

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SABRINA FEDRIZZI

MODELO ESTENDIDO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA COM ESTRATÉGIA  
DE HORIZONTE ROLANTE PARA A OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE  
PETRÓLEO EM REDES DUTOVIÁRIAS INTEGRADAS

CURITIBA

2025

Sabrina Fedrizzi

MODELO ESTENDIDO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA COM ESTRATÉGIA  
DE HORIZONTE ROLANTE PARA A OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE  
PETRÓLEO EM REDES DUTOVIÁRIAS INTEGRADAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Mariana Kleina

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Checoli Choueiri

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Fedrizzi, Sabrina

Modelo estendido de programação matemática com estratégia de horizonte rolante para a otimização do transporte de petróleo em redes dutoviárias integradas / Sabrina Fedrizzi. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Mariana Kleina

Coorientador: Alexandre Checoli Choueiri

1. Petróleo – Transporte. 2. Modelos matemáticos. 3. Oleodutos de petróleo. 4. Agenda de execução (Administração). I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Kleina, Mariana. IV. Choueiri, Alexandre Checoli. V. Título.

Bibliotecário: Douglas Lenon da Silva CRB-9/1892

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **SABRINA FEDRIZZI**, intitulada: **MODELO ESTENDIDO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA COM ESTRATÉGIA DE HORIZONTE ROLANTE PARA A OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE PETRÓLEO EM REDES DUTOVIÁRIAS INTEGRADAS**, sob orientação da Profa. Dra. MARIANA KLEINA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 15 de Dezembro de 2025.

Assinatura Eletrônica

16/12/2025 13:25:02.0

MARIANA KLEINA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

16/12/2025 11:59:21.0

LEONARDO SILVA DE LIMA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

16/12/2025 12:03:48.0

LEANDRO MAGATÃO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

## RESUMO

A otimização do uso de dutovias que transportam petróleo e produtos derivados por longas distâncias tem se tornado um desafio cada vez mais relevante, impulsionado pelo crescimento contínuo da demanda desses produtos e pela complexidade associada à expansão da capacidade ou à implantação de novas infraestruturas dutoviárias. Nesse contexto, esta pesquisa tem por objetivo analisar e estender o modelo de programação matemática para o *scheduling* de petróleo bruto proposto por Shah (1996), um dos estudos pioneiros na área e que impulsionou diversas pesquisas posteriores. A proposta de estudo se deve ao fato de que o modelo original de Shah (1996), embora fundamental para o desenvolvimento da área, adota uma visão simplificada do problema, sem contemplar características e restrições essenciais para aplicação em cenários reais. As melhorias foram propostas em três etapas: unificação dos modelos originais do autor, uma vez que é utilizada estratégia de resolução hierarquizada com a decomposição da dutovia em dois segmentos; extensão do modelo original unificado com a adição de restrições que englobam especificações mais complexas de operação, aproximando o modelo às condições reais de transporte; e implementação da estratégia de horizonte rolante para resolver o modelo unificado estendido, visando a otimização de cenários de planejamento mais longos ou com infraestruturas maiores. Os novos modelos propostos foram implementados e validados utilizando o *software* Gurobi. Os resultados demonstraram que a unificação dos modelos de Shah (1996) aprimorou a adaptabilidade, permitindo encontrar *scheduling* viável em cenários nos quais a abordagem original não obteve solução. O modelo unificado com as restrições adicionais, por sua vez, eliminou inconsistências operacionais presentes no modelo de Shah (1996), aprimorou a qualidade da solução em instâncias distintas e tornou o modelo mais aderente às condições operacionais reais de transporte. Por fim, a estratégia de horizonte rolante mostrou-se mais eficiente computacionalmente, possibilitando a obtenção de *scheduling* para instâncias com horizontes de planejamento oito vezes mais longos ou com infraestruturas mais complexas, inclusive em casos para os quais a resolução unificada não obteve solução ótima dentro do limite de oito horas estabelecido.

Palavras-chave: *Scheduling*; dutovia; petróleo; modelagem matemática; otimização; transporte.

## ABSTRACT

The optimization of long-distance pipelines transporting petroleum and petroleum derivatives has become an increasingly relevant challenge, driven by continuous growth in demand for these products and the complexity associated with capacity expansion or the implementation of new pipeline infrastructure. In this context, this research aims to analyze and extend the mathematical programming model for crude oil *scheduling* proposed by Shah (1996), a pioneering study in the field that has inspired numerous subsequent researches. This study is motivated by the fact that Shah's (1996) original model, although fundamental to the development of the field, adopts an overly simplified view of the problem, lacking some essential features and constraints for real-world application. The proposed modifications were developed in three stages: unification of the Shah's original models, which were initially solved through a hierarchical strategy based on the decomposition of the pipeline into two segments, extension of the original unified by incorporating additional constraints that capture more complex operational specifications, thereby bringing the model closer to real transport conditions, and implementation of a rolling horizon strategy to solve the extended unified model, aiming to optimize longer-term planning scenarios or larger infrastructures. The new proposed models were implemented and validated using the software Gurobi. The results demonstrated that the unification of Shah's (1996) models improved adaptability, enabling the identification of feasible schedules in scenarios where the original approach failed to find a solution. The unified model with additional constraints further eliminated operational inconsistencies present in Shah's (1996) formulation, enhanced solution quality across different instances, and made the model more consistent with real operational transportation conditions. Finally, the rolling horizon strategy proved to be computationally more efficient, allowing the attainment of schedules for instances with planning horizons up to eight times longer or with more complex infrastructures, even in cases where the unified approach failed to converge to an optimal solution within the established eight-hour limit.

Keywords: Scheduling; pipeline; petroleum; mathematical model; optimization; transportation.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS .....	19
FIGURA 2 – SEGMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA .....	20
FIGURA 3 – HORIZONTE ROLANTE .....	25
FIGURA 4 – PROCESSO DE SELEÇÃO DE CITAÇÕES DE SHAH (1996) .....	27
FIGURA 5 – COMPOSIÇÃO DAS CITAÇÕES SELECIONADAS .....	27
FIGURA 6 – FILTROS DE PESQUISA .....	30
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DOS SEGMENTOS <i>UPSTREAM</i> E <i>DOWNSTREAM</i> UTILIZADOS EM SHAH (1996) .....	35
FIGURA 8 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> .....	36
FIGURA 9 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> .....	40
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DE ETAPAS METODOLÓGICAS .....	43
FIGURA 11 – ETAPAS DAS EXTENSÕES PROPOSTAS .....	45
FIGURA 12 – ESTRUTURA DO ALGORITMO PARA RESOLUÇÃO COM HORIZONTE ROLANTE .....	50
FIGURA 13 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996) .....	55
FIGURA 14 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996) .....	55
FIGURA 15 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO .....	59
FIGURA 16 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO .....	60
FIGURA 17 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO .....	63
FIGURA 18 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO .....	64
FIGURA 19 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E $\xi = 0$ .....	67
FIGURA 20 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E $\xi = 0$ .....	68
FIGURA 21 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E $\xi = 0,5$ .....	68

FIGURA 22 – <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E $\xi = 0,5$ .....	69
---	----



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PROTOCOLO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA .....	29
TABELA 2 – INFRAESTRUTURA E HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DA INSTÂNCIA 1 .....	52
TABELA 3 – DEMANDA DE CADA PETRÓLEO EM CADA CDU PARA A INSTÂNCIA 1 .....	52
TABELA 4 – DESCARREGAMENTOS NO PORTO POR PERÍODO PARA A INSTÂNCIA 1 .....	53
TABELA 5 – DETALHAMENTO DO <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996).....	56
TABELA 6 – DETALHAMENTO DO <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996) .....	57
TABELA 7 – ATIVIDADES SIMULTÂNEAS NO <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> -INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996) .....	58
TABELA 8 – INFRAESTRUTURA DAS INSTÂNCIAS PARA TESTE DO MODELO ORIGINAL E DO UNIFICADO.....	61
TABELA 9 – RESUMO DE RESULTADOS DO MODELO ORIGINAL E UNIFICADO .....	62
TABELA 10 – CONDIÇÕES INICIAIS PARA A INSTÂNCIA 1 .....	62
TABELA 11 – DETALHAMENTO DO <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>DOWNSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO .....	64
TABELA 12 – DETALHAMENTO DO <i>SCHEDULING</i> DO SEGMENTO <i>UPSTREAM</i> - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO .....	65
TABELA 13 – RESUMO DE RESULTADOS DO MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E DECOMPOSTO ESTENDIDO .....	66
TABELA 14 – CONDIÇÕES INICIAIS PARA A INSTÂNCIA 6 .....	67
TABELA 15 – DEMANDA DA INSTÂNCIA 1 PARA A CONFIGURAÇÃO COM $N=3$ E $D=2$ .....	71
TABELA 16 – DESCARREGAMENTOS NO PORTO PARA OS PERÍODOS 16 A 18 DA INSTÂNCIA 1 .....	72

TABELA 17 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE - INSTÂNCIA 1 .....	72
TABELA 18 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 1 COM AJUSTE DE ESTOQUES INICIAIS.....	73
TABELA 19 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 1 COM 15,18, 21 E 30 PERÍODOS E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES .....	75
TABELA 20 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 1 COM 60, 90, 120 e 240 PERÍODOS E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES.....	77
TABELA 21 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIAS COM INFRAESTRUTURA MAIOR E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES ..	78
TABELA 22 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 4 COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES.....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANP	- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	- Balanço Energético Nacional
CDU	- <i>Crude Distillation Unit</i>
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
GRASP	- <i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
HR	- Resolução com Horizonte Rolante
PL	- Programação Linear
PLI	- Programação Linear Inteira
PLIM	- Programação Linear Inteira Mista
PNLIM	- Programação Não Linear Inteira Mista
RSL	- Revisão Sistemática da Literatura
UNI	- Resolução Unificada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 PROBLEMA .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.2.1 Objetivo geral .....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 JUSTIFICATIVA .....	15
1.4 DELIMITAÇÃO .....	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
2.1 SISTEMAS DUTOVIÁRIOS.....	18
2.2 PROBLEMA DO SEQUENCIAMENTO NO TRANSPORTE DE PETRÓLEO E DERIVADOS EM DUTOVIAS.....	20
2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA (PLIM) .....	21
2.4 HORIZONTE ROLANTE .....	22
2.5 ANÁLISE DE CITAÇÕES DE SHAH (1996).....	26
2.6 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA .....	28
2.6.1 Protocolo de pesquisa .....	28
2.6.2 Condução do levantamento e delimitação para RSL .....	30
2.6.3 Trabalhos correlatos.....	30
2.7 MODELO DE SHAH (1996).....	34
2.7.1 Modelo <i>downstream</i> .....	35
2.7.2 Modelo <i>upstream</i> .....	39
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	42
3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	43
<b>4 EXTENSÕES PROPOSTAS .....</b>	<b>45</b>
4.1 UNIFICAÇÃO DOS MODELOS ORIGINAIS .....	46
4.2 MELHORIAS NAS RESTRIÇÕES E FUNÇÕES OBJETIVO .....	47
4.3 RESOLUÇÃO COM HORIZONTE ROLANTE.....	49
<b>5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS .....</b>	<b>52</b>
5.1 ANÁLISE DO MODELO DE SHAH (1996) .....	54
5.2 ANÁLISE DO MODELO UNIFICADO.....	59

5.3 ANÁLISE DO MODELO UNIFICADO ESTENDIDO .....	62
5.4 ANÁLISE DO MODELO COM HORIZONTE ROLANTE .....	70
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com atividades que envolvem desde a extração de petróleo até a sua transformação, refino e distribuição para outros transformadores ou mercados consumidores, a indústria petrolífera dispõe de uma das cadeias de suprimentos mais complexas e indispensavelmente integralizadas (Kazemi; Szmerekovsky, 2015).

A distribuição dos diferentes tipos de petróleo e derivados por uma região extensa e entre diferentes localidades (portos, refinarias, mercados consumidores) é uma das etapas essenciais desta indústria e, para possibilitar sua execução, sistemas multimodais que combinam redes rodoviárias, rodoferroviárias, dutoviárias e marítimas são utilizados. Segundo Hane e Ratliff (1995), o transporte por dutos é único no que diz respeito ao seu funcionamento, uma vez que é a carga se movimenta em um meio de transporte estacionário, diferentemente dos outros meios. Essa característica o torna seguro e confiável, além de tornar embalagens e processos de retorno de cargas vazias à origem dispensáveis.

Entretanto, a construção das redes dutoviárias exige investimentos expressivos, inviabilizando mudanças causadas por possíveis alterações das origens e destinos e dificultando melhorias ou expansões em sua infraestrutura. Além de sua inflexibilidade, a complexidade do transporte por dutovias é agravada pela variedade de produto distribuído, os quais precisam ser enviados levando em conta sua compatibilidade química, visto que não há separação física entre eles (Kirschstein, 2018).

Nesse sentido, tomar decisões assertivas para otimização do transporte em dutovias tem sido um dos desafios cruciais para a indústria do petróleo e envolve a coordenação de diversos fatores e condições operacionais especiais, como bombeamentos, miscibilidade de diferentes produtos, vazão, entre outros (Magatão *et al.*, 2012). A qualidade do planejamento gerado para o transporte destes produtos impacta diretamente na estabilidade da produção e na eficiência econômica das petroquímicas (Qin *et al.*, 2025).

De acordo com Meira *et al.* (2021) e Li *et al.* (2021), diferentes abordagens, incluindo técnicas da pesquisa operacional, têm sido utilizadas nas últimas décadas para auxiliar a tomada de decisão e o estudo dos problemas de otimização de transporte de petróleo e derivados em dutos. Destacam-se ferramentas como a

programação linear inteira mista (PLIM), a programação não linear inteira mista (PNLIM), heurísticas e métodos de decomposição.

O desafio deste tema é encontrar a sequência e os respectivos volumes e horários dos lotes de produtos que serão movimentados pelos dutos de forma a atender todas as especificidades deste meio de transporte e satisfazer a demanda imposta tendo em vista os objetivos definidos. Os objetivos podem variar de acordo com o sistema considerado, conforme destacado por Sahebi, Nickel e Ashayeri (2014), visando, por exemplo, a minimização dos custos totais de operação, a maximização dos fluxos de produtos ou do nível de serviço ou até a minimização de medidas ligadas a impactos ambientais.

O estudo de Shah (1996) foi um dos trabalhos pioneiros que contribuiu significativamente para o desenvolvimento do problema (Bamoumen *et al.*, 2023; Fragkogios e Saharidis, 2018; Wang *et al.*, 2024). Neste, são formulados dois modelos PLIM utilizando a discretização do tempo para o *scheduling* de uma dutovia dividida em dois segmentos pelo autor: *upstream* e *downstream*. A porção *upstream* considera o recebimento do petróleo e seu armazenamento em tanques no porto. Já o segmento *downstream* refere-se aos tanques nas refinarias e seu envio às unidades de destilação de petróleo (*Crude oil Distillation Units* - CDUs). A estratégia de resolução proposta pelo autor adota uma decomposição hierárquica, para a qual a solução do modelo do segmento *downstream* fornece os parâmetros para a execução do modelo referente à porção *upstream*, permitindo, dessa forma, a construção de um *scheduling* único para todo o sistema.

O modelo original de Shah (1996), apesar de relevante, apresenta limitações relacionadas tanto à abordagem matemática quanto às suposições adotadas que simplificam a representação do sistema de transporte. Nesse sentido, o presente estudo visa implementar, avaliar e propor melhorias no modelo do autor, visto seu pioneirismo e importância para o desenvolvimento da área e dos trabalhos que o seguiram. O principal objetivo é aprimorar este modelo clássico, fornecendo uma alternativa que esteja mais alinhada com a realidade das indústrias petrolíferas.

Para isso, as melhorias são apresentadas em três etapas distintas: 1) unificação dos modelos matemáticos propostos pelo autor; 2) proposição de novas restrições para correção de problemas identificados e inclusão de características específicas do sistema dutoviário; e 3) resolução do modelo unificado com as novas

restrições utilizando a estratégia de horizonte rolante. Posteriormente, os modelos propostos são testados e seu desempenho é avaliado.

## 1.1 PROBLEMA

O problema estudado vai ao encontro ao cenário desafiador de programação do transporte de petróleo e derivados em dutovias, propondo a revisão e o aprimoramento de um trabalho clássico da literatura nesta área. Embora pioneiro, o modelo de Shah (1996) apresenta limitações em sua formulação matemática e nas premissas adotadas, as quais se distanciam da realidade operacional das indústrias devido à demasiada simplificação.

Então, a pergunta de pesquisa a ser respondida nesta dissertação é: como aprimorar o modelo clássico de Shah (1996) para o *scheduling* do transporte de petróleo e derivados por dutovias, de forma a torná-lo mais representativo das condições reais da indústria petrolífera e como essas alterações impactam em seu desempenho computacional?

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa são dispostos nesta sessão.

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho do modelo matemático proposto por Shah (1966) para o sequenciamento do transporte de petróleo e derivados por dutovias, bem como propor e implementar melhorias nas simplificações adotadas e na metodologia de resolução do autor, avaliando o impacto dessas alterações no desempenho computacional do modelo e em sua capacidade de representar com maior fidelidade as condições reais de operação das indústrias petrolíferas.



### 1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral traçado, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Buscar na literatura como o modelo de Shah (1996) já foi abordado em outros trabalhos e se já existem propostas de melhorias;
- Verificar na literatura como o problema de *scheduling* do transporte de petróleo e derivados por dutovias tem sido abordado nos últimos anos;
- Implementar e analisar o modelo de Shah (1996), identificando suas principais limitações que impactam na proximidade com a realidade;
- Propor melhorias ligadas à construção do modelo e sua forma de resolução, acrescentando restrições que incorporem novas características operacionais das dutovias e desenvolvendo estratégia de resolução com horizonte rolante;
- Implementar as melhorias propostas e avaliar os resultados obtidos, concluindo se as alterações aumentaram a aplicabilidade do modelo original;
- Verificar os impactos em relação ao desempenho computacional dos modelos propostos.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Conforme dados publicados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) no Encarte de Consolidação da Produção (2024), a produção média de petróleo atingiu 3,358 milhões de barris/dia em 2024, constituindo um valor 1,29% abaixo do recorde atingido em 2023 de 3,402 milhões de barris/dia, no entanto, ainda significativamente acima da média de 2022 (3,022 milhões de barris/dia). Além da produção nacional, o Brasil também é abastecido pelas importações de petróleo, as quais atingiram um total de 103,2 milhões de barris em 2024 (ANP, 2025).

O aumento na produção nacional tem se mostrado consistente há anos e a tendência é de que siga crescendo para atender ao consumo emergente no país, principalmente do setor energético. De acordo com o Relatório Síntese do Balanço

Energético Nacional (BEN) divulgado em 2025 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2024 a oferta interna de energia teve um aumento de 2,4% em relação ao ano anterior, sendo a maior parcela (34%) proveniente do petróleo e seus derivados.

Para tornar possível a movimentação do petróleo e de seus derivados por diversas regiões do país, oleodutos têm sido utilizados pela indústria petrolífera há cerca de 40 anos, provendo um modo de transporte econômico e eficiente (Rejowski; Pinto, 2003). Em 2024, o Brasil contava com 608 dutos, constituindo uma malha de 20,5 mil quilômetros destinada ao transporte de petróleo, derivados, gás natural e etanol (ANP, 2025).

Apesar de o Brasil apresentar grande capacidade para transferência de fluidos, o Plano Indicativo de Oleodutos referente ao ciclo 2023-2025 demonstra que a expansão em alguns trajetos de oleodutos será imprescindível para atender à demanda projetada pelo Plano Decenal de Expansão de Energia de 2034 e à necessidade de abastecimento em regiões mais distantes do país (EPE, 2025a).

Neste contexto, a constante análise da utilização dos dutos e aprimoramento das técnicas para otimização do transporte em dutovias é essencial para garantir o atendimento da demanda, visto o incremento produtivo e de consumo previsto. Além disso, a evolução de métodos que assegurem maior volume total sendo transportado por dutos pode ser benéfico também no quesito ambiental, uma vez que transportes rodoviários adicionais poderão ser evitados, poupando o consumo de óleo diesel e a emissão de dióxido de carbono oriundo da combustão automotiva, assim como demonstram as análises do Plano Indicativo de Oleoduto de 2025 (EPE, 2025a).

Ao propor a análise e melhorias em um modelo clássico da literatura para o problema de *scheduling* do transporte de petróleo e derivados em dutovias, bem como a avaliação dos impactos das mudanças tanto na qualidade da representação do sistema quanto no desempenho computacional, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na área e potencializa sua possibilidade de expansão.

A análise aprofundada do modelo pioneiro de Shah (1996) permite obter uma compreensão completa de seu funcionamento, viabilizando a identificação de aspectos que podem ser aprimorados para torná-lo mais fiel e aplicável a situações reais. Assim, sua utilização como ponto de partida para estudos subsequentes é fortalecida, uma vez que passa a combinar relevância científica e aderência às condições operacionais.

Além disso, o estudo reforça a relevância da pesquisa operacional e de modelos matemáticos como instrumentos estratégicos de apoio à tomada de decisão em setores industriais complexos, como o petrolífero, ampliando a possibilidade de aplicação prática de modelos matemáticos para a otimização de problemas diários.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO

Este estudo visa a avaliação e aprimoramento do modelo matemático de Shah (1996), consagrado na literatura e desenvolvido para a resolução do problema de sequenciamento de uma dutovia multiprodutos, com origem em um porto e destino nas CDUs. Portanto, a aplicação do modelo limita-se à infraestrutura pré-definida e não engloba todas as possibilidades de redes dutoviárias existentes.

Além disso, como o foco do trabalho é o modelo pioneiro apresentado por Shah (1996), apesar de múltiplas melhorias poderem ser realizadas referente à diferentes características de operação, a intenção é manter-se fiel à proposta original do autor, melhorando aspectos sem alterar as especificações da dutovia considerada. Dessa forma, o estudo limita-se ao contexto e estrutura funcional apresentada.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho segue os capítulos: Introdução, Revisão da Literatura, Materiais e Métodos, Extensões Propostas, Experimentos Computacionais e Conclusão.

