.	Dia 2 - 2.867.15 m ³ do petróleo <i>J</i> para o TA4 e 59.132.90 m ³ para o TA5; Dia 6 - 27.000 m ³ do petróleo <i>I</i> para o TA2; Dia 7 - 5341.41 m ³ do petróleo <i>I</i> para o TA3 e 67658.59 m ³ para o TA4.

Apesar do modelo proposto nesse trabalho ter como função objetivo a maximização da carga processada, nem sempre essa estratégia reflete o ótimo econômico para uma refinaria. O atingimento do ótimo econômico depende de uma avaliação mais complexa que envolve: os perfis de produção de derivados da Unidade de Destilação e das unidades à jusante, a demanda pelos produtos assim como as variações de preço, e também é influenciado sobre como a refinaria se encaixa no balanço comercial e logístico nacional, e até mundial. Entretanto, para análises pontuais de curto prazo, em diversos momentos, se faz atrativa a busca pela maximização da carga processada, e, nesse sentido, o modelo possui grande utilidade para auxiliar nas decisões tomadas pelos programadores de produção.

Dessa forma, diante dos resultados expostos, foi possível perceber que o método proposto apresentou boas soluções em curto tempo computacional e que, se utilizado junto com a expertise do funcionário da refinaria, pode auxiliar na tomada de decisão, proporcionando uma melhor eficiência na programação da produção, como pode ser visto ao serem comparados os resultados da carga processada expostos na segunda coluna da Tabela 5 com os da quarta coluna dessa mesma tabela, o *input* foi o mesmo, mas os resultados foram diferentes.

6. Conclusão

Problemas de planejamento e programação da produção são exemplos de problemas de otimização combinatória classificados como NP-Difíceis e, no contexto da indústria química como a petrolífera, esses desafios se intensificam devido à complexidade dos cálculos envolvidos nos processos. Nesse estudo, foi explorada a programação da produção de uma refinaria brasileira, os objetivos propostos foram cumpridos ao ser desenvolvido e implementado um modelo de PNLIM para a maximização da carga a ser processada na UDA, respeitando as restrições físico-químicas e operacionais.

O modelo proporcionou uma solução viável que promoveu aumento de 9,24% na carga processada pela UDA em comparação ao planejamento original da empresa, considerando o Cenário 2, necessitando de um volume significativamente menor de petróleo para abastecer os TAs.

Além disso, por meio desse trabalho, foi possível explorar a interdisciplinaridade, unindo conteúdo de diversas áreas do conhecimento como: engenharia de produção, engenharia química e computação, fazendo uso da Pesquisa Operacional para conseguir tratar e apresentar soluções viáveis para o problema proposto.

Para futuros trabalhos, planeja-se aprimorar o modelo proposto, reduzindo as trocas de tanques que fornecem carga para a UDA. Além disso, busca-se desenvolver um método para que seja possível ter uma previsão de quando abastecer os tanques, dado que, ao realizar o abastecimento, as propriedades dos Tanques são alteradas e o mesmo permanece inoperante por 2 dias, o que pode comprometer a eficiência do processamento. Dessa modo, é importante saber qual petróleo usar para abastecer, juntamente com a especificação de quando e do quanto que deve ser abastecido.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa parceira pela oportunidade de realização da pesquisa, ao Programa de Formação de Recursos Humanos 38.1 (PRH 38.1) pela assistência na realização dos trabalhos, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), código de financiamento 404807/2021-6, agradecemos também à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio financeiro suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015.

Referências

- Baranwal, M., Selukar, M., Lotti, R., Paranjape, A. A., Majumder, S., e Rocher, J. (2023). A scalable optimization framework for refinery operation and management. *Computers & Chemical Engineering*, 174:108242. ISSN 0098-1354.
- da Silva, D. C. (2023). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Technical report, ANP, Rio de Janeiro. URL <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico>.
- Koroteev, D. e Tekic, Z. (2021). Artificial intelligence in oil and gas upstream: Trends, challenges, and scenarios for the future. *Energy and AI*, 3:100041. ISSN 2666-5468.
- Mota, M. R. R., Kramer, R., e da Fonte Leite, B. (2024). Proposição de um modelo de programação matemática para a otimização da produção em uma refinaria brasileira. In *Anais da Conferência Rio Oil&Gas*, Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás.
- Su, L., Bernal, D. E., Grossmann, I. E., e Tang, L. (2023). Modeling for integrated refinery planning with crude-oil scheduling. *Chemical Engineering Research and Design*, 192:141–157. ISSN 0263-8762.

Yu, L., Wang, S., e Xu, Q. (2022). Optimal scheduling for simultaneous refinery manufacturing and multi oil-product pipeline distribution. *Computers & Chemical Engineering*, 157:107613. ISSN 0098-1354.