A Introdução contextualiza o problema tratado na dissertação e a Revisão da Literatura descreve as principais definições necessárias para entender o problema. Ainda no segundo capítulo, são apresentadas a revisão de citações, a revisão sistemática e o trabalho de Shah (1996), juntamente com o contexto do problema abordado e a modelagem matemática proposta pelo autor. Posteriormente, o capítulo Materiais e Métodos descreve as características desta pesquisa e a metodologia adotada para desenvolvimento.

O capítulo Extensões Propostas descreve as alterações e melhorias propostas incorporadas à modelagem de Shah (1996), com o objetivo de aprimorar o modelo original. A construção dos cenários e os testes realizados para validar as modificações e avaliar seu desempenho são apresentados no capítulo Experimentos Computacionais. Por fim, são elaboradas as considerações finais na Conclusão.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos da literatura referentes às redes dutoviárias, ao processo de *scheduling*, à programação linear e à estratégia de horizonte rolante que serão utilizadas neste trabalho. Será detalhada, também, a análise de citações do artigo de Shah (1996) realizada com objetivo de verificar quais as contribuições já foram feitas e como o estudo é abordado nas pesquisas subsequentes.

Além disso, serão descritos nove trabalhos correlatos dos últimos anos (2023 a 2025) que mostram como o problema do sequenciamento de dutovias que transportam petróleo e derivados tem sido abordado, destacando o foco e as estratégias de resolução recentemente utilizadas.

Por fim, o modelo de Shah (1996) será descrito em detalhes, a fim de esclarecer as equações e premissas adotadas pelo autor. Essa explicação é importante para fundamentar as melhorias propostas no capítulo 4.

### 2.1 SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

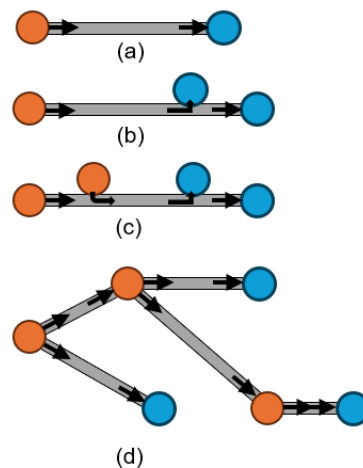
Entende-se por sistema dutoviário aquele formado por linhas de dutos que transportam grandes volumes de produtos em seu interior de uma certa origem até um destino por meio de pressão ou arraste forçado pela introdução de lotes no mesmo duto (Souza, 2015). Esses sistemas possuem diversas particularidades e uma delas, citada por Hane e Ratliff (1995), é a de que precisam ser mantidos cheios o tempo todo para forçar o fluxo contínuo de envio de material.

Frequentemente, as dutovias são utilizadas para transportar mais de um tipo de petróleo em sequência (Meira *et al.*, 2021), o que pode resultar em áreas de contaminação devido à mistura de produtos, visto que não há separação física entre eles, conforme explanado por Magatão *et al.* (2012). Custos adicionais de reprocessamento ou de degradação de produtos de maior valor acabam sendo gerados em virtude da quantidade de material contaminado. Então, como forma de tentar evitar ou reduzir esses custos, podem ser definidas sequências não desejadas ou proibidas entre produtos não compatíveis, as quais devem ser respeitadas na programação de envio (Meira *et al.*, 2021).

O gerenciamento dos estoques nos depósitos constitui outra característica relevante dos sistemas dutoviários. De acordo com Li *et al.* (2021), diferentes abordagens podem ser empregadas nos modelos de planejamento de transporte para esse fim, como a imposição de limites mínimos e máximos de estocagem em cada tanque ou a adoção de uma estrutura agregada, na qual os tanques que armazenam o mesmo tipo de petróleo são agrupados e tratados como uma única unidade. Ainda, há estudos que optam por desconsiderar o detalhamento dos estoques, assumindo que o sistema dispõe de capacidade suficiente para atender ao fluxo estabelecido.

A estrutura dos sistemas dutoviários é constituída por diferentes topologias, as quais têm sido amplamente estudadas nos últimos anos e podem aumentar significativamente a complexidade do planejamento do transporte (Li *et al.*, 2021). Na FIGURA 1, estão ilustradas 4 topologias encontradas, classificadas por Magatão *et al.* (2012). São elas: duto único com uma origem e um destino (1(a)), duto único com uma origem e múltiplos destinos (1(b)), duto único com múltiplas origens e múltiplos destinos (1(c)) e rede de dutos com múltiplas origens e múltiplos destinos (1(d)).

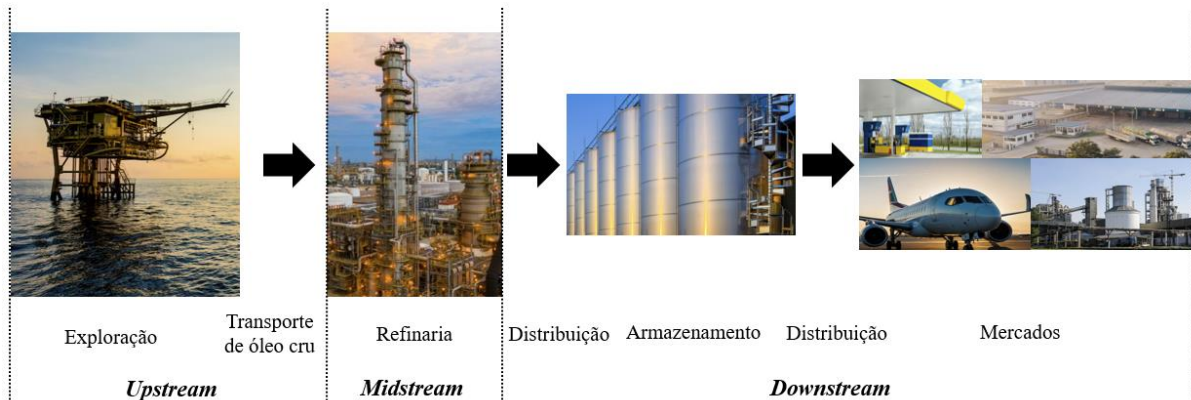
FIGURA 1 – TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DUTOVIÁRIOS



Fonte: Adaptado de Magatão *et al.* (2012).

De acordo com Sahebi, Nickel e Ashayeri (2014), a cadeia de produção de petróleo pode ser dividida em três segmentos: *upstream* (da exploração do petróleo até a sua distribuição às refinarias), *midstream* (recepção de petróleo cru e transformação em produtos derivados) e *downstream* (armazenamento e distribuição dos produtos refinados aos mercados). A segmentação é ilustrada pela FIGURA 2.

FIGURA 2 – SEGMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA



Fonte: Adaptado de Lima, Relvas e Barbosa-Póvoa (2016).

Entretanto, conforme será detalhado na seção 2.7, o trabalho de Shah (1996) adota uma segmentação sutilmente diferente, entendendo como *upstream* a porção que inclui o porto e os tanques de armazenamento portuários e como *downstream* a porção que engloba os tanques localizados na refinaria e as CDUs.

## 2.2 PROBLEMA DO SEQUENCIAMENTO NO TRANSPORTE DE PETRÓLEO E DERIVADOS EM DUTOVIAS

Os sistemas dutoviários constituem uma das principais formas de movimentação de petróleo e produtos derivados desde os portos até os consumidores. O transporte nas dutovias multiprodutos é frequentemente estruturado em lotes e o sequenciamento compreende etapas de planejamento e preparação de lotes, rastreamento de movimentos e monitoramento das operações (Tu *et al.*, 2024).

De acordo com Reklaitis (1996), sempre que há concorrência por recursos limitados disponíveis apenas em um intervalo finito de tempo, assim como o do transporte em dutovias multiprodutos, tem-se um problema de *scheduling*. A alocação dos recursos corretos, o sequenciamento das atividades e o monitoramento temporal das atividades são os principais pontos abordados e a serem definidos pelo *scheduling* (Reklaitis, 1996).

As técnicas de *scheduling* são aplicadas em dutovias para possibilitar a obtenção detalhada de informações relativas à origem, destino e quantidade de cada lote, assim como a sequência em que as entradas e saídas de produtos nos dutos ocorrem e os horários dessas movimentações (Hane; Ratliff, 1995).

O *scheduling* de malhas dutoviárias pode ser bastante complexo, visto que envolve a avaliação de um grande número de variáveis que buscam atender à diversas restrições modeladas pelas características particulares deste tipo de transporte (Boschetto *et al.*, 2010). Então, diferentes ferramentas têm sido utilizadas visando a otimização do *scheduling*, como a modelagem matemática, heurísticas e meta-heurísticas (Meira *et al.*, 2021).

## 2.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA MISTA (PLIM)

A programação linear (PL) é o meio pelo qual diferentes problemas de decisão são abordados com a construção de modelos matemáticos que descrevem a relação linear entre diferentes componentes do sistema. Ela pode ser usada para solucionar problemas de diversas áreas, como em indústrias, setores governamentais, econômicos ou de engenharia (Dantzig, 1963).

O resultado almejado pela PL é encontrar o planejamento de atividades que alcance o valor ótimo global em um conjunto de alternativas possíveis definidas pelas equações matemáticas lineares modeladas (Hillier; Lieberman, 2010).

Enquanto a programação linear inteira (PLI) é a PL que permite variáveis com valores apenas inteiros, a programação linear inteira mista (PLIM) admite valores inteiros ou contínuos (Hillier; Lieberman, 2010).

Segundo Hooker (2011), é possível aplicar a PLIM para otimização de diversos problemas que possuem variáveis contínuas e discretas. Sua forma genérica contém uma função objetivo (equação a), inequações que restringem as variáveis a certos valores (b) e intervalos de factibilidade para cada variável (c). Nestas expressões,  $x$  e  $y$  são os conjuntos de variáveis, sendo  $x$  pertencendo aos inteiros positivos e  $y$  aos reais positivos. As matrizes com valores constantes são representadas por  $A$  e  $G$ , enquanto  $c, h$  e  $b$  são vetores também de constantes definidas. Ainda, pode-se adicionar à modelagem PLIM, variáveis binárias (que recebem valores 1 ou 0) para representar escolhas entre várias alternativas possíveis, aumentando a sua aplicabilidade (Nemhauser; Wolsey, 1988).

$$\begin{aligned}
& \max cx + hy & (a) \\
& s. a. Ax + Gy \leq b & (b) \\
& x \in Z_+, y \in R_+ & (c)
\end{aligned}$$

O fator temporal é um complicador relevante nos problemas de *scheduling* e sua representação nos modelos matemáticos pode ser dividida em duas categorias: discreta ou contínua. No primeiro grupo, o tempo é dividido em períodos fixos, enquanto no segundo o período é variável e os intervalos temporais podem assumir diferentes valores (Bueno, 2015).

Conforme pesquisa realizada por Li *et al.* (2021), modelos PLIM constituem uma das estratégias clássicas para a resolução de problemas de *scheduling*, tanto com representação temporal discreta quanto contínua, permitindo a obtenção de soluções ótimas globais. Entretanto, as restrições de recursos materiais e temporais destes problemas possuem uma quantidade elevada de informações e, consequentemente, apresentam alta complexidade computacional (Reklaitis, 1996).

## 2.4 HORIZONTE ROLANTE

A estratégia de horizonte rolante pode ser entendida como uma decomposição temporal aplicada à otimização dinâmica de problemas com longos horizontes de planejamento (Meira *et al.*, 2018). Essa abordagem é utilizada em diferentes contextos (como o *scheduling* de transporte em dutovias, o dimensionamento de lotes, o planejamento da cadeia de suprimentos e outros), nos quais o modelo que engloba todo o período de planejamento torna-se excessivamente grande e computacionalmente inviável de ser resolvido integralmente. Além disso, essa estratégia pode ser empregada em situações nas quais a demanda ao longo do horizonte de planejamento é incerta, permitindo ajustar os períodos otimizados conforme as informações disponíveis (Glomb, Liers e Rösel, 2022).

Um dos estudos que aplicam o horizonte rolante para gerar o planejamento agregado de uma dutovia que conecta uma origem a diferentes destinos é o de Cafaro e Cerdá (2008). Neste, a estratégia de decomposição é utilizada com o objetivo de viabilizar o *scheduling* dinâmico em horizontes mais longos, considerando atualizações de demanda ou modificações nas quantidades produzidas nas refinarias ao longo do período de planejamento. Para isso, o processo é estruturado em etapas



de inicialização, atualização de dados, *rescheduling* (ou reprogramação), detalhamento da programação e atualização do período de programação. Na etapa inicial, são inseridos os dados da dutovia e as informações necessárias para o início do planejamento. A segunda etapa corresponde à atualização do cenário da dutovia com base no período previamente planejado (ou, no caso do primeiro período, à inserção das condições iniciais do sistema), refletindo sua situação atual. Após, ocorre a etapa de *rescheduling*, na qual o modelo PLIM é utilizado para estabelecer a programação agregada da dutovia no período de análise do horizonte rolante, gerando, na etapa seguinte, a programação detalhada do período fixado. Por fim, o período fixado é incrementado e o ciclo é reiniciado na segunda etapa, com a atualização do cenário da dutovia a partir do *scheduling* obtido.

Em estudo posterior, Cafaro *et al.* (2011) partem do planejamento agregado desenvolvido na abordagem de Cafaro e Cerdá (2008) para obter o *scheduling* operacional detalhado das entregas em cada destino, considerando a inserção de novos lotes na dutovia. Para a resolução do problema, são propostas duas metodologias: 1) otimização por meio de um modelo PLIM; e 2) simulação de eventos discretos combinada com heurísticas. Dado o crescimento significativo do tamanho do modelo PLIM com o aumento do número de lotes planejados no *scheduling* agregado, os autores também avaliam seu desempenho a partir de resoluções decompostas. A decomposição é executada aplicando o modelo matemático sequencialmente para cada lote planejado ou, em uma segunda proposta, utilizando o conceito de horizonte rolante, no qual o modelo PLIM gera o planejamento do lote fixado, mas considera as operações de entrega necessárias para o lote subsequente. Os testes realizados demonstram a capacidade dessa segunda estratégia de produzir resultados muito próximos do ótimo em tempo computacional reduzido, mesmo em horizontes de planejamento mais longos.

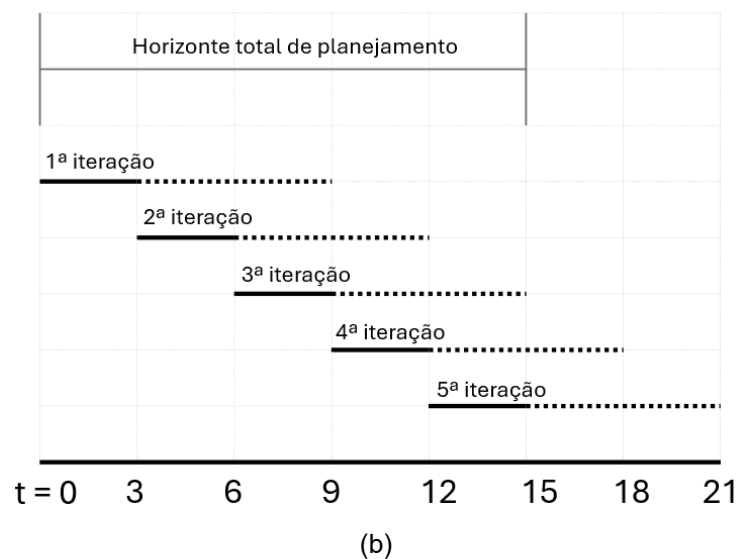
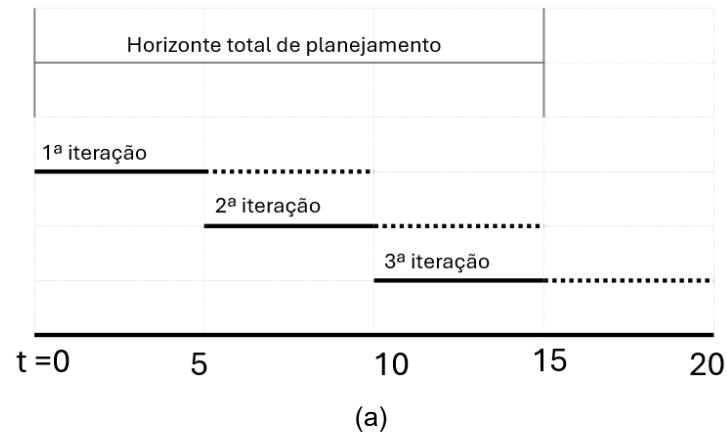
Meira *et al.* (2018) também utilizam o conceito de horizonte rolante para obter o *scheduling* detalhado de uma dutovia que conecta uma refinaria a múltiplos centros de distribuição. Os autores propõem a integração de heurísticas e modelos matemáticos em uma abordagem decomposta, capaz de lidar tanto com aspectos operacionais complexos quanto com horizontes de planejamento extensos. A abordagem proposta é estruturada em dois módulos principais: 1) alocação e sequenciamento; e 2) *scheduling*. O primeiro é responsável pelo sequenciamento dos lotes inseridos na dutovia, incluindo a definição dos produtos, volumes e taxas de

vazão. Para isso, um modelo PLIM é formulado e resolvido iterativamente, empregando decomposição temporal a partir da estratégia de horizonte rolante. O segundo módulo, por sua vez, detalha o *scheduling* das entregas nos centros de distribuição, utilizando uma decomposição estrutural da rede e um modelo PLIM central. Em ambos os módulos, heurísticas são aplicadas no pré-processamento dos dados necessários para execução dos modelos matemáticos. A avaliação da proposta é realizada por meio de testes que consideram instâncias ilustrativas além de uma rede real de dutos. Os resultados obtidos evidenciam a eficiência da abordagem apresentando tempos computacionais viáveis mesmo em cenários complexos.

Para implementação da estratégia de horizonte rolante, o horizonte total de planejamento é dividido em intervalos contendo  $N$  períodos e cada iteração do algoritmo compreende um subconjunto de  $D$  intervalos consecutivos. Após cada iteração, os resultados referentes a um ou mais intervalos são fixados, de modo que não serão incluídos ou reotimizados na iteração subsequente.

A FIGURA 3 ilustra a lógica de aplicação em um exemplo de *scheduling* com horizonte total de planejamento de 15 períodos. No exemplo (a), o horizonte é dividido em intervalos com  $N = 5$  períodos e cada iteração abrange  $D = 2$  intervalos, sendo apenas o primeiro fixado após a otimização (representado pela linha contínua na imagem). Já no exemplo (b), as iterações são constituídas por  $D = 3$  intervalos de  $N = 3$  períodos cada, também com o primeiro fixado. Dessa forma, para otimização do *scheduling* em todo o horizonte de planejamento, serão realizadas 3 iterações para o exemplo (a) e 5 iterações para o (b).

FIGURA 3 – HORIZONTE ROLANTE



Fonte: Adaptado de Meira *et al.* (2018).

De forma mais detalhada, a primeira iteração do exemplo (a) da FIGURA 3 considera o estoque inicial inserido como parâmetro e realiza a otimização dos primeiros 10 períodos do horizonte de planejamento. Entretanto, como é fixado apenas um intervalo (linha contínua destacada na figura), somente o *scheduling* correspondente aos primeiros 5 períodos é incorporado na solução final. Para a segunda iteração, são atualizados os estoques iniciais de acordo com os estoques finais obtidos para o último período fixado da iteração anterior. Em seguida, o modelo matemático otimiza do quinto ao décimo quinto período, agregando à solução final o resultado associado ao novo intervalo fixado. Posteriormente, ocorre uma nova atualização dos estoques iniciais para a terceira, e última, iteração, responsável por completar a solução final para o horizonte de planejamento considerado. Nessa etapa, o modelo incorpora previsões de chegadas e demandas futuras referentes aos

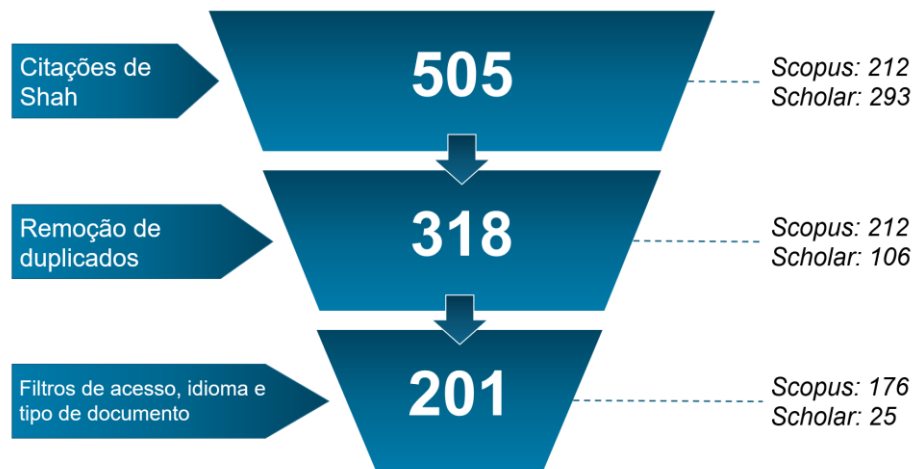
períodos 15 a 20, constituindo um diferencial da estratégia de horizonte rolante que incorpora dados futuros para assegurar a continuidade do *scheduling*. Finalizada a terceira iteração, a solução final é dada com o *scheduling* programado para o horizonte de 15 períodos estabelecido inicialmente.

## 2.5 ANÁLISE DE CITAÇÕES DE SHAH (1996)

Dada a relevância do estudo de Shah (1996) para a área da otimização do transporte de petróleo e produtos derivados por dutos, esta seção tem como objetivo verificar as contribuições já realizadas ao modelo proposto pelo autor, buscando identificar melhorias propostas em relação à sua eficiência ou aos resultados gerados. Para isso, a pesquisa foi conduzida utilizando as bases de dados *Scopus* e *Google Scholar*, considerando documentos em inglês classificados como artigos de periódicos, trabalhos apresentados em conferências ou produções acadêmicas (como teses e dissertações) que citem o estudo de Shah (1996). Além disso, foram incluídos apenas documentos com acesso integral.

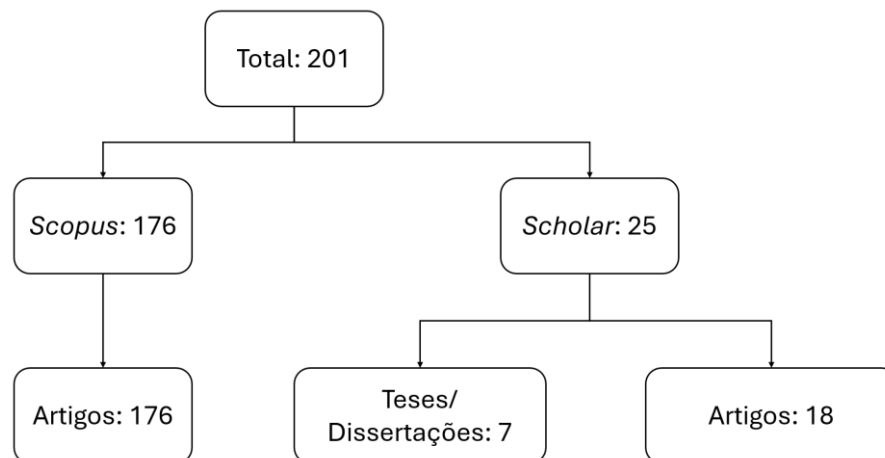
Até a data da pesquisa (junho de 2025), foi identificado um total de 505 trabalhos que citam o estudo de Shah (1996), sendo 212 provenientes da base *Scopus* e 293 da base *Google Scholar*. Como não foi fixada data inicial, a pesquisa inclui todas as citações desde a publicação de Shah (1996). Após a remoção dos documentos duplicados, obteve-se um total de 318 registros. Em seguida, aplicaram-se filtros relacionados ao idioma e ao tipo de documento, além da verificação de acesso, resultando em 194 artigos (das duas bases) e sete teses ou dissertações, totalizando 201 documentos. Os resultados da pesquisa estão resumidos na FIGURA 4 e na FIGURA 5.

FIGURA 4 – PROCESSO DE SELEÇÃO DE CITAÇÕES DE SHAH (1996)



Fonte: A autora (2025).

FIGURA 5 – COMPOSIÇÃO DAS CITAÇÕES SELECIONADAS



Fonte: A autora (2025).

Dentre os 201 documentos avaliados, a grande maioria faz referência ao trabalho de Shah (1996) de forma complementar na revisão da literatura, reconhecendo-o como um estudo pioneiro na área e usando-o para exemplificar trabalhos que empregam métodos de programação inteira linear com discretização temporal para modelar o problema de sequenciamento do transporte de petróleo e produtos derivados por dutos. Além disso, três documentos (Luo e Rong, 2007; Chunpeng e Gang, 2009; Fagundez, Xavier e Faco, 2009) utilizaram alguma característica de modelagem apresentada pelo autor, fazendo referência aos tanques

de armazenamento ou a alguma restrição isolada para fundamentar suas próprias abordagens.

Entretanto, nenhum desses estudos aprofundou-se na modelagem completa de Shah (1996), tampouco analisou o *scheduling* resultante ou avaliou sua efetividade na resolução do problema. Em outras palavras, limitaram-se a citar o modelo de Shah, sem examinar criticamente suas premissas fundamentais ou sugerir aprimoramentos à formulação original.

Nesse contexto, o presente trabalho visa preencher essa lacuna ao realizar uma análise detalhada do modelo, identificando suas limitações e propondo ajustes em três níveis: primeiramente, por meio da unificação dos modelos originalmente apresentados por Shah (1996), em segundo lugar, aprimorando essa unificação com a adição de novas restrições e, finalmente, propondo uma estratégia de resolução com horizonte rolante como terceira etapa. O objetivo é fortalecer a robustez das soluções geradas e ampliar sua aplicabilidade em contextos mais próximos aos reais, mantendo a coerência com os princípios originais da modelagem do autor.

## 2.6 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Nesta seção é abordada uma revisão sistemática da literatura (RSL), a qual foi realizada com objetivo de verificar o estado dos estudos e como o problema de *scheduling* de transporte de petróleo ou produtos derivados em dutovias é abordado. Para tanto, será apresentado o protocolo de pesquisa adotado e os estudos correlatos obtidos como resultado.

### 2.6.1 Protocolo de pesquisa

Para entender o panorama atual de pesquisas na área, foi realizada uma pesquisa nas bases *Scopus* e *Web of Science* seguindo o protocolo apresentado na TABELA 1. Nesta etapa, a principal pergunta de pesquisa a ser respondida é:

- Como o problema do *scheduling* do transporte de petróleo e derivados por dutovias é abordado atualmente e quais as estratégias de resolução?

TABELA 1 – PROTOCOLO PARA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

<b>Protocolo de Pesquisa</b>	
<b>Área da Pesquisa:</b>	Otimização de transporte de petróleo e derivados por dutos multiprodutos
<b>Palavras-chave:</b>	<i>"pipeline"</i> <i>"scheduling"</i> <i>"petroleum"</i> <i>"petrochemical industry"</i> <i>"oil"</i> <i>"multiproduct"</i> <i>"multi-product"</i>
<b>Base:</b>	Scopus e Web of Science
<b>Estratégia de busca final:</b>	<i>"pipeline" and "scheduling" and ("petroleum" or "petrochemical industry" or "oil" or "multiproduct" or "multi-product")</i>
<b>Campos de pesquisa:</b>	Título, Resumo ou Palavras-chave
<b>Idioma:</b>	Inglês
<b>Período:</b>	janeiro/2023 a junho/2025
<b>Local de publicação:</b>	Periódicos de acesso aberto ou por assinatura (com acesso à instituição), excluindo outros documentos
<b>Filtros de exclusão:</b>	Duplicidade e artigos cujo tema central não seja a otimização de transporte petróleo ou derivados por oleodutos multiprodutos

FONTE: A autora (2025).

No protocolo, foram destacadas as palavras-chave ligadas ao objeto de estudo: dutos, petróleo, indústria petroquímica, óleo, multiprodutos. Com base em diversos testes de buscas iniciais, concluiu-se que a concatenação utilizada na *string* apresentada no campo “Estratégia de busca final” foi a que trouxe melhores resultados e possibilitou a seleção adequada de artigos, no que diz respeito ao tema central de pesquisa.

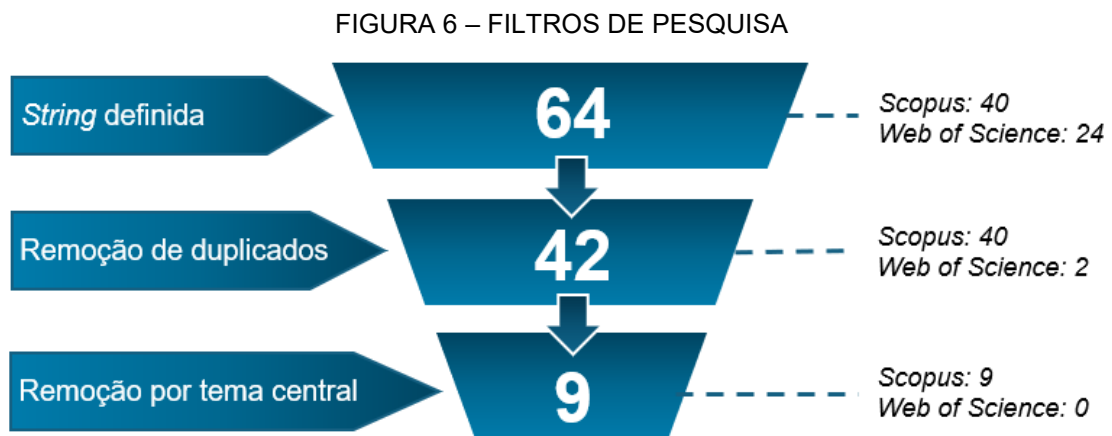
Foram adicionados filtros de campo de pesquisa (palavras-chave selecionadas deveriam estar contidas no título, resumo ou como palavras-chave dos artigos), de idioma (inglês) e de local de publicação (artigos de periódicos). Em adição, o filtro referente ao período foi aplicado considerando publicações posteriores a janeiro de 2023 até a data de desenvolvimento deste trabalho (junho de 2025), constituindo uma varredura aprofundada nos documentos mais atuais.

Em adição, foram excluídos do levantamento os artigos duplicados ou cujo tema central de estudo não condizia com a pergunta de pesquisa abordada neste trabalho.

### 2.6.2 Condução do levantamento e delimitação para RSL

As consultas nas bases foram iniciadas de acordo com as informações contidas no protocolo apresentado, e as palavras-chave foram incluídas de modo a filtrar os artigos que mais se encaixassem com o objetivo do trabalho.

Conforme ilustrado pela FIGURA 6, a *string* definida resultou em 40 documentos da base *Scopus* e 24 da *Web of Science*. Após a remoção de duplicados, o total foi reduzido para 42 artigos. Destes, apenas 9 foram selecionados para constituir o grupo de trabalhos correlatos, uma vez que apresentaram tema central alinhado com esta pesquisa.



Fonte: A autora (2025).

### 2.6.3 Trabalhos correlatos

A seguir, os nove artigos correlatos selecionados são brevemente expostos com foco na abordagem de resolução adotada para o *scheduling* do transporte por dutovias.

Diversos estudos têm empregado técnicas de pesquisa operacional para otimizar o transporte e o *scheduling* de dutos, com ênfase predominante em um único segmento da cadeia. O estudo de Bamoumen *et al.* (2023) é um dos estudos que



aborda o segmento *downstream*. Os autores comparam uma formulação PLIM com a meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*). O estudo foca em um problema de transporte via duto linear, no qual uma refinaria atua como origem e um centro de distribuição como destino. O algoritmo GRASP inclui uma heurística construtiva para gerar uma sequência inicial de lotes, uma etapa de avaliação para garantir a factibilidade da solução frente às restrições do problema e um procedimento de melhoria voltado à otimização dos volumes dos lotes para maximizar o total transportado. Os resultados indicam que a meta-heurística apresenta desempenho significativo, oferecendo soluções de alta qualidade com tempo de processamento reduzido.

A incerteza em parâmetros-chave, como demanda, custos de inventário e salários da equipe, aumenta a complexidade do *scheduling* de dutos, conforme explorado por Goudarzi, Maleki e Niroomand (2023). Com foco em um sistema que conecta uma refinaria a um centro de distribuição, os autores propõem um modelo PLIM que incorpora incertezas com base em graus de confiança, utilizando distribuições de incerteza. Para viabilizar a aplicação de técnicas de otimização sobre o modelo estocástico, os autores o convertem em três versões determinísticas distintas: o modelo de valor esperado, modelo com restrições de chance e um modelo híbrido que combina os dois anteriores. Essas abordagens são testadas em um estudo de caso adaptado da literatura, com parâmetros incertos definidos com base na opinião de especialistas. A análise de sensibilidade demonstra variação nos valores da função objetivo entre as técnicas, com o modelo com restrições de chance apresentando a maior amplitude de resultados.

Xu *et al.* (2023) propõem um modelo PLIM para o *scheduling* de dutos multiprodutos lineares com múltiplas origens e centros de distribuição, visando minimizar o custo total associado à contaminação entre produtos durante a operação. O modelo integra três categorias de restrições: controle operacional, controle de vazão e controle de paradas. As restrições operacionais garantem o envio dos produtos (puros e contaminados) às instalações corretas. O controle de vazão regula o movimento das interfaces, prevenindo a propagação da contaminação, e o controle de paradas assegura que, durante interrupções, as interfaces estejam posicionadas de forma a evitar aumento na contaminação devido às condições geográficas. O modelo é validado por meio de três casos reais na China, demonstrando redução significativa no número de paradas e na probabilidade de posicionamento inadequado

das interfaces, o que resulta em custos operacionais relacionados ao volume contaminado inferiores aos das práticas atuais.

Com o objetivo de aprimorar a gestão da logística de produtos refinados na China, Wei *et al.* (2024) desenvolvem um modelo de *scheduling* diário que integra dois submodelos matemáticos. O primeiro é direcionado às decisões logísticas, determinando o modal de transporte mais eficiente com base em restrições de balanceamento, capacidade de transporte e de armazenamento. Já o segundo submodelo foca no *scheduling* dos dutos, incorporando rastreamento de lotes, restrições de fluxo, condições operacionais dos dutos e outros fatores relevantes. A estratégia é testada em um sistema logístico com múltiplas refinarias e depósitos, utilizando transporte por duto, rodovia e ferrovia. A abordagem proposta apresenta uma redução substancial nos custos totais de transporte em comparação ao método operacional atual utilizado.

Li *et al.* (2024a) abordam o *scheduling* de dutos multiprodutos sob um modelo orientado ao mercado, no qual as empresas operadoras são responsáveis por gerenciar os dutos e garantir uma alocação justa de capacidade entre múltiplos usuários. Os autores propõem uma estratégia composta por três módulos: coleta e conversão das demandas, desenvolvimento de um modelo matemático voltado à definição do tamanho e sequência dos lotes com objetivo de minimizar custos de contaminação e de alternância de bombas e, por fim, geração de um cronograma detalhado alinhado às exigências operacionais e de mercado. O método é testado com dados reais de sistemas dutoviários chineses com configurações de origem única e múltiplas. Os resultados indicam aumento na satisfação dos usuários, melhor rastreamento dos lotes, maior estabilidade operacional e redução nos custos de contaminação.

A otimização do *scheduling* de bombas em sistemas de dutos multiprodutos de grande escala, os quais transportam produtos refinados até os mercados finais, também foi abordada por Shao *et al.* (2024) com o objetivo de minimizar os custos totais de bombeamento. Considerando a complexidade do problema, os autores desenvolveram um modelo de programação linear inteira com discretização temporal e aplicaram um método de aprendizado por reforço (algoritmo *Proximal Policy Optimization*) com modelagem do espaço de ações. Diferentes testes realizados demonstraram a efetividade do método proposto, com melhorias substanciais na

eficiência computacional e na qualidade das soluções em comparação a outros métodos, como o algoritmo genético e o algoritmo de colônia de formigas.

Já para o segmento *upstream*, que compreende a extração e distribuição do petróleo bruto às CDUs, pode-se destacar trabalhos como o de Zimberg, Ferreira e Camponogara (2023). Nesse estudo, os autores estendem o problema de *scheduling* e processamento do petróleo bruto ao incluir etapas de recebimento, mistura e entrega dos produtos por meio de dutos até a refinaria e a CDU. As melhorias propostas têm como base modelos anteriores da literatura e incluem características específicas de operação dos dutos, como intervenções de manutenção para viabilizar a obtenção de um *scheduling* que assegure a qualidade desejada para os produtos no destino. Para isso, é apresentado um modelo PNLIM que pode ser resolvido, dependendo do caso, eliminando termos bilineares presentes no modelo ou aplicando a heurística *Relax and Fix* para reduzir o tempo de processamento.

Qin *et al.* (2025) apresentam um modelo PLIM com tempo discreto para o *scheduling* do petróleo bruto também no segmento *upstream*, considerando refinarias costeiras, com foco nos atrasos associados aos sistemas de dutos de longa distância. O modelo incorpora características operacionais detalhadas, incluindo múltiplos dutos, diversos tanques de armazenamento e várias CDUs, permitindo o fornecimento simultâneo de diferentes tanques a uma única CDU. Para mitigar o custo computacional, os autores utilizam um preditor baseado em aprendizado supervisionado, o qual reduz o espaço de busca combinatório das variáveis binárias. Experimentos numéricos com dados reais demonstram a efetividade do modelo proposto.

Estabelecendo uma conexão entre os segmentos *upstream* e *downstream*, Li *et al.* (2024b) investigam o problema do *scheduling* em redes de dutos multiprodutos com múltiplas origens e destinos, propondo um modelo matemático em duas etapas, apoiado por um método dinâmico de numeração de lotes. Essa abordagem permite rastrear os lotes com precisão, adaptando seus identificadores conforme os caminhos percorridos na rede. Para gerenciar o processo de *scheduling*, o modelo de otimização é dividido em duas etapas. A primeira visa minimizar os custos de mistura no segmento *upstream*, otimizando o planejamento dos lotes. Já a segunda etapa utiliza os resultados da etapa anterior, como os tempos de operação e níveis de inventário, para programar a distribuição no segmento *downstream*, também visando reduzir os

custos de interfaces. A abordagem é validada com dois sistemas reais de dutos na China, demonstrando sua eficiência.

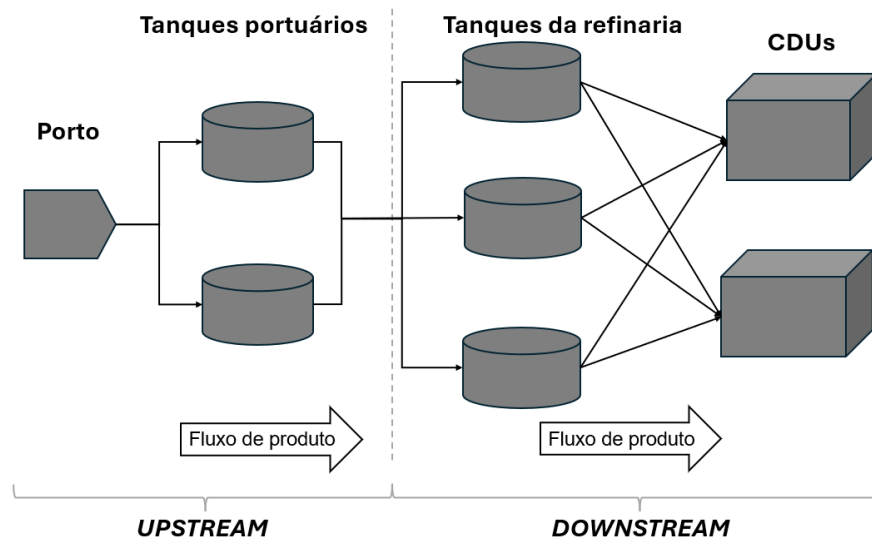
Assim, observa-se que há diversos estudos recentes que abordam o problema do *scheduling* do transporte de petróleo e produtos derivados por dutos, apresentando diferentes objetivos e estratégias de resolução. É possível identificar, também, semelhanças entre o trabalho de Shah (1996) e os estudos citados, como o uso da modelagem matemática, especialmente a programação linear inteira mista, a otimização de segmentos específicos do sistema de dutos, a adoção de abordagens hierárquicas para resolução e técnicas de modelagem para restrições específicas. As semelhanças e a visão geral proporcionada pela breve descrição dos trabalhos recentes ressaltam a influência contínua do trabalho de Shah (1996) na pesquisa contemporânea da área.

## 2.7 MODELO DE SHAH (1996)

O modelo apresentado por Shah (1996) constitui um exemplo de PLIM aplicado ao problema do transporte de petróleo e seus derivados por meio de dutos. O modelo considera a distribuição desses produtos desde o recebimento no porto até sua chegada às CDUs, dividindo todo o trajeto em dois segmentos, denominados pelo autor como *upstream* e *downstream*.

O segmento *upstream* abrange os dutos que transportam o petróleo descarregado no porto até os tanques de armazenamento iniciais, bem como os dutos que conectam os tanques portuários aos tanques localizados nas refinarias. A porção *downstream* inclui os dutos que partem do ponto de interseção e seguem pelos tanques da refinaria até as CDUs (FIGURA 7).

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DOS SEGMENTOS *UPSTREAM* E *DOWNSTREAM* UTILIZADOS EM SHAH (1996)



Fonte: Adaptado de Shah (1996).

Shah (1996) propõe modelos matemáticos distintos para cada um desses segmentos, sendo que a implementação para o *scheduling* do transporte desde o porto até as CDUs inicia-se pelo modelo do segmento *downstream*. Como primeiro passo, é necessário fornecer os dados ao modelo, tais como: número de tanques no porto, tanques da refinaria e CDUs, a demanda por cada tipo de petróleo em cada CDU, as vazões mínimas e máximas dos dutos, as capacidades máximas dos tanques e as chegadas de produtos ao porto, incluindo seus volumes e períodos de descarga. Os resultados obtidos por esse modelo são utilizados como parâmetros para a resolução do modelo da porção *upstream*.

### 2.7.1 Modelo *downstream*

O modelo do segmento *downstream* é o primeiro a ser implementado e fornece informações sobre o *scheduling* dos dutos dessa porção, os níveis de inventário dos tanques e as entregas detalhadas às CDUs.

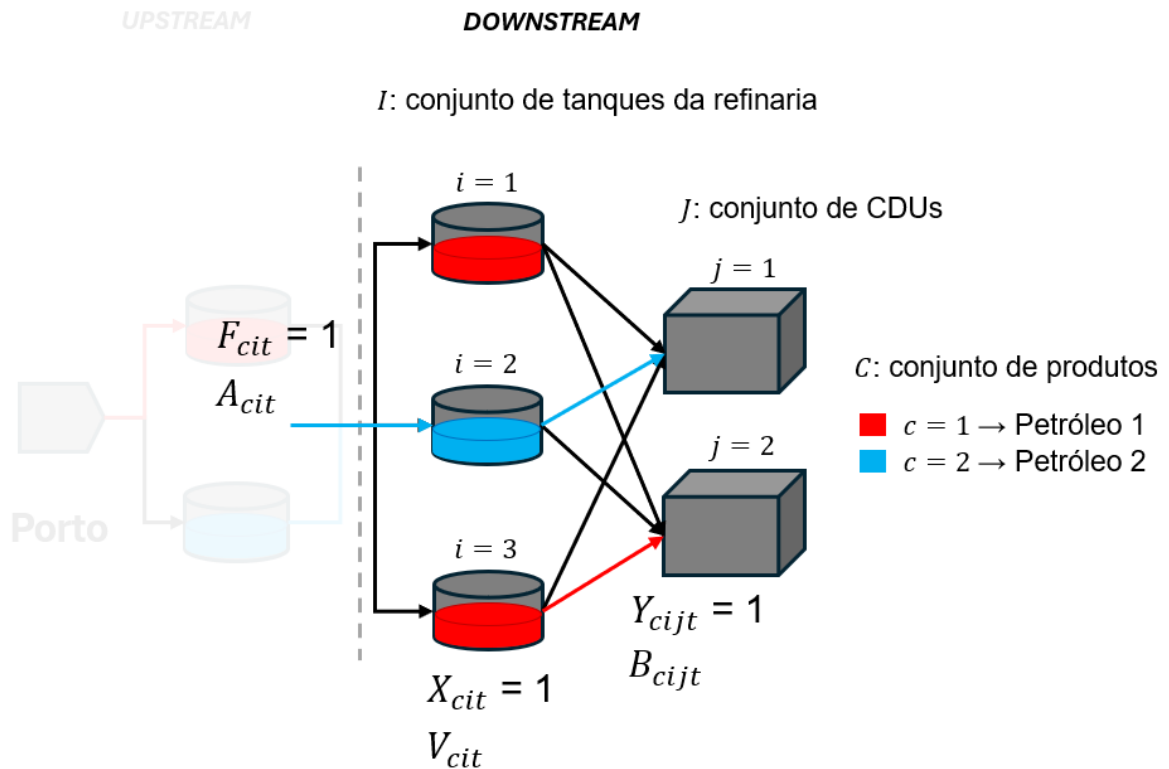
Os conjuntos e variáveis deste modelo são definidos da seguinte forma:

- $c \in C$ : conjunto de produtos (diferentes tipos de petróleo);
- $i \in I$ : conjunto de tanques da refinaria;
- $j \in J$ : conjunto de CDUs;
- $t \in T$ : conjunto de períodos contidos no horizonte de planejamento;

- $F_{cit} = 1$  se o petróleo tipo  $c$  é bombeado para o tanque  $i$  no período  $t$ ; 0 caso contrário;
- $A_{cit}$ : quantidade de petróleo tipo  $c$  bombeada para o tanque  $i$  no período  $t$ ;
- $X_{cit} = 1$  se o petróleo tipo  $c$  é armazenado no tanque  $i$  no período  $t$ ; 0 caso contrário;
- $V_{cit}$ : quantidade de petróleo tipo  $c$  armazenado no tanque  $i$  no período  $t$ ;
- $Y_{cijt} = 1$  se o petróleo tipo  $c$  é enviado do tanque  $i$  para a CDU  $j$  no período  $t$ ; 0 caso contrário;
- $B_{cijt}$ : quantidade de petróleo tipo  $c$  enviado do tanque  $i$  para a CDU  $j$  no período  $t$ ;
- $H_{cit}$ : sobra do petróleo tipo  $c$  no tanque  $i$  no período  $t$ .

A FIGURA 8 ilustra um exemplo de configuração do segmento *downstream*, representando as variáveis e conjuntos do modelo.

FIGURA 8 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DO SEGMENTO *DOWNSTREAM*



FONTE: A autora (2025).

A restrição (1) garante a continuidade do fornecimento, assegurando que em todos os períodos todas as CDUs estejam recebendo um tipo de petróleo de um dos tanques. Ou seja, a soma da variável que define qual tanque envia produto à CDU  $j$  será igual a um em todos os períodos, pois as CDUs sempre receberão petróleo de um dos tanques.

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} Y_{cijt} = 1 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (1)$$

Cada tanque pode realizar apenas uma operação por período: recebimento de produto do segmento upstream ( $F_{cit}$ ), envio de petróleo a alguma CDU ( $Y_{cijt}$ ) ou permanecer estacionário sem receber nem enviar petróleo. A inequação (2) é estabelecida para atender a essa premissa, garantindo que a soma das variáveis binárias que representam essas movimentações não ultrapasse o valor um em cada período.

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} Y_{cijt} + \sum_{c \in C} F_{cit} \leq 1 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (2)$$

A equação (3) garante que, em todos os períodos, um dos tanques sempre receberá um tipo de produto do segmento *upstream*, a fim de manter a continuidade no fornecimento.

$$\sum_{c \in C} \sum_{i \in I} F_{cit} = 1 \quad \forall t \in T \quad (3)$$

Cada tanque pode armazenar apenas um tipo de petróleo por período. Essa condição é atendida pela restrição (4), a qual estabelece que a soma da variável que determina se há algum produto em estoque no tanque  $i$  ( $X_{cit}$ ) seja menor ou igual a um em todos os períodos, visto que os tanques também podem ficar vazios.

$$\sum_{c \in C} X_{cit} \leq 1 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4)$$

A equação (5) é responsável pelo balanceamento de estoque, e, dependendo dos valores adotados para  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , e  $\delta$ , considera quantidades de produto recebidas e enviadas de cada tanque durante o período anterior e o atual. Dessa forma, o estoque

ao final no período  $t$  ( $V_{cit}$ ) é determinado pela quantidade de produto armazenado no período anterior ( $V_{ci,t-1}$ ), acrescida dos volumes recebidos ( $A_{ci,t-1}$  e  $A_{cit}$ ) e reduzida dos volumes enviados ( $B_{cij,t-1}$  e  $B_{cijt}$ ), conforme a influência exercida pelos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , e  $\delta$ . Para a implementação computacional da restrição, é necessário adicionar o condicional  $t > 1$  aos quantificadores devido às variáveis indexadas em  $t - 1$ .

$$V_{cit} = V_{ci,t-1} + \alpha A_{ci,t-1} + \beta A_{cit} - \sum_{j \in J} (\gamma B_{cij,t-1} + \delta B_{cijt}) \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T \quad (5)$$

As restrições (6), (7) e (8) representam os limites mínimos e máximos do sistema para a vazão dos dutos ( $P_c^{min}$  e  $P_c^{max}$ ), para as taxas de recebimento das CDUs ( $D_{cj}^{min}$  e  $D_{cj}^{max}$ ) e para a capacidade de armazenamento dos tanques ( $S_{ci}^{max}$ ).

$$P_c^{min} F_{cit} \leq A_{cit} \leq P_c^{max} F_{cit} \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T \quad (6)$$

$$D_{cj}^{min} Y_{cijt} \leq B_{cijt} \leq D_{cj}^{max} Y_{cijt} \quad \forall c \in C, i \in I, j \in J, t \in T \quad (7)$$

$$V_{cit} \leq S_{ci}^{max} X_{cit} \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T \quad (8)$$

A sobra ( $H_{cit}$ ) é definida como a quantidade remanescente de petróleo em um tanque após a transferência de produto deste tanque a uma CDU ter sido finalizada. A inequação (9) permite o cálculo da quantidade de sobra de cada período a partir do volume restante em estoque ( $V_{cit}$ ) sempre que a variável  $Y_{cijt}$  assumir valor um no período  $t$  e zero no período  $t + 1$ . Ainda, de modo análogo ao realizado para a restrição (5), a implementação da restrição (9) requer a inclusão de condicional ao quantificador temporal, definido como  $t < |T|$ , visto a variável indexada em  $t + 1$ .

$$H_{cit} \geq V_{cit} - S_{ci}^{max} (1 - \sum_{j \in J} Y_{cijt} + \sum_{j \in J} Y_{cij,t+1}) \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T \quad (9)$$

A restrição (10) garante que a soma dos volumes enviados às CDUs em todos os períodos ( $B_{cijt}$ ) atenda às demandas determinadas para cada produto ( $Q_{cj}^{min}$ ).

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} B_{cijt} \geq Q_{cj}^{min} \quad \forall c \in C, j \in J \quad (10)$$



Por fim, a função objetivo do modelo *downstream* (11) busca minimizar a quantidade total de sobra.

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} H_{cit} \quad (11)$$

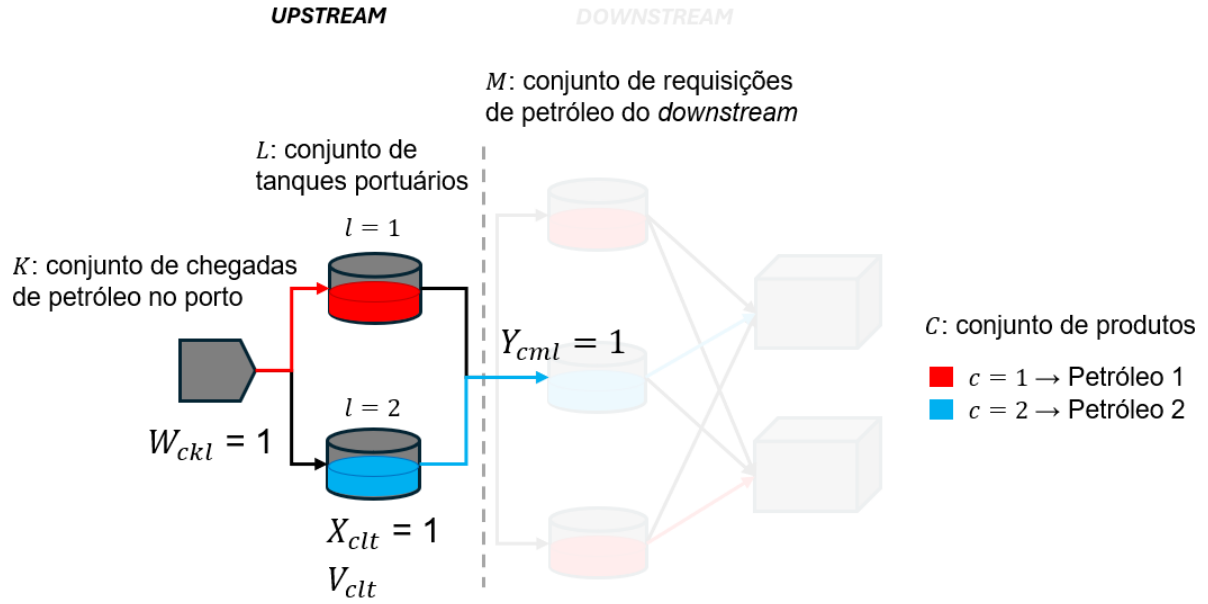
### 2.7.2 Modelo *upstream*

Após a execução do modelo *downstream*, o modelo *upstream* é implementado. Para isso, o modelo utiliza como parâmetro as quantidades bombeadas para cada tanque ( $A_{cit}$ ) dadas pelo modelo anterior e fornece como resultado os movimentos detalhados dos estoques dos tanques portuários. Shah (1996) explica que o objetivo deste modelo é identificar uma solução viável, portanto, não é definida uma função objetivo nesta etapa.

Os conjuntos e variáveis deste modelo são definidos da seguinte forma:

- $l \in L$ : conjunto de tanques portuários;
- $k \in K$ : conjunto de chegadas de petróleo no porto;
- $m \in M$ : conjunto de requisições de petróleo provenientes do segmento *downstream*;
- $W_{ckl} = 1$  se a  $k$ -ésima chegada do petróleo tipo  $c$  é bombeada para o tanque  $l$ ; 0 caso contrário;
- $X_{clt} = 1$  se o petróleo tipo  $c$  é armazenado no tanque  $l$  no período  $t$ ; 0 caso contrário;
- $V_{clt}$ : quantidade de petróleo tipo  $c$  armazenado no tanque  $l$  no período  $t$ ;
- $Y_{cml} = 1$  se a  $m$ -ésima requisição do petróleo tipo  $c$  é atendida pelo tanque  $l$ ; 0 caso contrário.

A FIGURA 9 exemplifica uma estrutura do segmento *upstream*, detalhando os conjuntos e as variáveis que compõem o modelo.

FIGURA 9 – EXEMPLO DE CONFIGURAÇÃO DO SEGMENTO *UPSTREAM*

FONTE: A autora (2025).

A restrição (12) garante que a descarga em um tanque só ocorra se este estiver vazio ou contiver o mesmo tipo de petróleo. Para isso, impõe que a soma das variáveis binárias que indicam o local de descarga do produto ( $W_{ckl}$ ) e se há algum outro produto diferente de  $c$  em estoque ( $X_{c'lt}$ ) seja menor ou igual a um.

$$W_{ckl} + \sum_{c' \in C \setminus \{c\}} X_{c'lt} \leq 1 \quad \forall c \in C, k \in K, l \in L, t \in T, t = \tau_{ck} \quad (12)$$

sendo  $\tau_{ck}$  o período da  $k$ -ésima chegada do petróleo  $c$ .

Para assegurar que todas as chegadas de produto no porto sejam descarregadas, assim como todas as requisições provenientes do segmento downstream sejam atendidas, são adicionadas as restrições (13) e (14).

$$\sum_{l \in L} W_{ckl} = 1 \quad \forall c \in C, k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{l \in L} Y_{cml} = 1 \quad \forall c \in C, m \in M \quad (14)$$

A restrição (15) garante que apenas um tipo de petróleo seja armazenado em cada tanque por período, de forma análoga à restrição (4), enquanto a restrição (16) limita a quantidade estocada ( $V_{clt}$ ) à capacidade máxima dos tanques ( $S_{cl}^{max}$ ).

$$\sum_{c \in C} X_{clt} \leq 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (15)$$

$$V_{clt} \leq S_{cl}^{max} X_{clt} \quad \forall c \in C, l \in L, t \in T \quad (16)$$

O balanceamento de estoque da porção *upstream* é dado pela equação (17), sendo  $C_{ck}$  o volume da  $k$ -ésima chegada do petróleo  $c$  e  $\tau_{ck}$  o seu período de descarregamento. Ainda,  $P_{cm}$  representa o volume da  $m$ -ésima requisição do petróleo  $c$  do segmento *downstream* e  $\tau_{cm}$  o período demandado. Portanto, o volume estocado em  $t$  ( $V_{clt}$ ) é definido a partir da quantidade armazenada no período anterior ( $V_{cl,t-1}$ ), incorporando o volume descarregado ( $C_{ck}$ ) e descontando o enviado para atender a demanda no mesmo período ( $P_{cm}$ ). A implementação da restrição (17) exige, também, a adição do condicional  $t > 1$  para o quantificador temporal devido à variável  $V$  indexada em  $t - 1$ .

$$V_{clt} = V_{cl,t-1} + \sum_{\substack{k \in K, \\ k: \tau_{ck}=t}} C_{ck} W_{ckl} - \sum_{\substack{m \in M, \\ m: \tau_{cm}=t}} P_{cm} Y_{cml} \quad \forall c \in C, l \in L, t \in T \quad (17)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo visa apresentar e descrever as etapas realizadas para desenvolvimento do trabalho em questão em duas seções: classificação da pesquisa (3.1) e etapas metodológicas (3.2).

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Uma pesquisa pode ser classificada de acordo com critérios como a natureza da pesquisa, a qual leva em consideração sua causa motivadora: prática ou intelectual. Conforme Gil (2002), conhecer o problema para propor melhorias é um dos propósitos para o desenvolvimento de pesquisas que podem ser classificadas como de ordem prática. Por este motivo, esta pesquisa se enquadra neste grupo, uma vez que busca analisar, testar e aprimorar modelo que otimize o uso do sistema de distribuição de petróleo e derivados.

Quanto aos objetivos gerais, pode-se considerar esta pesquisa como descritiva e exploratória, pois, por meio da aplicação detalhada de um método para otimização, descreve o problema e suas características, propõe uma forma de melhoria e avalia seus resultados, o que, segundo Gil (2002), são os aspectos que constituem os grupos descritivos e exploratórios.

Outra classificação importante para os estudos é em relação ao processo de raciocínio abordado para concepção do argumento. Neste quesito, essa pesquisa é dedutiva, visto que o dedutivismo é aquele em que previsões e implicações são derivadas de leis e teorias universais (Miguel *et al.*, 2012).

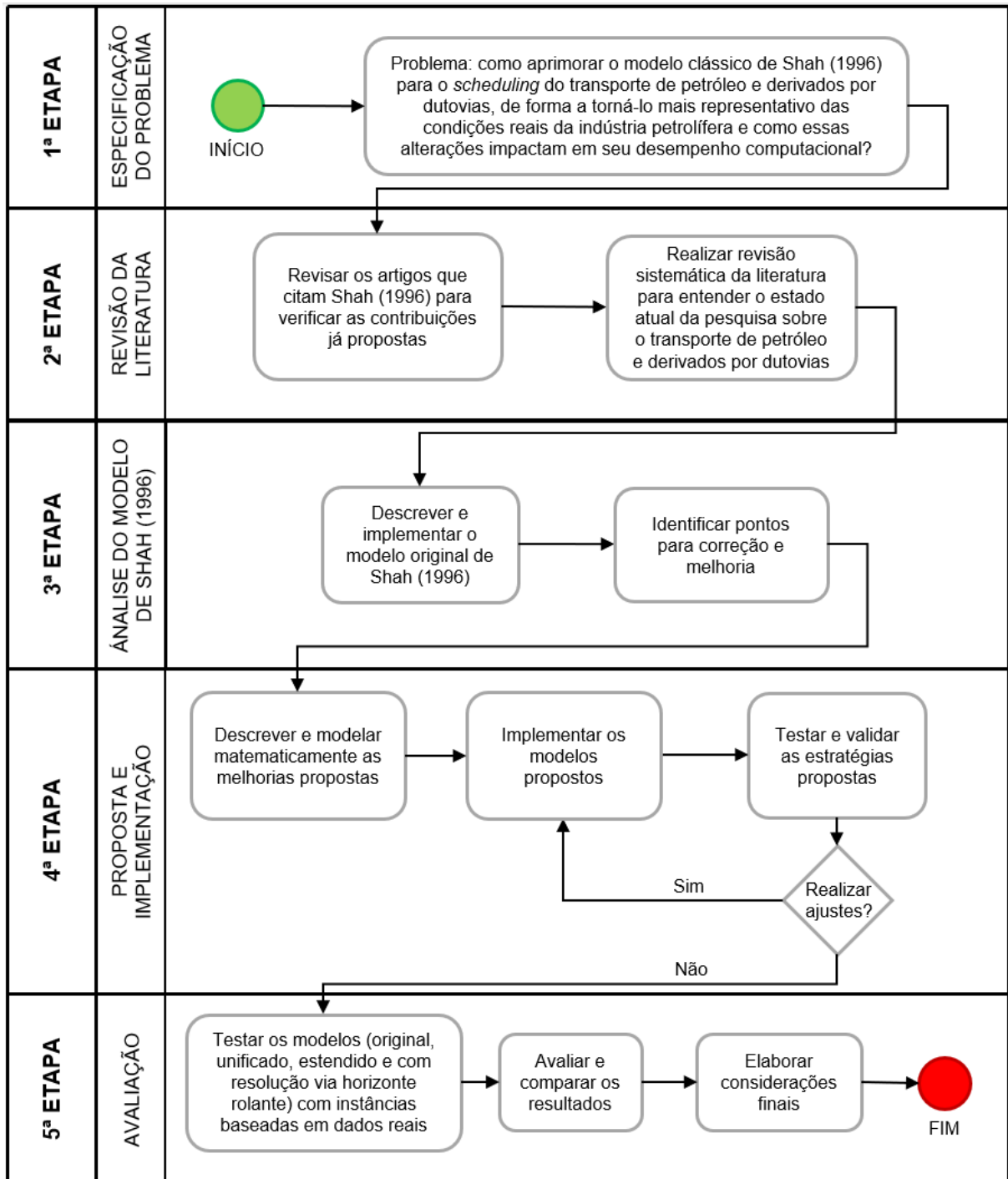
Os trabalhos também podem ser divididos de acordo com seu método de pesquisa. Segundo Miguel *et al.* (2012), aqueles que utilizam métodos matemáticos para representar, calcular e analisar características de um sistema ou situação real, assim como esta pesquisa, são conhecidos como artigos de modelagem quantitativa.

Empregando técnicas matemáticas para representar o mais fielmente possível situações reais, a modelagem quantitativa permite avaliar sistematicamente cada cenário, identificar problemas, analisar a interrelação entre fatores, planejar assertivamente e, conseqüentemente, tornar o processo de tomada de decisão mais assertivo e eficaz (Miguel *et al.*, 2012).

### 3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

Para o desenvolvimento do trabalho, etapas de execução foram planejadas e definidas de acordo com o fluxograma apresentado na FIGURA 10.

FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DE ETAPAS METODOLÓGICAS



FONTE: A autora (2025).

O desenvolvimento é iniciado pela definição do escopo do trabalho, que envolve analisar e aprimorar o modelo matemático de Shah (1996), consolidado na literatura, para a otimização do transporte de petróleo por dutovias multiprodutos desde o porto até as CDUs visando torná-lo mais representativo das condições reais de operação das indústrias petrolíferas.

Em seguida, é feita uma revisão de citações com o objetivo de identificar todos os documentos posteriores que citam Shah (1996), verificando como esse estudo é abordado na literatura e se contribuições já foram feitas no modelo do autor. É feita, ainda, uma revisão sistemática da literatura com a criação de um protocolo específico de pesquisa para entender como o problema do *scheduling* de dutovias é tratado nos últimos anos (2023 a 2025). As revisões são apresentadas no capítulo 2 deste trabalho.

A terceira etapa (seção 2.7) refere-se à análise e descrição do modelo de Shah (1996) para detalhamento e compreensão da estratégia original. A proposição de melhorias para correção de problemas identificados no modelo do autor, o acréscimo de restrições para torná-lo mais próximo da realidade do transporte por dutovias e as alterações na sua estrutura de resolução são descritas no capítulo 4. A validação das alterações é feita com a implementação e a execução de testes iniciais.

Por fim, os modelos (original, unificado, estendido e com resolução via horizonte rolante) são testados comparativamente considerando instâncias criadas com base em dados reais da literatura, conforme capítulo 5. As considerações finais são elaboradas levando em conta o desempenho de cada modelo, principalmente o da abordagem proposta e são apresentadas no capítulo 6.

## 4 EXTENSÕES PROPOSTAS

Neste capítulo, as melhorias e alterações propostas são descritas para, posteriormente, serem implementadas e testadas, conforme será exposto no capítulo seguinte.

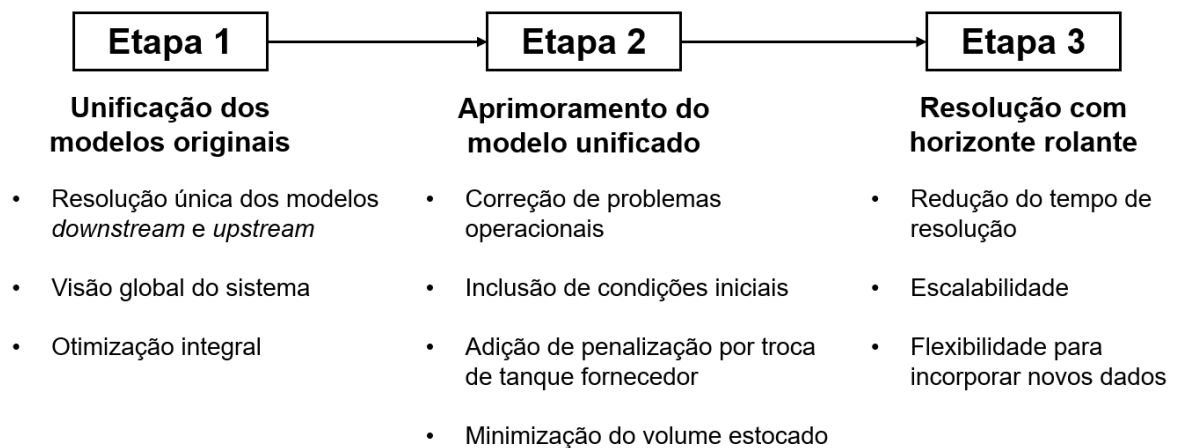
Uma das alterações propostas, representada pela etapa 1 na FIGURA 11, é relacionada à estratégia de resolução utilizada por Shah (1996). Enquanto o autor utiliza a resolução decomposta e sequencial, é proposta na seção 4.1 deste trabalho a unificação dos modelos originais *downstream* e *upstream* para a solução integrada de todo o sistema, permitindo a otimização global de toda a dutovia.

Já a etapa 2 da FIGURA 11, descrita na seção 4.2, incorpora as modificações e restrições adicionais pensadas para aprimorar a representação do modelo em relação à realidade de indústrias petroquímicas e para corrigir problemas operacionais identificados.

Por fim, conforme etapa 3 da FIGURA 11, é proposta a implementação da estratégia de resolução com horizonte rolante. A seção 4.3 apresenta a estrutura do algoritmo e as alterações realizadas no modelo unificado com as restrições adicionais introduzidas na etapa anterior para possibilitar a implementação do horizonte rolante.

As seções 4.1 e 4.2 descrevem com maiores detalhes o apresentado no trabalho de Fedrizzi *et al.* (2026), ampliando as definições para facilitar a compreensão dos modelos e das melhorias propostas.

FIGURA 11 – ETAPAS DAS EXTENSÕES PROPOSTAS



FONTE: A autora (2025).

#### 4.1 UNIFICAÇÃO DOS MODELOS ORIGINAIS

Conforme discutido na seção 2.7, Shah (1996) propõe modelos distintos para os segmentos *upstream* e *downstream*, os quais são resolvidos de forma sequencial. No entanto, ao mesmo tempo em que essa abordagem hierárquica simplifica a resolução do problema e reduz significativamente seu tamanho, ela acaba limitando a qualidade da solução encontrada, uma vez que os resultados do modelo *downstream* condicionam a viabilidade do modelo *upstream*. Ou seja, os segmentos são compreendidos como problemas independentes, podendo incorrer em resultados subótimos ou inviáveis.

Para resolver essa limitação, é proposta a unificação dos dois modelos em uma única formulação. Então, as variáveis com denominações duplicadas no modelo *upstream* (em relação às variáveis do *downstream*) são renomeadas conforme:

- $X_{clt}$  alterada para  $Z_{clt} = 1$  se o petróleo tipo  $c$  é armazenado no tanque  $l$  no período  $t$  na porção *upstream*; 0 caso contrário;
- $V_{clt}$  alterada para  $Q_{clt}$ : quantidade de petróleo tipo  $c$  armazenado no tanque  $l$  no período  $t$  na porção *upstream*;
- $Y_{cml}$  alterada para  $R_{clt} = 1$  se a requisição do petróleo tipo  $c$  é atendida pelo tanque  $l$  no período  $t$  na porção *upstream*; 0 caso contrário.

Posteriormente, em todas as restrições do modelo da porção *upstream*, as variáveis são ajustadas de acordo com a nova nomenclatura. Em adição, uma nova variável é introduzida para estabelecer conexão entre o volume fornecido pelo segmento *upstream* ao *downstream*:

- $P_{clt}$ : volume requisitado do petróleo tipo  $c$  e fornecido pelo tanque  $l$  no período  $t$ .

A restrição (17) do modelo *upstream*, referente ao balanceamento dos estoques nos tanques portuários, é adaptada de acordo com a equação (17.1), alterando a porção correspondente ao atendimento das requisições do segmento *downstream* para considerar a nova variável  $P_{clt}$  que preserva a mesma relação. Para a implementação da restrição, mantém-se a necessidade de inserção do condicional  $t > 1$  para o quantificador temporal devido à variável  $Q$  indexada em  $t - 1$ .



$$Q_{clt} = Q_{cl,t-1} + \sum_{\substack{k \in K, \\ k: \tau_{ck}=t}} C_{ck} W_{ckl} - P_{clt} \quad \forall c \in C, l \in L, t \in T \quad (17.1)$$

Já a restrição (18) é incluída para correlacionar as quantidades demandadas pela porção downstream ( $A_{cit}$ ) com o volume fornecido pelos tanques do upstream ( $P_{clt}$ ) em todos os períodos.

$$\sum_{i \in I} A_{cit} = \sum_{l \in L} P_{clt} \quad \forall c \in C, t \in T \quad (18)$$

A restrição (19) também é adicionada no modelo para limitar o valor de  $P_{clt}$  ao fluxo mínimo e máximo do sistema, assim como para relacionar à variável binária  $R_{clt}$ .

$$P_c^{min} R_{clt} \leq P_{clt} \leq P_c^{max} R_{clt} \quad \forall c \in C, l \in L, t \in T \quad (19)$$

## 4.2 MELHORIAS NAS RESTRIÇÕES E FUNÇÕES OBJETIVO

Embora o estudo de Shah (1996) seja altamente relevante para a área de *scheduling* de dutos, existem aspectos passíveis de correção ou aprimoramento, sem que se perca a fidelidade à proposta original do autor.

As principais correções referem-se às condições de contorno e ao balanço de estoques no período inicial, os quais não são considerados no modelo original e são fundamentais para garantir a continuidade do fluxo de produtos. Para isso, são incluídas as restrições (20) e (21), com o intuito de complementar o modelo unificado e corrigir o estoque no período inicial ( $t = 0$ ) dos tanques.

$$V_{ci,0} = EI_{ci} + A_{ci,0} - \sum_{j \in J} B_{cij,0} \quad \forall c \in C, i \in I \quad (20)$$

$$Q_{cl,0} = EL_{cl} + \sum_{\substack{k \in K, \\ k: \tau_{ck}=0}} C_{ck} W_{ckl} - P_{cl,0} \quad \forall c \in C, l \in L \quad (21)$$

sendo que  $EI_{ci}$  e  $EL_{cl}$  representam a quantidade de petróleo tipo  $c$  armazenada no tanque  $i$  (*downstream*) ou  $l$  (*upstream*), respectivamente, antes do início do período

de planejamento. Portanto, o cálculo incorpora as condições iniciais do sistema e as movimentações definidas para o primeiro período, incluindo tanto as operações de descarregamento de produto nos tanques ( $A_{ci,0}$  e  $W_{ckl}$ ) quanto aquelas destinadas ao atendimento das demandas das CDUs ( $B_{cij,0}$ ) ou das requisições do segmento *downstream* ( $P_{cl,0}$ ).

Uma segunda melhoria é proposta para tratar a alternância entre tanques fornecedores, uma vez que o modelo original se concentra apenas na minimização do volume armazenado quando ocorre a troca do tanque fornecedor (função objetivo da porção *downstream*), sem considerar a frequência dessas trocas.

Em condições reais de transporte por dutos, a alternância frequente da fonte de fornecimento pode representar um aumento significativo nos custos operacionais. Portanto, a incorporação de mecanismos ao modelo que contabilizem essas mudanças pode ser vantajosa. Dessa forma, a restrição (9) da porção *downstream* é ajustada para acrescentar um valor de penalização à quantidade de sobreprevisão calculada sempre que houver troca do tanque fornecedor (restrição 9.1). Essa mesma penalização é incorporada à porção *upstream* por meio da restrição (22).

$$H_{cit} \geq (V_{cit} + \xi S_{ci}^{max}) - \theta S_{ci}^{max} \left( 1 - \sum_{j \in J} Y_{cijt} + \sum_{j \in J} Y_{cij,t+1} \right) \quad \forall c \in C, i \in I, t \in T, t < |T| \quad (9.1)$$

$$T_{clt} \geq \xi S_{cl}^{max} - \theta S_{cl}^{max} (1 - R_{clt} + R_{cl,t+1}) \quad \forall c \in C, l \in L, t \in T, t < |T| \quad (22)$$

sendo que  $T_{clt}$  representa o valor de penalização associado à interrupção do fornecimento do petróleo tipo  $c$  pelo tanque  $l$  no período  $t$ .

Nessas restrições, o valor da penalização varia conforme a escolha do fator  $\xi$ , que representa uma porcentagem da capacidade máxima de armazenamento dos tanques. Quanto maior o valor definido para  $\xi$ , maior será a penalização e, conseqüentemente, maior a preferência do modelo por manter produto em estoque, a fim de evitar a alternância dos tanques no suprimento à dutovia ou às CDUs. O parâmetro  $\theta$  define a magnitude do segundo termo em ambas as inequações e é essencial para o funcionamento adequado das restrições, prevenindo penalizações indevidas. Para que  $\theta$  seja corretamente definido, seu valor deve ser ajustado de acordo com o parâmetro  $\xi$ : se  $\xi \leq 1$ , então  $\theta = 2$ ; se  $\xi > 1$ , então  $\theta > 2\xi$ .

Conforme sugerido por Shah (1996), a restrição (23) é incorporada ao modelo para impedir operações simultâneas de recebimento e envio de produto em cada tanque da porção *upstream*. Para esse fim, é imposto que a soma dos valores das variáveis binárias que determinam as movimentações de descarregamento ( $W_{ckl}$ ) e as decisões de envio de petróleo para atendimento das requisições ( $R_{clt}$ ) não deve ser maior do que um em cada período e para cada tanque portuário.

$$\sum_{\substack{c \in C, \\ c: \tau_{ck}=t}} \sum_{\substack{k \in K, \\ k: \tau_{ck}=t}} W_{ckl} + \sum_{c \in C} R_{clt} \leq 1 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (23)$$

A nova função objetivo do modelo unificado (11.1) visa não apenas à minimização da sobra já considerada na função objetivo original da porção *downstream*, mas também à redução das penalizações geradas pelas mudanças de tanque fornecedor e à minimização dos níveis de estoque ao longo do horizonte de planejamento, uma vez que estes representam custos adicionais em qualquer sistema. Para isso, a função objetivo (11) é modificada para incorporar a soma dos volumes estocados ( $V_{cit}$  e  $Q_{clt}$ ) e a soma das penalizações relacionadas às alternâncias de suprimento no segmento *upstream* ( $T_{clt}$ ). As penalizações referentes ao *downstream* estão inclusas na inequação 9.1, juntamente com o cálculo de  $H_{cit}$ .

$$\min \left( \sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} H_{cit} + \sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} V_{cit} + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} Q_{clt} + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} T_{clt} \right) \quad (11.1)$$

#### 4.3 RESOLUÇÃO COM HORIZONTE ROLANTE

Para resolução do modelo unificado estendido por meio da estratégia de horizonte rolante, é necessário implementar um algoritmo específico para o método, além de ajustar restrições do modelo matemático e revisar certas premissas previamente adotadas. A FIGURA 12 descreve a estrutura geral da implementação, sendo  $N$  o número de períodos definidos para compor um intervalo,  $D$  a quantidade de intervalos que formam uma iteração,  $f$  a quantidade de intervalos fixos,  $h_{max}$  o horizonte total de planejamento,  $E_{inicial}$  o estoque inicial da iteração em questão

(condição inicial do sistema) e  $E$  o vetor que contém os estoques finais resultantes das movimentações de cada período. Ressalta-se que os valores para  $E_{inicial}$  da primeira iteração são parâmetros do modelo.

FIGURA 12 – ESTRUTURA DO ALGORITMO PARA RESOLUÇÃO COM HORIZONTE ROLANTE

---

**Algoritmo 1** Otimização com horizonte rolante

---

```

1:  $S^* \leftarrow []$ 
2: for  $i = 1$  to  $h_{max}/Nf$  do
3:    $t \leftarrow [1 + Nf(i - 1), N(f(i - 1) + D)]$ 
4:    $S \leftarrow \text{otimiza\_modelo}(t, E_{inicial}[i])$ 
5:    $E_{inicial}[i + 1] \leftarrow E[Nfi]$ 
6:    $t^* \leftarrow [1 + Nf(i - 1), Nfi]$ 
7:    $S^* \leftarrow S[t^*]$ 
8: end for
9: return  $S^*$ 

```

---

FONTE: A autora (2025).

As restrições e somatórios do modelo matemático, originalmente definidos para todos os períodos do horizonte de planejamento, são ajustados para corresponder apenas ao conjunto  $t$  definido na linha 3 do algoritmo, contendo os períodos relativos à iteração em execução. Além disso, os estoques iniciais são atualizados a cada iteração, uma vez que assumem os valores dos estoques do último período fixado da iteração anterior, conforme descrito na linha 5.

A linha 6 estabelece os períodos do intervalo fixo cujo *scheduling* permanecerá inalterado. A solução final  $S^*$ , que irá conter as movimentações dos produtos para todos os períodos do horizonte de planejamento, é gradativamente preenchida com a porção da solução obtida a cada iteração referente ao intervalo fixado ( $S[t^*]$ ), conforme linha 7. Dessa forma, a solução final completa é retornada pelo método após a conclusão de todas as iterações.

Em relação ao modelo matemático, além do ajuste no conjunto de períodos considerado, a demanda de cada CDU por cada tipo de petróleo, anteriormente dada de forma agregada para todo o horizonte de planejamento, é alterada para ser distribuída por intervalo  $h$  ( $Q_{dcj}^{min}$ ). A restrição (10) é, então, modificada conforme a

equação (10.1), de modo que cada iteração leve em conta o atendimento às demandas estabelecidas para cada intervalo.

A restrição (10.1) também incorpora uma nova variável, denominada  $ED_{cjd}$ , que representa a diferença entre o volume entregue do petróleo  $c$  à CDU  $j$  durante o intervalo  $d$  e a respectiva quantidade demandada no intervalo avaliado. Essa variável é incluída no modelo para substituir o objetivo anteriormente definido para minimização total dos estoques.

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T_d} B_{cijt} = Q_{dcj}^{min} + ED_{cjd} \quad \forall d \in D, c \in C, j \in J \quad (10.1)$$

sendo:

- $t \in T_i$ : conjunto de períodos contidos em cada iteração  $i$ ;
- $T_d$ : subconjuntos de  $T_i$  de tamanho  $N$  constituídos pelos períodos contidos em cada intervalo  $d$ ;
- $d \in D$ : conjunto de intervalos de cada iteração.

A minimização direta dos estoques, sem um controle adicional da diferença entre o volume entregue às CDUs e a demanda, mostra-se inviável no contexto do horizonte rolante. Reduções excessivas de estoques em uma iteração podem impactar negativamente as iterações subsequentes, aumentando a possibilidade de infactibilidade. Dessa forma, a nova função objetivo (11.2) é formulada para minimizar a diferença de volume entregue ( $ED_{cjd}$ ) ao invés da quantidade estocada, equilibrando o *scheduling* de acordo com a demanda e a capacidade de armazenamento do sistema.

$$\min \left( \sum_{c \in C} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} H_{cit} + \sum_{c \in C} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} T_{clt} + \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{h \in H} ED_{cjd} \right) \quad (11.2)$$

Em adição, todas as restrições que utilizam a variável binária  $W_{ckl}$ , que assume valor igual a um se a  $k$ -ésima chegada do petróleo tipo  $c$  é bombeada para o tanque portuário  $l$ , são ajustadas para considerar apenas as chegadas previstas nos períodos avaliados em cada iteração.

## 5 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para o desenvolvimento dos testes, os modelos foram implementados usando a linguagem de programação *Python* e resolvidos por meio do *software Gurobi*. Um computador com processador Intel(R) Core(TM) i5-2400 CPU @ 3.10GHz foi utilizado para a execução dos testes.

Os cenários para teste dos modelos foram construídos com base em dados da literatura, como o estudo de Más e Pinto (2003), o qual apresenta informações reais de uma rede de dutos brasileira, bem como dados obtidos a partir do *site* da Transpetro (empresa brasileira de logística responsável pelo transporte de petróleo, gás e biocombustíveis, incluindo a operação de dutos no país). Adicionalmente, a principal instância de teste, denominada “Instância 1”, foi projetada para facilitar a compreensão e a visualização do funcionamento do modelo, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria e a avaliação do impacto das modificações realizadas no modelo.

A Instância 1 considera uma infraestrutura composta por quatro tanques de armazenamento portuário, três tanques de armazenamento na refinaria e duas CDUs, as quais demandam dois tipos distintos de petróleo bruto (petróleo 1 e petróleo 2). As informações da Instância 1 e a demanda por cada tipo de produto em cada CDU encontram-se na TABELA 2 e na TABELA 3.

TABELA 2 – INFRAESTRUTURA E HORIZONTE DE PLANEJAMENTO DA INSTÂNCIA 1

Parâmetro	Instância 1
Tanques portuários	4
Tanques na refinaria	3
CDUs	2
Períodos (4h cada)	15

FONTE: A autora (2025).

TABELA 3 – DEMANDA DE CADA PETRÓLEO EM CADA CDU PARA A INSTÂNCIA 1

Tipo de petróleo	Demanda na CDU 1 (m³)	Demanda na CDU 2 (m³)
1	32.000	24.000
2	20.000	36.000

FONTE: A autora (2025).

Quanto ao horizonte de planejamento, conforme identificado na literatura consultada, é comum a divisão do período total em intervalos predefinidos. Neste estudo, cada período de planejamento corresponde a quatro horas operacionais. A Instância 1 possui duração total de 60 horas, a qual é dividida em 15 períodos de 4 horas cada.

A capacidade de armazenamento dos tanques foi definida como 50.000 m<sup>3</sup>. A vazão mínima do duto é de 6.000 m<sup>3</sup>/4h, e a máxima é de 10.000 m<sup>3</sup>/4h, assim como as taxas mínima e máxima para recebimento das CDUs. Ainda, para a equação de balanceamento de estoques (5), os parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma$  foram definidos como zero, enquanto  $\beta$  e  $\delta$  foram definidos com valor igual a 1. Essa configuração assegura que apenas os movimentos do período em avaliação sejam considerados na equação, facilitando a visualização do comportamento do modelo.

As quantidades de cada petróleo e os períodos de descarga no porto foram selecionados aleatoriamente, respeitando as limitações de vazão do sistema e são descritos na TABELA 4.

TABELA 4 – DESCARREGAMENTOS NO PORTO POR PERÍODO PARA A INSTÂNCIA 1

Período	Tipo de petróleo	Volume da carga (m <sup>3</sup> )
1	0	9200
2	0	6000
3	1	7200
4	1	8000
5	0	6400
6	1	8400
7	1	6800
8	1	9600
9	0	6800
10	0	7600
11	1	7600
12	0	8000
13	0	9600
14	0	7200
15	1	7600

FONTE: A autora (2025).

Os testes realizados com o modelo original de Shah (1996) utilizando a Instância 1 são apresentados na seção 5.1, juntamente com a descrição dos principais aspectos a serem melhorados. Em seguida, na seção 5.2, a proposta de

unificação dos modelos originais é avaliada comparando seus resultados com os obtidos a partir do modelo original decomposto.

Na seção 5.3, as instâncias de teste são estendidas para incluir dados referentes às condições iniciais do sistema, permitindo avaliar o modelo unificado com as novas restrições e ajustes apresentados na seção 4.2. Como esse novo modelo considera o estado inicial do sistema, ele não pode ser comparado diretamente ao modelo original de Shah (1996), tampouco ao modelo unificado descrito na seção 4.1. Então, para fins de avaliação de desempenho, ele é comparado a um modelo com restrições e premissas equivalentes, porém resolvido por meio de uma abordagem decomposta.

As seções 5.1, 5.2 e 5.3 trazem os resultados originalmente discutidos em Fedrizzi *et al.* (2026), fundamentando as análises comparativas realizadas para avaliar o desempenho obtido com a implementação das melhorias propostas nas duas primeiras etapas do trabalho.

Já os testes com a estratégia de horizonte rolante, terceira etapa do trabalho, são descritos na seção 5.4. Considerando que a função objetivo do modelo formulado com essa abordagem busca minimizar aspectos diferentes àqueles dos modelos anteriores e que a demanda deve ser segmentada de acordo com o tamanho dos intervalos, a comparação direta de desempenho com os modelos anteriores não é adequada. Portanto, é proposta a análise comparativa com um modelo de restrições e objetivos equivalentes, porém resolvido de forma unificada (abrangendo todo o horizonte de planejamento).

## 5.1 ANÁLISE DO MODELO DE SHAH (1996)

Os parâmetros da Instância 1 foram inseridos no modelo proposto por Shah (1996) e o resultado para a porção *downstream* foi obtido após 0,17 segundos de processamento. O valor alcançado para a função objetivo foi zero, dado que a condição de sobra (restrição 9) foi zerada em todos os períodos, indicando que a transferência de petróleo dos tanques para as CDUs foi concluída somente quando não havia produto remanescente.

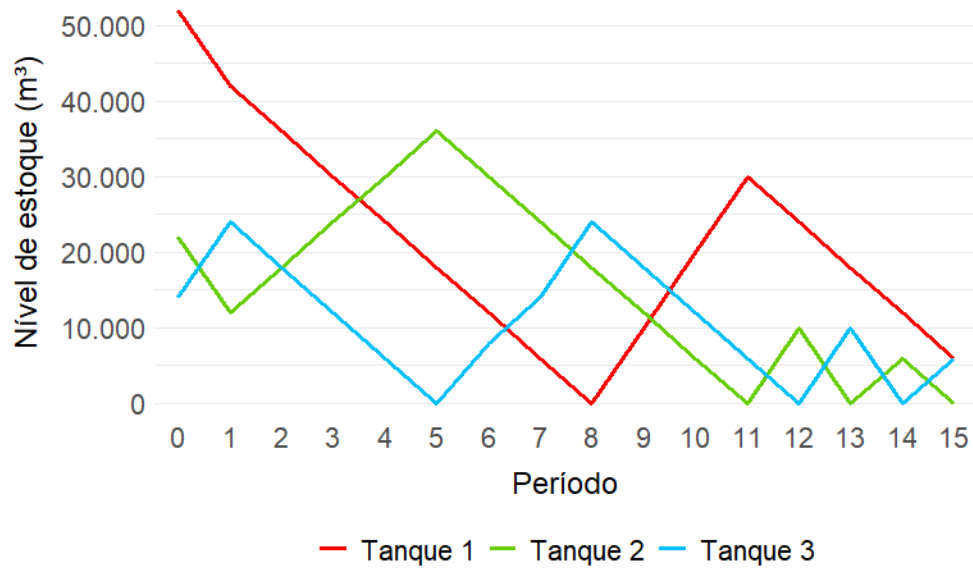
Os dados necessários para o *scheduling* do segmento *upstream* foram filtrados e inseridos no modelo correspondente, o qual obteve a solução em 0,02



segundos (ressalta-se que essa porção do modelo prioriza a viabilidade do *scheduling* e não incorpora nenhuma função objetivo específica).

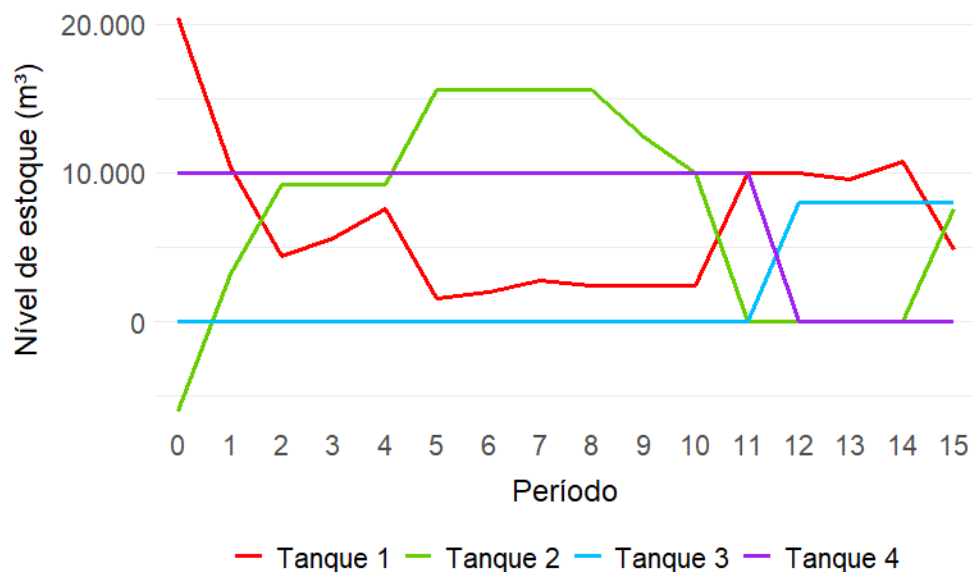
O *scheduling* detalhado obtido para os parâmetros da Instância 1 está representado na FIGURA 13 e na FIGURA 14, as quais ilustram o movimento dos estoques em cada tanque ao longo dos períodos.

FIGURA 13 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996)



FONTE: A autora (2025).

FIGURA 14 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996)



FONTE: A autora (2025).

Ao longo do horizonte de planejamento, observa-se uma alternância frequente entre tanques que recebem e enviam produto para o duto, principalmente na porção *downstream* e nos tanques 1 e 2 do segmento *upstream*. Esses movimentos ocorrem em função da modelagem adotada, que não considera custos ou penalizações associados à estabilidade da origem de suprimento do duto. Tal alternância frequente pode ser indesejável em operações reais de transporte por dutos, dependendo dos custos associados ao acionamento ou parada de bombas utilizadas para a transferência de produto.

Além dos aspectos discutidos, os níveis de estoque merecem atenção, uma vez que se mantêm elevados ao longo de todo o horizonte de planejamento, incluindo os níveis de estoque ao término do período 15 na porção *upstream* (FIGURA 14), o que pode resultar em aumento dos custos operacionais.

Com o objetivo de fornecer uma visão mais detalhada dos movimentos planejados, a TABELA 5 e a TABELA 6 especificam o recebimento e a transferência de cada tipo de petróleo em cada tanque durante os dois primeiros períodos.

TABELA 5 – DETALHAMENTO DO *SCHEDULING* DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996)

Período	Transporte	Tanque 1 (m³)	Tanque 2 (m³)	Tanque 3 (m³)
1	Quantidade recebida	-	-	10.000
	Quantidade enviada	10.000	10.000	-
	Quantidade armazenada	42.000	12.000	24.000
2	Quantidade recebida	-	6.000	-
	Quantidade enviada	6.000	-	6.000
	Quantidade armazenada	36.000	18.000	18.000
Legenda		Petróleo 1	<b>Petróleo 2</b>	

FONTE: A autora (2025).

TABELA 6 – DETALHAMENTO DO *SCHEDULING* DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996)

Período	Transporte	Tanque 1 (m <sup>3</sup> )	Tanque 2 (m <sup>3</sup> )	Tanque 3 (m <sup>3</sup> )	Tanque 4 (m <sup>3</sup> )
1	Quantidade recebida	-	9.200	-	-
	Quantidade enviada	<b>10.000</b>	-	-	-
	Quantidade armazenada	<b>10.400</b>	3.200	-	<b>10.000</b>
2	Quantidade recebida	-	6.000	-	-
	Quantidade enviada	<b>6.000</b>	-	-	-
	Quantidade armazenada	<b>4.400</b>	9.200	-	<b>10.000</b>
Legenda    Petróleo 1 <b>Petróleo 2</b>					

FONTE: A autora (2025).

A partir das tabelas, é possível identificar inconsistências no primeiro período relacionadas ao tipo de petróleo transferido. De acordo com o *scheduling* gerado, o tanque 2 do segmento *downstream*, por exemplo, deveria enviar 10.000 m<sup>3</sup> de petróleo 1 e encerrar o período com 12.000 m<sup>3</sup> de petróleo 2 em estoque. Tal operação não é viável, já que não é possível transferir um tipo de produto enquanto se armazena outro diferente no mesmo tanque, especialmente quando este último não foi recebido durante o período avaliado.

Além do problema de transferência e armazenamento de tipos distintos de óleo no primeiro período, são identificadas também inconsistências relacionadas às quantidades recebidas, transferidas e armazenadas, que não respeitam as restrições de balanceamento de estoques e nem a capacidade dos tanques. Ao se avaliar os níveis de estoque antes dos movimentos do período 1, por exemplo, a quantidade em estoque no tanque 1 da refinaria excederia a capacidade máxima de 50.000 m<sup>3</sup> (quantidade enviada no período somada ao estoque final resulta em 52.000 m<sup>3</sup>). No segmento *upstream*, também são observadas inconsistências no tanque 2, o qual recebe 9.200 m<sup>3</sup> no período 1, mas termina com apenas 3.200 m<sup>3</sup> em estoque. Essa quantidade final somente seria possível se o tanque tivesse iniciado o planejamento com um estoque negativo de 6.000 m<sup>3</sup>, conforme é ilustrado na FIGURA 14, o que é inviável no sistema.

As inconsistências identificadas decorrem da modelagem falha aplicada às equações de balanceamento de estoques combinada ao fato de que as condições iniciais dos tanques do sistema, anteriores ao início do horizonte de planejamento, não são consideradas. Em outras palavras, o balanceamento no primeiro período não é devidamente calculado, pois não há informação sobre o inventário do período

anterior (correspondente às condições iniciais do sistema), o que torna a abordagem proposta pelo autor menos aplicável em condições reais.

Uma condição permitida por Shah (1996) no modelo *upstream* que pode ocasionar inconsistências adicionais nos resultados é a transferência e o recebimento simultâneos de produto em um mesmo tanque. A formulação das restrições permite que um tanque transfira todo o volume armazenado para o duto ao mesmo tempo em que recebe um tipo distinto de petróleo, encerrando o período apenas com o volume recebido em estoque. A TABELA 7 apresenta um caso observado na Instância 1.

TABELA 7 – ATIVIDADES SIMULTÂNEAS NO *SCHEDULING* DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO ORIGINAL DE SHAH (1996)

Período	Transporte	Tanque 1 (m <sup>3</sup> )	Tanque 2 (m <sup>3</sup> )	Tanque 3 (m <sup>3</sup> )	Tanque 4 (m <sup>3</sup> )
11	Quantidade recebida	-	-	8.000	-
	Quantidade enviada	-	-	-	10.000
	Quantidade armazenada	10.000	-	8.000	-
12	Quantidade recebida	9.600	-	-	-
	Quantidade enviada	10.000	-	-	-
	Quantidade armazenada	9.600	-	8.000	-
Legenda	Petróleo 1	Petróleo 2			

FONTE: A autora (2025).

No período 12, o tanque 1 transfere 10.000 m<sup>3</sup> do petróleo 2 que estava armazenado enquanto simultaneamente recebe 9.600 m<sup>3</sup> de petróleo 1, encerrando o período apenas com o volume recebido em estoque. No entanto, esse movimento não é viável, já que a vazão máxima por período, estabelecida como parâmetro, é de 10.000 m<sup>3</sup>. Esses movimentos simultâneos resultariam na mistura de produtos no tanque 1.

Como complemento à modelagem apresentada, Shah (1996) menciona a possibilidade de incluir restrições, como as necessárias para evitar tais movimentos simultâneos, o que permitiria corrigir o problema identificado.

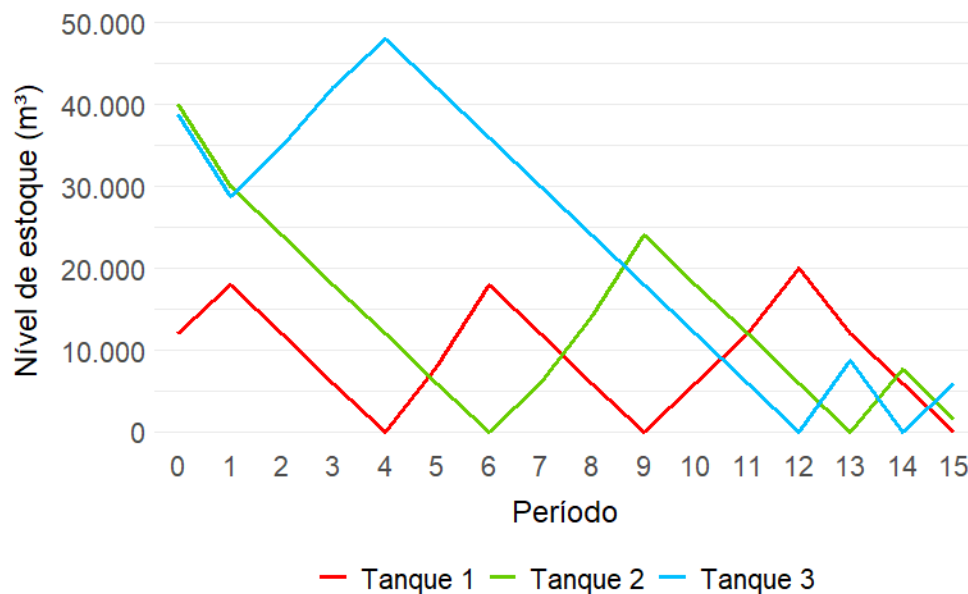
Portanto, com a análise detalhada realizada, é possível compreender o funcionamento do modelo de Shah (1996) e evidenciar os aspectos para correção melhoria, os quais são tratados pelas propostas descritas na seção 4.2.

## 5.2 ANÁLISE DO MODELO UNIFICADO

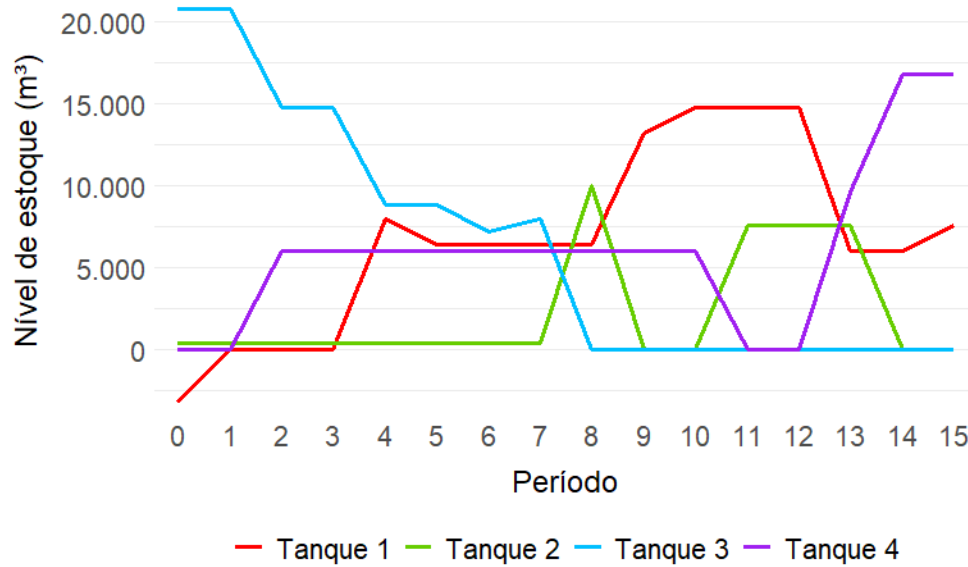
As modificações apresentadas na seção 4.1, que viabilizam a unificação dos modelos originais de Shah (1996), foram implementadas e os parâmetros da Instância 1 foram utilizados para validar a proposta de unificação. As movimentações resultantes nos níveis dos tanques estão apresentadas na FIGURA 15 e na FIGURA 16. A função objetivo também apresentou valor igual a zero neste caso, consistente com o resultado obtido pelo modelo decomposto original, conforme descrito na seção anterior, demonstrando a capacidade do modelo unificado de alcançar a mesma qualidade de solução da estratégia proposta por Shah (1996).

O tempo total de resolução foi de 1 segundo, representando um aumento proporcionalmente significativo. No entanto, esse aumento é desprezível em termos absolutos. Em adição, a eliminação da intervenção externa anteriormente necessária para a resolução em duas etapas (seleção e inserção de dados para execução do segundo modelo) proporciona uma redução considerável no tempo operacional.

FIGURA 15 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO



FONTE: A autora (2025).

FIGURA 16 – SCHEDULING DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO

FONTE: A autora (2025).

A partir das figuras, observa-se a presença de condições operacionais semelhantes às apresentadas pelo modelo original de Shah (1996), tais como a frequente alternância de tanques fornecedores, níveis elevados de estoque e inconsistências no balanceamento do estoque inicial, evidenciadas pelo valor negativo apresentado na FIGURA 16 para o período 0 no tanque 1 do segmento *upstream*. Essas condições reaparecem no modelo unificado, uma vez que este tem como base a modelagem original proposta pelo autor, diferenciando-se, contudo, pela otimização do sistema de maneira integrada.

Para avaliar as modificações implementadas e os benefícios da estratégia sob condições extremas e com infraestrutura limitada, foi criada a Instância 2 aumentando o número de tanques da refinaria da Instância 1 para quatro e reduzindo o número de tanques no porto para apenas um. Nos novos testes, o modelo original proposto por Shah (1996) solucionou o *scheduling* da porção *downstream* em 0,26 segundos. No entanto, retornou infactibilidade para o segmento *upstream*. Em contrapartida, o modelo unificado obteve uma solução ótima em 1,14 segundos, com valor zero para a função objetivo, encontrando uma solução viável para o *scheduling*.

Testes adicionais foram realizados modificando aleatoriamente os parâmetros (aumento ou redução da demanda nas CDUs, chegadas no porto, variação no horizonte de planejamento ou na infraestrutura), a fim de avaliar o desempenho da unificação. Na maioria dos cenários gerados, ambos os modelos encontraram

soluções ótimas com o mesmo valor da função objetivo. Os tempos de execução do modelo unificado foram superiores, mas ainda assim pouco significativos.

Em um dos testes adicionais (com 20 períodos, 2 tanques portuários, 4 tanques na refinaria e variações aleatórias nas demandas e chegadas ao porto — denominado como Instância 3) o modelo original de Shah (1996) gerou uma solução ótima para o segmento *downstream* em 1,17 segundos. Contudo, novamente não encontrou uma solução viável para a porção *upstream*, considerando o *scheduling* definido para o *downstream*. Por outro lado, o modelo unificado proposto forneceu uma solução ótima de *scheduling* para todo o sistema em apenas 1,78 segundos, com valor zero para a função objetivo. Esse resultado reforça a vantagem significativa da abordagem unificada, a qual permite uma perspectiva estratégica do sistema e amplia o conjunto de soluções viáveis para o *scheduling*.

Para exemplificar o comportamento dos modelos em cenários de maior complexidade, foi criada a Instância 4, composta por 30 períodos (totalizando 120 horas), 3 CDUs e 4 tipos diferentes de petróleo, cujas chegadas ao porto são descarregadas em um dos 6 tanques disponíveis antes de serem transferidas para um dos 8 tanques da refinaria. Os valores de demanda e de chegada foram definidos aleatoriamente, respeitando os limites mínimo e máximo de vazão previamente estabelecidos. Nesse cenário, o modelo decomposto de Shah (1996) obteve um *scheduling* ótimo para o segmento *downstream* em 22,55 segundos e o *upstream* em 0,20 segundos. Em contrapartida, o modelo unificado demandou 1.924,71 segundos para alcançar a solução ótima. A infraestrutura das instâncias e os resultados resumidos estão apresentados na TABELA 8 e na TABELA 9.

TABELA 8 – INFRAESTRUTURA DAS INSTÂNCIAS PARA TESTE DO MODELO ORIGINAL E DO UNIFICADO

Instância	Períodos (4h)	Tanques portuários	Tanques na refinaria	CDUs	Petróleos
1	15	4	3	2	2
2	15	1	4	2	2
3	20	2	4	2	2
4	30	6	8	3	4

FONTE: A autora (2025).

TABELA 9 – RESUMO DE RESULTADOS DO MODELO ORIGINAL E UNIFICADO

Instância	Modelo original de Shah (1996)		Modelo Unificado	
	Valor da função objetivo <i>downstream</i>	Tempo computacional (s)	Valor da função objetivo	Tempo computacional (s)
1	0	0,19	0	1
2	0	<i>Downstream</i> : 0,26 <i>Upstream</i> : Infactível	0	1,14
3	0	<i>Downstream</i> : 1,17 <i>Upstream</i> : Infactível	0	1,78
4	0	22,75	0	1.924,71

FONTE: A autora (2025).

Esses resultados demonstram que a abordagem unificada aprimora a busca por soluções de *scheduling*, embora possa demandar tempos de execução mais longos. O modelo unificado oferece uma alternativa viável e eficaz para garantir o transporte de produtos, contribuindo para a melhoria da adaptabilidade do processo em diferentes contextos, inclusive naqueles em que o modelo original de Shah (1996) não foi capaz de encontrar soluções viáveis.

### 5.3 ANÁLISE DO MODELO UNIFICADO ESTENDIDO

Para avaliar o *scheduling* obtido pelo modelo unificado com as restrições adicionais e as melhorias propostas na seção 4.2, foram utilizados os mesmos dados da Instância 1. Inicialmente, foi selecionado um fator de penalização ( $\xi$ ) igual a 0,3 para as restrições (9.1) e (22), a fim de avaliar seu impacto sobre a frequência de mudanças na origem do envio de produto para o duto. Adicionalmente, a condição inicial do sistema foi escolhida aleatoriamente, e os níveis de estoque em cada tanque estão descritos na TABELA 10.

TABELA 10 – CONDIÇÕES INICIAIS PARA A INSTÂNCIA 1

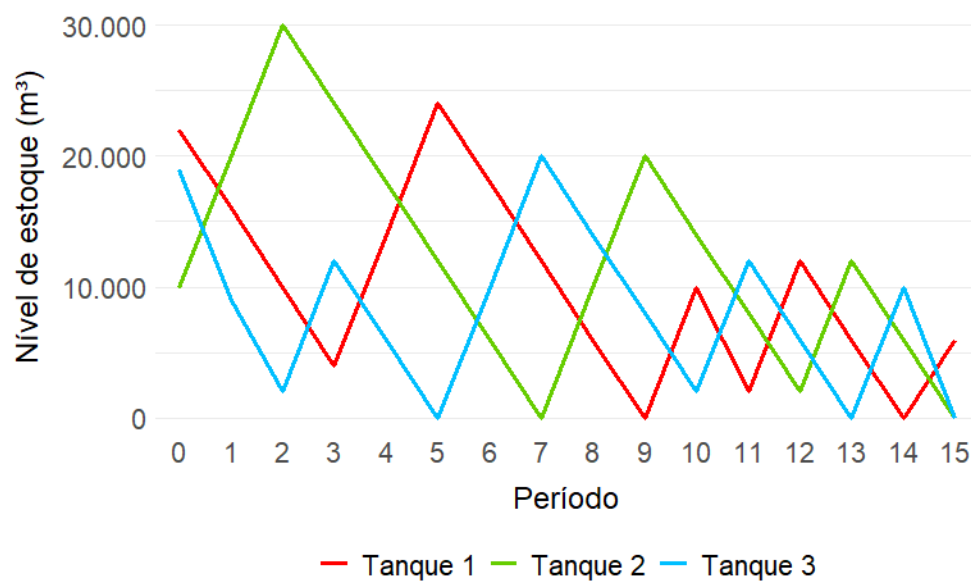
Tanque portuário	Petróleo	Quantidade armazenada (m³)	Tanque da refinaria	Petróleo	Quantidade armazenada (m³)
1	1	25.000	1	1	22.000
2	2	30.000	2	2	10.000
3	1	12.000	3	1	19.000
4	2	18.000			

FONTE: A autora (2025).



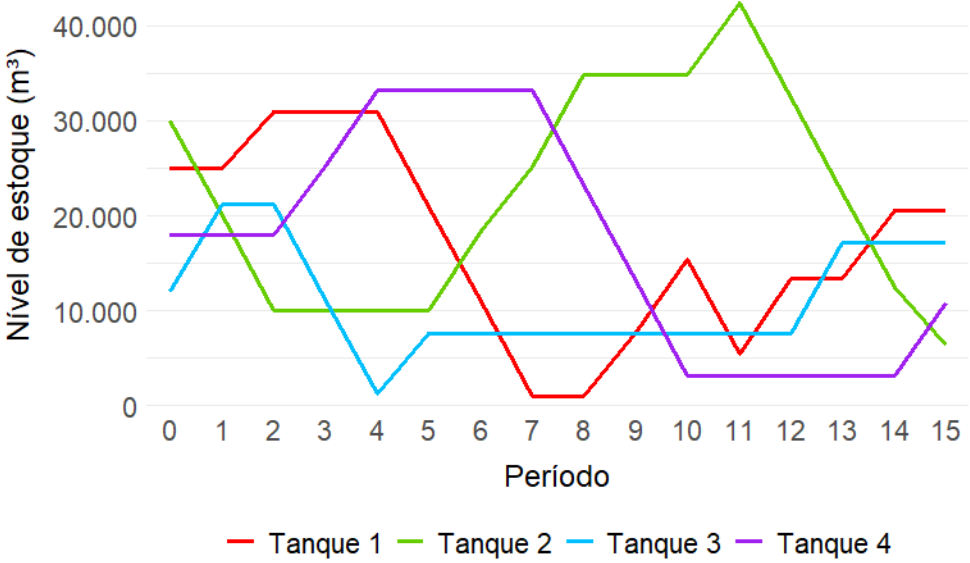
Após 772,24 segundos, o modelo unificado estendido retornou uma solução ótima com valor da função objetivo igual a 1.667.000. O *scheduling* obtido é representado na FIGURA 17 e na FIGURA 18, as quais ilustram as variações dos níveis de estoque dos tanques ao longo dos períodos. A TABELA 11 e a TABELA 12 apresentam detalhes sobre os movimentos planejados para os dois primeiros períodos.

FIGURA 17 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO



FONTE: A autora (2025).

FIGURA 18 – SCHEDULING DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO



FONTE: A autora (2025).

TABELA 11 – DETALHAMENTO DO SCHEDULING DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO

Período	Transporte	Tanque 1 (m³)	Tanque 2 (m³)	Tanque 3 (m³)
0	Condição inicial	22.000	10.000	19.000
1	Quantidade recebida	-	10.000	-
	Quantidade enviada	6.000	-	10.000
	Quantidade armazenada	16.000	20.000	9.000
2	Quantidade recebida	-	10.000	-
	Quantidade enviada	6.000	-	7.000
	Quantidade armazenada	10.000	30.000	2.000
Legenda		Petróleo 1	Petróleo 2	

FONTE: A autora (2025).

TABELA 12 – DETALHAMENTO DO *SCHEDULING* DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 1 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO

Período	Transporte	Tanque 1 (m³)	Tanque 2 (m³)	Tanque 3 (m³)	Tanque 4 (m³)
0	Condição inicial	25.000	<b>30.000</b>	12.000	<b>18.000</b>
1	Quantidade recebida	-	-	9.200	-
	Quantidade enviada	-	<b>10.000</b>	-	-
	Quantidade armazenada	25.000	<b>20.000</b>	21.200	<b>18.000</b>
2	Quantidade recebida	6.000	-	-	-
	Quantidade enviada	-	<b>10.000</b>	-	-
	Quantidade armazenada	31.000	<b>10.000</b>	21.200	<b>18.000</b>
Legenda    Petróleo 1 <b>Petróleo 2</b>					

FONTE: A autora (2025).

A partir das figuras e tabelas, é possível confirmar que as modificações associadas ao balanceamento de estoque inicial e à inclusão das condições iniciais do sistema foram eficazes, visto que o *scheduling* é consistente em ambos os segmentos no primeiro período. Ou seja, todos os envios e recebimentos planejados para o período 1 foram corretamente contabilizados nos inventários.

O elevado valor da função objetivo pode ser explicado pela soma total das quantidades armazenadas ao longo de todos os períodos em ambos os segmentos, que atingiu 1.430.000. O valor remanescente, de 237.000, corresponde às penalizações incorridas devido à substituição dos tanques fornecedores de petróleo para o duto. Ocorreram dez trocas no segmento *downstream* e cinco no *upstream*. Essas alternâncias, mostradas na FIGURA 17 e na FIGURA 18, são justificadas pelo valor escolhido para o fator de penalização ( $\xi$ ) e pelas condições iniciais do sistema.

Para demonstrar os benefícios da unificação, a Instância 1, com as condições iniciais destacadas na TABELA 10, foi utilizada para executar o modelo estendido (com as novas restrições) com uma abordagem decomposta. Ou seja, o modelo *downstream*, incorporando o balanceamento de inventário inicial (restrição 20), penalizações por substituição (9.1) e a função objetivo com os termos específicos desse segmento, foi executado primeiro. Os resultados obtidos foram posteriormente filtrados e os parâmetros inseridos no modelo *upstream*, levando em conta o balanceamento do inventário inicial (restrição 21), as penalizações por substituição (22), a restrição que impede movimentos simultâneos (23) e a função objetivo, com os termos referentes a esse segmento.

A estratégia decomposta gerou o *scheduling* ótimo em 101,5 segundos para o segmento *downstream* e em 0,07 segundos para o *upstream*. A soma dos valores das funções objetivo de cada segmento atingiu o total de 1.681.000, superior ao obtido pelo modelo unificado (1.667.000). Embora implique maior tempo de processamento computacional, a unificação assegura maior qualidade nas soluções, pois considera o sistema de modo integrado.

Além de melhorar o valor final da função objetivo, o modelo unificado com restrições adicionais também apresentou desempenho superior em instâncias nas quais o modelo decomposto estendido indicou inviabilidade. Este é o caso da Instância 5, que utiliza a mesma infraestrutura da Instância 1, mas reduz o inventário inicial do tanque 1, localizado no porto, de 25.000 para 5.000. Neste teste, o modelo estendido para o segmento *upstream* retornou inviabilidade após receber os parâmetros resultantes do modelo estendido para o segmento *downstream*. Em contrapartida, o modelo unificado estendido forneceu um *scheduling* ótimo para todo o sistema em 852,42 segundos. Os resultados resumidos obtidos com o modelo unificado e decomposto estendido são apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – RESUMO DE RESULTADOS DO MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E DECOMPOSTO ESTENDIDO

Modelo unificado estendido			Modelo decomposto estendido	
Instância	Valor da função objetivo	Tempo computacional (s)	Valor total das funções objetivo ( <i>downstream</i> + <i>upstream</i> )	Tempo computacional (s)
1	1.667.000	772,24	1.681.000	101,22
5	1.416.400	852,42	<i>Downstream</i> : 589.000 <i>Upstream</i> : Infactível	<i>Downstream</i> : 101,15 <i>Upstream</i> : Infactível

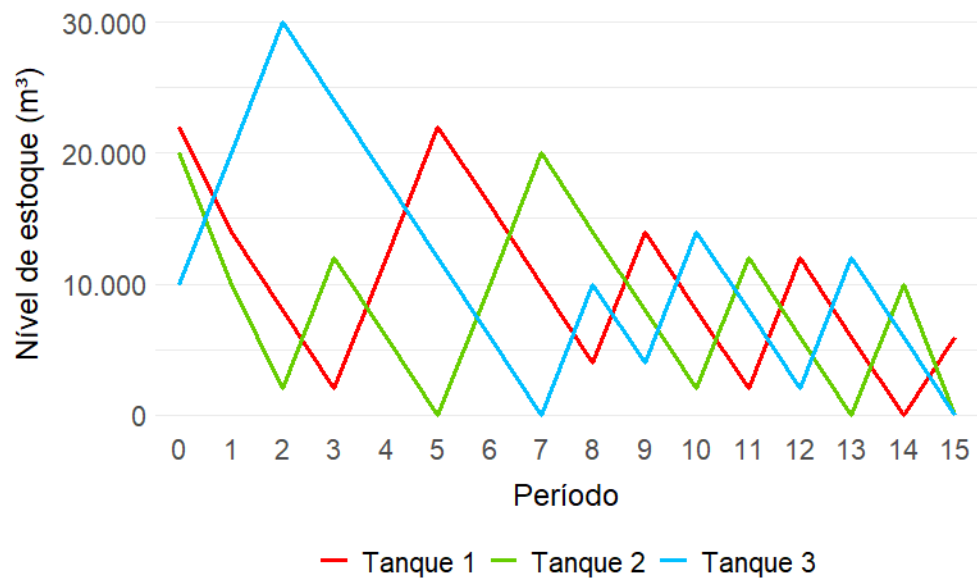
FONTE: A autora (2025).

Modificando as condições iniciais do segmento *downstream* da Instância 1 e criando a Instância 6, conforme apresentado na TABELA 14, é possível avaliar o impacto do fator  $\xi$  no modelo unificado com restrições adicionais. Para essa análise, compara-se um cenário sem penalização pela troca de tanque fornecedor ( $\xi = 0$ ) a outro com aplicação de penalização ( $\xi = 0,5$ ). A FIGURA 19 e a FIGURA 20 apresentam o *scheduling* para  $\xi = 0$ , enquanto a FIGURA 21 e a FIGURA 22 ilustram os resultados para  $\xi = 0,5$ .

TABELA 14 – CONDIÇÕES INICIAIS PARA A INSTÂNCIA 6

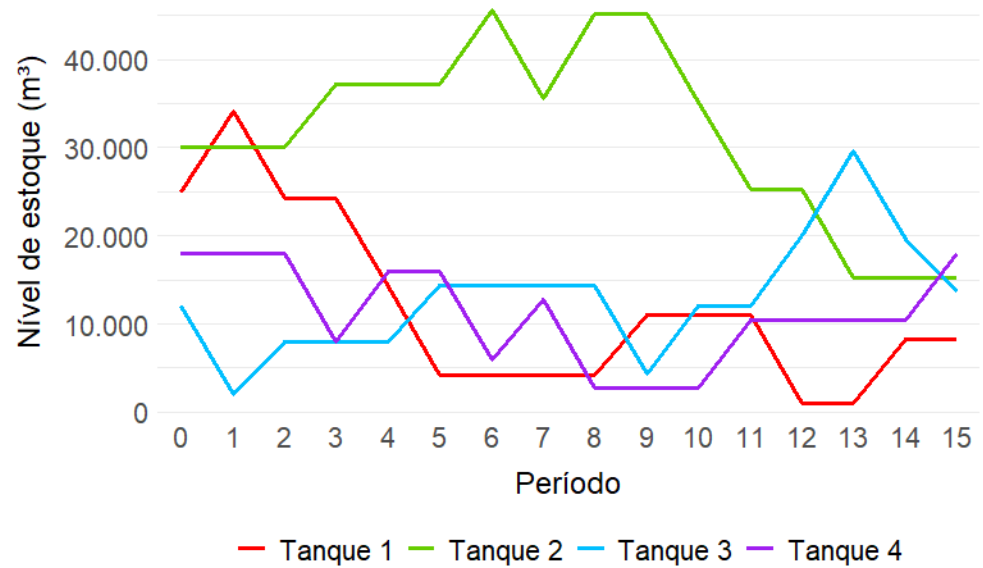
Tanque portuário	Petróleo	Quantidade armazenada (m³)	Tanque da refinaria	Petróleo	Quantidade armazenada (m³)
1	1	25,000	1	1	22,000
2	2	30,000	2	2	20,000
3	1	12,000	3	1	10,000
4	2	18,000			

FONTE: A autora (2025).

FIGURA 19 – SCHEDULING DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E  $\xi = 0$ 

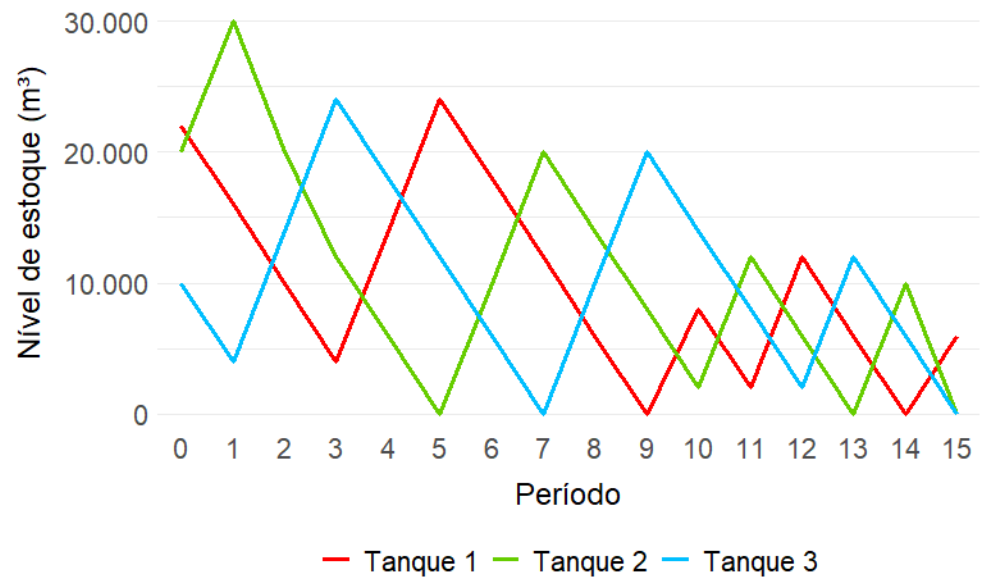
FONTE: A autora (2025).

FIGURA 20 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E  $\xi = 0$



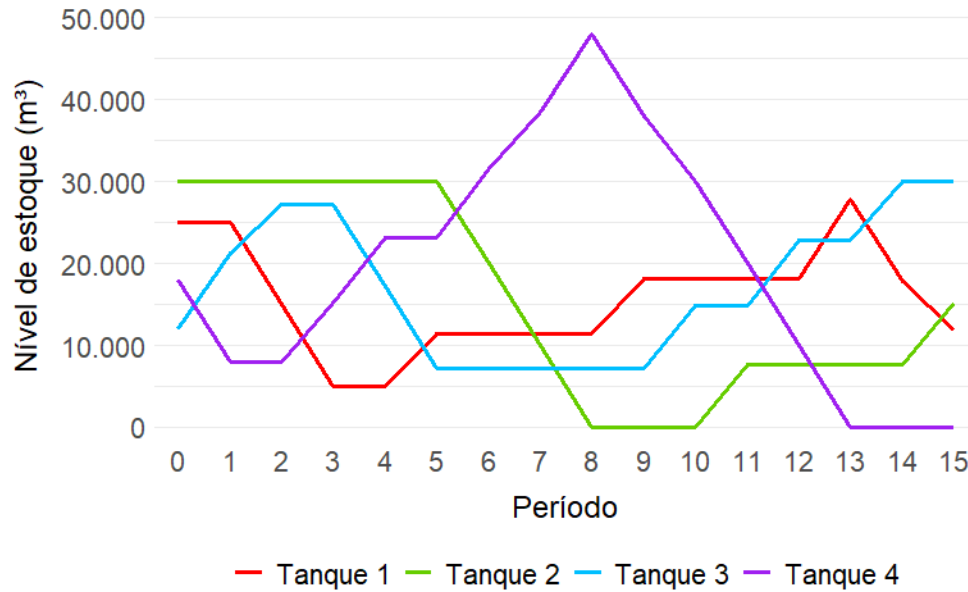
FONTE: A autora (2025).

FIGURA 21 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *DOWNSTREAM* - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E  $\xi = 0,5$



FONTE: A autora (2025).

FIGURA 22 – *SCHEDULING* DO SEGMENTO *UPSTREAM* - INSTÂNCIA 6 - MODELO UNIFICADO ESTENDIDO E  $\xi = 0,5$



FONTE: A autora (2025).

Embora os segmentos *downstream* sejam semelhantes, com uma redução no número de substituições de tanques de 11 para 10 vezes, o *scheduling* no *upstream* apresenta diferenças significativas em termos de estabilidade no envio de produto para o duto. Nesse segmento, os tanques são alternados apenas 5 vezes quando  $\xi = 0,5$ , enquanto, no cenário sem penalizações, ocorrem 11 substituições.

Além do efeito na estabilidade do fornecimento ao duto e, consequentemente, nos custos operacionais totais do sistema, os testes realizados com variação do valor do fator  $\xi$  também revelaram seu impacto no tempo computacional necessário para obtenção da solução ótima. Enquanto o *scheduling* para o cenário com  $\xi = 0$  foi gerado em 98,96 segundos, o aumento de  $\xi$  para 0,5 elevou o tempo computacional para 2.071,09 segundos. Isso pode ser explicado pelo aumento na complexidade das decisões devido aos termos relativos à origem do fornecimento nas restrições 9.1 e 22. Ao selecionar  $\xi = 0$ , o termo de penalização por substituição de tanque é desativado, simplificando as restrições e acelerando a obtenção do *scheduling* ótimo.

É importante enfatizar que, dadas as condições iniciais do sistema, um número mínimo de substituições é necessário para garantir a viabilidade do transporte. Portanto, ao aumentar continuamente o valor de  $\xi$ , apenas a função objetivo será impactada após o alcance do número mínimo necessário de substituições.

A Instância 4, anteriormente utilizada para testar o comportamento dos modelos originais de Shah (1996) e da estratégia unificada (TABELA 8 e TABELA 9), também foi aplicada no modelo unificado estendido para comparar seu desempenho. Ajustes nas taxas de fluxo do segmento *downstream* foram realizados para garantir a viabilidade do cenário. O estado inicial dos tanques foi selecionado aleatoriamente, e o fator de penalização  $\xi$  foi fixado em 0,3. Foi imposto um limite de tempo de 8 horas para a execução.

Com a expansão da infraestrutura e do horizonte de planejamento, combinada com a incorporação de novas restrições e da condição inicial do sistema, o modelo não conseguiu atingir a solução ótima dentro do limite de tempo estabelecido. O aumento exponencial na complexidade e no tempo computacional necessário para resolver o problema evidencia a aplicabilidade do modelo proposto principalmente em períodos de curto e médio prazo.

De acordo com os testes realizados e os resultados apresentados, torna-se evidente a eficácia do modelo unificado estendido para corrigir os problemas identificados na análise do modelo original de Shah (1996). Ainda, o modelo unificado estendido apresenta vantagens significativas ao assegurar soluções ótimas em cenários específicos, ao mesmo tempo em que proporciona uma representação mais aderente às condições operacionais reais do sistema. Contudo, a agregação de todo o sistema em um único modelo PLIM acarreta, naturalmente, o aumento do tempo computacional necessário para obtenção da solução ótima, crescendo exponencialmente com a adição de tanques ou CDUs na infraestrutura ou com a extensão do horizonte de planejamento.

#### 5.4 ANÁLISE DO MODELO COM HORIZONTE ROLANTE

Os testes com o modelo unificado estendido com horizonte rolante foram iniciados considerando a Instância 1, mantendo a infraestrutura do cenário (2 CDUs, 4 tanques no porto e 3 tanques na refinaria), as condições iniciais e taxas de vazão, porém, ajustando a distribuição das demandas para corresponder aos períodos contidos nos intervalos definidos em cada rodada.

O primeiro teste com intervalos de  $N = 3$  períodos cada e iterações compostas por  $D = 2$  intervalos cada (apenas 1 fixo), por exemplo, deve ter a demanda segmentada para representar as quantidades a serem enviadas a cada 3 períodos



para as CDUs, correspondendo ao parâmetro  $N$  definido. Além disso, como são considerados 2 intervalos a cada iteração, é necessário ter informações complementares de demanda referentes ao último intervalo adicional, o qual abrange os períodos 16 a 18. Portanto, a demanda da Instância 1, anteriormente definida conforme TABELA 3, é reestruturada de acordo com a TABELA 15, respeitando os limites mínimos e máximos estabelecidos como parâmetro para o sistema.

TABELA 15 – DEMANDA DA INSTÂNCIA 1 PARA A CONFIGURAÇÃO COM  $N=3$  E  $D=2$

Intervalo	Tipo de petróleo	Demanda da CDU 1 (m³)	Demanda da CDU 2 (m³)
1	1	7000	6000
	2	3000	9000
2	1	10000	5000
	2	11000	7000
3	1	6000	4000
	2	10000	8000
4	1	6000	12000
	2	8000	9000
5	1	6000	4000
	2	5000	3000
6	1	7000	8000
	2	8000	12000

FONTE: A autora (2025).

O perfil das demandas deve ser revisado sempre quando houver o incremento de intervalos ( $D$ ) que alterem a quantidade de períodos otimizados a cada iteração ou quando a quantidade de períodos por intervalo ( $N$ ) é modificada. Nesse último caso, a revisão é necessária para que os volumes solicitados correspondam aos períodos de cada intervalo (intervalos maiores terão demandas médias maiores).

Ainda, devem ser adicionadas informações sobre as chegadas de petróleo no porto para os períodos adicionais. Então, seguindo o exemplo de implementação da Instância 1 com  $N = 3$  e  $D = 2$ , são incluídas as chegadas dos períodos 16 a 18, conforme TABELA 16.

TABELA 16 – DESCARREGAMENTOS NO PORTO PARA OS PERÍODOS 16 A 18 DA INSTÂNCIA 1

Período	Tipo de petróleo	Volume da carga (m³)
16	2	7200
17	1	6500
18	2	6500

FONTE: A autora (2025).

Alguns testes iniciais com a Instância 1, incluindo o citado como exemplo com  $N = 3$  e  $D = 2$ , foram realizados para avaliar o funcionamento da estratégia de horizonte rolante e os parâmetros estabelecidos. Foram considerados, inicialmente, intervalos contendo 3 e 5 períodos, com iterações compostas por 2 ou 3 intervalos (1 fixo e 1 ou 2 adicionais, respectivamente). Os resultados dos testes tanto com o modelo unificado estendido com horizonte rolante (hr) quanto com o modelo equivalente (considerando as alterações realizadas para o horizonte rolante e nova função objetivo) resolvido de forma única (uni), são resumidos na TABELA 17.

TABELA 17 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE - INSTÂNCIA 1

Períodos	Períodos por intervalo ( $N$ )	Intervalos por iterações ( $D$ )	Períodos por iteração	Resolução	Função objetivo	Tempo computacional (s)
15	3	2	6	hr	Infactível	0,79
		3	9	hr	Infactível	4,98
		-	-	uni	Infactível	15,50
	5	2	10	hr	Infactível	29,26
		-	-	uni	318000	617,75
		-	-	-	-	-

FONTE: A autora (2025).

Conforme apresentado, a alteração no perfil da demanda impacta diretamente na factibilidade do modelo, visto que é a única alteração significativa realizada na Instância 1 em relação aos testes das seções anteriores, nos quais foi possível obter soluções ótimas. Nesse caso, uma solução só foi encontrada com o modelo resolvido de forma única e com intervalos constituídos por 5 períodos. Vale ressaltar que o modelo com resolução única é calculado para cada alteração de  $N$  que impacte no perfil da demanda, mas é o mesmo para qualquer valor de  $D$ , pois não é decomposto em intervalos.

Além da demanda, analisando detalhadamente os resultados, fica claro que os dados desta instância estão desequilibrados, pois o volume mínimo que é enviado para as CDUs a cada intervalo é de  $36.000\text{m}^3$  (taxa de recebimento mínima de  $6.000\text{m}^3/4\text{h}$  das duas CDUs nos três períodos de cada intervalo), enquanto o volume médio das cargas por intervalo é de  $22.457\text{m}^3$ . Ou seja, as saídas do sistema são maiores do que as entradas e, quando as demandas são estabelecidas para cada intervalo e não mais de forma agregada para o horizonte total, a região de soluções factíveis é reduzida, assim como a capacidade do modelo remanejar as entregas de modo a não faltar produto. Dessa forma, apenas o modelo resolvido de forma única e com intervalos maiores obtém solução ótima, pois consegue gerenciar a relação entre os volumes descarregados, estocados e entregues.

Aumentando os estoques dos tanques da refinaria em  $10.000\text{m}^3$  cada um, é possível suprir com maior folga o desequilíbrio identificado, permitindo que ambos os modelos (com horizonte rolante e resolução unificada) obtenham soluções com intervalos constituídos por 5 períodos, conforme apresentado na TABELA 18.

TABELA 18 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 1 COM AJUSTE DE ESTOQUES INICIAIS

Períodos	Períodos por intervalo ( $N$ )	Intervalos por iterações ( $D$ )	Períodos por iteração	Resolução	Função objetivo	Tempo computacional (s)
15	5	2	10	hr	320400	56,71
		-	-	uni	213800	372,65

FONTE: A autora (2025).

Ressalta-se que o valor ótimo da função objetivo do modelo com resolução única é utilizado apenas como ponto de partida para comparação entre as abordagens, pois não há garantia de que corresponda ao ótimo global para o modelo com horizonte rolante, dado que este último leva em conta intervalos adicionais para o *scheduling* dos períodos finais, os quais não são considerados pela estratégia unificada. O mesmo critério de referência deve ser empregado para a comparação entre resultados de cenários com diferentes configurações ( $N$  e  $D$ ) do horizonte rolante, pois os dados de entrada variam conforme configuração adotada.

Para horizontes de planejamento mais longos, é necessário avaliar o equilíbrio do sistema, pois mesmo quantidades maiores em estoque podem ser insuficientes

para suprir o excedente de saídas. Portanto, a vazão mínima de recebimento das CDUs é reduzida pela metade para continuidade dos testes (passa a ser  $3.000\text{m}^3/4\text{h}$  ao invés de  $6.000\text{m}^3/4\text{h}$ ).

Os testes seguintes foram organizados contemplando a estrutura da Instância 1, mas com planejamentos de 15, 18, 21 e 30 períodos, divididos em intervalos de 2 a 7 períodos, conforme a divisibilidade de cada horizonte. As iterações foram estabelecidas com o parâmetro  $D$  (intervalos por iteração) variando entre 2 e 5, de acordo com a extensão do planejamento considerado, sempre com 1 intervalo fixo. As demandas e chegadas foram estipuladas aleatoriamente, respeitando os limites do sistema e de cada configuração definida. A TABELA 19 apresenta a configuração dos testes, bem como os resultados obtidos e o tempo computacional de cada caso.

TABELA 19 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 1 COM 15,18, 21 E 30 PERÍODOS E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Períodos	Períodos por intervalo (N)	Intervalos por iterações (D)	Períodos por iteração	Resolução	Função objetivo	Tempo computacional (s)	
15	3	2	6	hr	245600	3,47	
		3	9	hr	202000	26,37	
		4	12	hr	202000	491,65	
		-	-	uni	181000	563,25	
	5	2	10	hr	164000	18,67	
		-	-	uni	110000	302,37	
18	2	3	6	hr	243700	3,56	
		4	8	hr	233000	8,99	
		5	10	hr	189500	27,60	
		-	-	uni	140000	252,97	
	3	2	6	hr	Infactível	-	
		3	9	hr	249000	28,86	
		4	12	hr	242000	313,24	
		-	-	uni	212000	1.791,99	
	6	2	12	hr	182000	33,85	
		-	-	uni	113000	740,19	
	21	3	2	6	hr	Infactível	-
			3	9	hr	282000	33,09
4			12	hr	305000	391,68	
-			-	uni	242000	4.774,53	
7		2	14	hr	123000	209,09	
		-	-	uni	127000	6.572,18	
30		2	3	6	hr	385900	6,05
			4	8	hr	368800	15,56
	5		10	hr	335500	50,76	
	-		-	uni	-	Interrompido - 8h	
	3	2	6	hr	477300	5,74	
		3	9	hr	335600	56,47	
		4	12	hr	311000	423,63	
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h	
	5	2	10	hr	304800	31,32	
		3	15	hr	293000	791,07	
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h	
	6	2	12	hr	246000	76,60	
		3	18	hr	246000	4.134,90	
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h	

FONTE: A autora (2025).

A partir da TABELA 19, observa-se que os tempos computacionais dos modelos resolvidos com a estratégia de horizonte rolante são significativamente inferiores aos exigidos pela resolução única em todos os cenários analisados. Essa disparidade evidencia a eficiência computacional do horizonte rolante, principalmente para planejamentos mais extensos, como os cenários de 21 e 30 períodos, nos quais o modelo único demandou um tempo expressivamente maior ou não atingiu a solução ótima dentro do limite de 8 horas estabelecido.

À medida que as combinações entre os parâmetros  $N$  e  $D$  aumentam o número de períodos por iteração e, conseqüentemente, a dimensão dos modelos, o tempo computacional para execução com horizonte rolante também tende a crescer. Entretanto, tal ampliação permite uma perspectiva de maior alcance a cada iteração e reflete, na maioria dos casos analisados, soluções de melhor qualidade (menor valor para a função objetivo), caracterizando uma importante questão de *trade-off* a ser analisada para cada cenário.

Os testes realizados com 18 e 21 períodos e configuração  $N = 2$  e  $D = 3$  demonstram que segmentações excessivas do horizonte de planejamento podem gerar soluções infactíveis, uma vez que o modelo passa a ter visão demasiadamente reduzida das demandas e entregas futuras. Em contrapartida, iterações que abrangem muitos períodos tendem a ser demoradas e nem sempre resultam em ganhos expressivos, como observado entre os cenários de 15 períodos com  $N = 3$  e  $D = 3$  e 4, os quais apresentaram mesmo valor para a função objetivo, mas com tempos computacionais de 26,37 e 491,65 segundos, respectivamente. Outros casos também evidenciam pequenas reduções na função objetivo (ou até aumento) com custos computacionais substancialmente maiores, como para 18 períodos,  $N = 3$  e  $D = 3$  e 4; 30 períodos,  $N = 5$  e  $D = 2$  e 3; e 30 períodos,  $N = 6$  e  $D = 2$  e 3.

Em adição, é possível verificar que combinações que resultem em iterações compostas por 15 ou mais períodos acabam gerando modelos que exigem elevado tempo computacional a cada etapa da resolução, dificultando a convergência do processo, como é observado no cenário de 30 períodos,  $N = 6$  e  $D = 3$ . Portanto, para a infraestrutura considerada e tendo em vista os valores da função objetivo e o custo computacional, as combinações de parâmetros que apresentaram maior consistência são as que resultam em iterações compostas por 8 a 10 períodos.

Considerando o bom desempenho obtido pela estratégia de horizonte rolante, especialmente para as instâncias de 30 períodos, foram realizados novos testes com

o objetivo de avaliar seu comportamento em planejamentos ainda mais extensos ou com estruturas mais complexas.

A TABELA 20 apresenta os resultados obtidos para instâncias de 60, 90, 120 e 240 períodos, configuradas com intervalos de 2 ou 3 períodos e iterações de 4 ou 3 intervalos (1 intervalo com *scheduling* fixo), dado o maior equilíbrio dessas combinações no *trade-off* entre tempo e qualidade da solução. Nesses cenários, a infraestrutura é a mesma da Instância 1, diferenciando-se apenas pelo aumento gradual do horizonte de planejamento.

TABELA 20 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 1 COM 60, 90, 120 e 240 PERÍODOS E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Períodos	Períodos por intervalo (N)	Intervalos por iterações (D)	Períodos por iteração	Resolução	Função objetivo	Tempo computacional (s)
60	2	4	8	hr	702200	35,88
	3	3	9	hr	823500	116,97
90	2	4	8	hr	1062700	54,07
	3	3	9	hr	1185000	162,41
120	2	4	8	hr	2084400	96,82
	3	3	9	hr	1654400	216,45
240	2	4	8	hr	4429800	175,76
	3	3	9	hr	3548600	392,49

FONTE: A autora (2025).

Os resultados demonstram a capacidade da estratégia em resolver cenários 8 vezes mais extensos do que a estratégia de resolução única, constituindo planejamentos de 40 dias (240 períodos), com tempos computacionais viáveis. Dessa forma, é reforçado o potencial da abordagem para assegurar escalabilidade e aplicabilidade em contextos operacionais de longa duração.

Buscando avaliar qual o impacto no desempenho do horizonte rolante para redes com infraestruturas mais complexas, foi criado um novo cenário base ainda com 2 tipos de petróleo, mas aumentando a quantidade de CDUs para 3 e o número de tanques portuários e da refinaria para 4 e 6, respectivamente. Os novos testes consideram cenários de 18, 30, 60 e 120 períodos, também com configurações que combinam intervalos de 2 ou 3 períodos e iterações com 4 ou 3 intervalos, sendo 1 deles fixo. Os estoques iniciais, as demandas e chegadas no porto foram definidos aleatoriamente, respeitando os limites do sistema.

Para a nova infraestrutura, observa-se um aumento no volume total de saída em todos os períodos devido ao acréscimo de uma CDU. Portanto, há a necessidade de avaliar o equilíbrio do sistema, aumentando o volume das entradas e a capacidade da porção *upstream* para receber produto ou reduzindo as saídas com o ajuste da vazão mínima de recebimento das CDUs. Então, optou-se por diminuir as saídas, alterando a vazão mínima da porção *downstream* para 2.000m<sup>3</sup>/4h. Os resultados dos testes com infraestrutura maior são resumidos na TABELA 21.

TABELA 21 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIAS COM INFRAESTRUTURA MAIOR E DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Períodos	Períodos por intervalo (N)	Intervalos por iterações (D)	Períodos por iteração	Resolução	Função objetivo	Tempo computacional (s)
18	2	4	8	hr	48520	15,606
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h
	3	3	9	hr	117200	68,412
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h
30	2	4	8	hr	126499	132,57
	3	3	9	hr	211320	100,227
60	2	4	8	hr	247050	543,307
	3	3	9	hr	397860	1.811,603
120	2	4	8	hr	727080	3.044,492
	3	3	9	hr	-	Interrompido - 8h

FONTE: A autora (2025).

Conforme resultados apresentados, a estratégia com horizonte rolante mostrou-se capaz de obter solução para um cenário com 120 períodos dentro do limite de tempo estabelecido. Em contraste, o método de resolução única não alcançou o *scheduling* ótimo nem mesmo para instâncias com apenas 18 períodos. O aumento da infraestrutura impacta significativamente na complexidade do modelo e, consequentemente, no tempo computacional exigido, reforçando a vantagem do horizonte rolante para instâncias de maior porte.

Além disso, observa-se que a combinação de infraestruturas mais amplas com horizontes de planejamento prolongados exige uma avaliação criteriosa dos parâmetros *N* e *D*. Assim como na instância de 120 períodos apresentada na TABELA 21, o acréscimo de um período por iteração pode inviabilizar a resolução do modelo em um tempo razoável. Nesses casos, a escolha de configurações que resultem em



iterações com menor número de períodos pode favorecer a velocidade de convergência para a solução, compensando a complexidade estrutural.

Variações nas cargas recebidas no porto ou nos volumes demandados pelas CDUs também podem influenciar no tempo de resolução do modelo e na sua factibilidade. Para avaliar o impacto, foram realizados experimentos reduzindo aleatoriamente as demandas dos cenários da TABELA 21 e, nesse contexto, uma diminuição média de aproximadamente 30% nas demandas por intervalo resultou em uma queda média de cerca de 50% no tempo computacional. Ainda assim, essa alteração específica não viabilizou a obtenção de solução para o cenário com 120 períodos,  $N = 3$  e  $D = 3$ .

Por fim, a Instância 4, anteriormente utilizada para avaliar a escalabilidade dos modelos de Shah (1996) e dos modelos propostos (unificado e unificado estendido), foi ajustada para analisar também o desempenho da estratégia de horizonte rolante. Para isso, a demanda foi segmentada de acordo com as configurações de cada teste, mantendo-se a infraestrutura, composta por 3 CDUs, 6 tanques portuários e 4 tanques na refinaria, bem como o horizonte de planejamento (30 períodos), a quantidade de produtos (4), os limites de vazão, as condições iniciais do sistema e os descarregamentos no porto. A TABELA 22 apresenta os resultados obtidos tanto com horizonte rolante quanto com a resolução única, considerando os novos perfis de demanda.

TABELA 22 – RESULTADOS HORIZONTE ROLANTE – INSTÂNCIA 4 COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Períodos	Períodos por intervalo (N)	Intervalos por iterações (D)	Períodos por iteração	Resolução	Função objetivo	Tempo computacional (s)
30	2	3	6	hr	380020	206,819
		4	8	hr	362120	1.529,91
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h
	3	2	6	hr	389620	609,239
		3	9	hr	-	Interrompido - 8h
		-	-	uni	-	Interrompido - 8h

FONTE: A autora (2025).

A aplicação da estratégia de horizonte rolante possibilitou a obtenção de soluções em tempo viável para configurações com 6 e 8 períodos por iteração,

evidenciando sua superior eficiência computacional em relação à resolução única. Esses resultados reforçam também a importância de avaliar cuidadosamente a combinação entre os parâmetros  $N$  e  $D$ , sobretudo em instâncias cuja complexidade estrutural e extensão do planejamento ampliam o tamanho do modelo a ser resolvido e o esforço computacional associado.

Dessa forma, conclui-se que a abordagem com horizonte rolante é vantajosa para aumentar a eficiência de resolução e possibilitar a obtenção de *scheduling*, principalmente para instâncias de maior complexidade ou com planejamentos mais extensos que inviabilizam a aplicação da resolução única. Embora a decomposição temporal possa reduzir a visão global do sistema proporcionada pela resolução unificada e, em casos específicos, dificultar a convergência para a solução, essa limitação tende a ser compensada pelo ganho computacional alcançado. Em adição, a estratégia amplia a previsibilidade do modelo ao considerar períodos futuros para programação, contribuindo para decisões mais alinhadas à realidade operacional e à continuidade do transporte.

## 6 CONCLUSÃO

Diante dos benefícios da otimização de processos e de sua importância na redução de custos em diversos setores, incluindo o petroquímico, este estudo teve como objetivo avaliar criticamente o modelo de programação matemática de Shah (1996), um modelo consolidado na literatura e pioneiro no problema de *scheduling* do transporte de produtos em dutos.

O problema abordado pelo autor refere-se ao *scheduling* do transporte de petróleo bruto em dutos, desde sua chegada no porto até a entrega às CDUs, considerando sua passagem intermediária por tanques localizados no porto e na refinaria. Para isso, a abordagem proposta é composta por dois modelos PLIM, resolvidos de forma sequencial. No entanto, conforme evidenciado pelas análises realizadas com a modelagem de Shah (1996), essa estratégia leva à otimização de segmentos individuais sem considerar suas interdependências, o que impede a obtenção de uma otimização global do sistema. Ainda, o modelo original incorpora características operacionais bastante simplificadas, como a ausência de condições de contorno no sistema, o que limita sua aplicabilidade.

Nesse sentido, este estudo apresenta contribuições relevantes por meio de aprimoramentos ao modelo matemático original de Shah. As modificações foram propostas para aproximar o modelo da realidade industrial, corrigir inconsistências, assegurar a integração e o *scheduling* ótimo do sistema e possibilitar a otimização mesmo em cenários complexos ou com planejamentos longos. As melhorias foram conduzidas de forma sistemática em três etapas: inicialmente, por meio da unificação dos modelos originais de Shah (1996), seguida pela introdução de restrições adicionais e refinamentos ao modelo unificado e, por fim, pela implementação da estratégia de resolução com horizonte rolante.

Os testes realizados e os resultados obtidos demonstram a relevância do modelo unificado estendido proposto, visto que apresentou melhor valor para a função objetivo na instância testada e forneceu soluções ótimas em cenários onde o modelo de Shah (1996) anteriormente falhou em determinar um *scheduling* viável. Além disso, as restrições adicionais, que contemplam condições de contorno, balanceamento de estoques no período inicial, penalizações por trocas de tanques fornecedores, limitação de movimentos simultâneos no segmento *upstream* e controle dos níveis de estoque ao longo do horizonte de planejamento, se mostraram eficazes na correção

das simplificações e inconsistências operacionais do modelo original. Dessa forma, as modificações implementadas apresentaram resultados significativos para a ampliação da adaptabilidade do modelo original e sua aplicabilidade à realidade do transporte de petróleo em dutos, impulsionando, assim, a possibilidade de utilização do modelo proposto como ponto de partida para novos estudos da área.

Uma das limitações encontradas pelo modelo unificado estendido refere-se ao tempo computacional elevado necessário para resolver instâncias maiores ou com planejamentos prolongados, devido ao aumento na complexidade do processo decisório imposto pelas novas restrições. Então, na terceira etapa deste trabalho, foi implementada uma estratégia de resolução com horizonte rolante, a qual utiliza uma decomposição temporal para resolver sequencialmente subproblemas que consideram previsões de demandas e entregas futuras. No final do processo, é obtido o *scheduling* completo para todo o horizonte de planejamento definido.

A utilização do horizonte rolante elevou significativamente a eficiência computacional do modelo, viabilizando a obtenção de soluções em tempos viáveis para cenários nos quais a resolução única não foi capaz de encontrar dentro do limite de tempo definido. Essa melhoria foi verificada inclusive em casos com planejamentos 8 vezes mais extensos e infraestruturas maiores, evidenciando o potencial da estratégia para expandir a aplicabilidade prática e manter a efetividade do novo modelo estendido em cenários mais complexos.

Durante os testes com a abordagem de horizonte rolante, foi observada uma importante relação de *trade-off* entre a qualidade das soluções obtidas e o esforço computacional exigido, decorrente da escolha de parâmetros fundamentais desta abordagem. Como trabalho futuro, sugere-se o estudo aprofundado dessa questão de modo a fornecer estimativas adequadas e orientar a seleção dos parâmetros sem a necessidade de testar diferentes combinações para novos cenários. Essa análise permitiria automatizar esta etapa e tornar o processo de aplicação do modelo proposto mais eficiente e sistemático.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2025>
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Encarte de Consolidação da Produção 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2024/dezembro.pdf>
- BAMOUMEN, M. *et al.* An efficient GRASP-like algorithm for the multi-product straight pipeline scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 150, p. 106082, 2023.
- BOSCHETTO, S. N. *et al.* An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 12, p. 5661-5682, 2010.
- BUENO, L. **Otimização do scheduling do transporte de derivados escuros de petróleo em uma malha dutoviária**. 2015. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2015. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1893/1/CT\\_CPGEI\\_M\\_Bueno%2c%20Lucas\\_2015.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1893/1/CT_CPGEI_M_Bueno%2c%20Lucas_2015.pdf) Acesso em: 09 set. 2024.
- CAFARO, D. C.; CERDÁ, J. Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates. **Computers & Chemical Engineering**, v. 32, n. 4-5, p. 728-753, 2008.
- CAFARO, V. G. *et al.* Detailed scheduling of operations in single-source refined products pipelines. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 10, p. 6240-6259, 2011.
- CHUNPENG, L.; GANG, R. A strategy for the integration of production planning and scheduling in refineries under uncertainty. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 17, n. 1, p. 113-127, 2009.
- DANTZIG, G. B. **Linear programming and extensions**. Santa Monica, California: United States Air Force Project Rand, 1963.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Indicativo de Oleodutos: Ciclo 2023-2025**. 2025a. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-905/CA-EPE-DPG-SDB-2025-14\\_Planos%20Indicativos%20de%20Oleodutos\\_2025\\_12.09.25.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-905/CA-EPE-DPG-SDB-2025-14_Planos%20Indicativos%20de%20Oleodutos_2025_12.09.25.pdf)
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório Síntese 2025: Ano base 2024**. 2025b. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-905/CA-EPE-DPG-SDB-2025-14\\_Planos%20Indicativos%20de%20Oleodutos\\_2025\\_12.09.25.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-905/CA-EPE-DPG-SDB-2025-14_Planos%20Indicativos%20de%20Oleodutos_2025_12.09.25.pdf)

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN Síntese 2025 PT.pdf](#)

FAGUNDEZ, F. D.; XAVIER, A. E.; FACO, J. L. D. Continuous nonlinear programming techniques to solve scheduling problems. **Informatica**, v. 20, n. 2, p. 203-216, 2009.

FRAGKOGIOS, A.; SAHARIDIS, G. K. D. Modeling and solution approaches for crude oil scheduling in a refinery. In: KAHRAMAN, C.; KAYAKUTLU, G. (ed.). **Energy Management—Collective and Computational Intelligence with Theory and Applications**. Cham: Springer, p. 251–275, 2018.

FEDRIZZI, S. *et al.* C. An Extended Mathematical Programming Model for Optimising the Transportation of Oil in Pipeline Networks. **International Journal of Productivity and Quality Management**, 2026 (Artigo aceito para publicação).

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GLOMB, L; LIERS, F; RÖSEL, F. A rolling-horizon approach for multi-period optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 300, n. 1, p. 189-206, 2022.

GOUDARZI, F. K.; MALEKI, H. R.; NIROOMAND, S. An optimization framework for scheduling multi-period multi-product oil pipeline systems under belief degree-based uncertain parameters. **Journal of Applied Mathematics and Computing**, v. 69, n. 1, p. 37-68, 2023.

HANE, C. A.; RATLIFF, H. D. Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. **Annals of operations research**, v. 57, n. 1, p. 73-101, 1995.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G.J. **Introduction to operations research**. McGraw-Hill, 2010.

HOOKE, J. N. Formulating Good MILP Models. **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, 2011.

KAZEMI, Y.; SZMEREKOVSKY, J. Modeling downstream petroleum supply chain: The importance of multi-mode transportation to strategic planning. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 83, p. 111-125, 2015.

KIRSCHSTEIN, T. Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models. **European Journal of Operational Research**, v. 264, n. 1, p. 327-339, 2018.

LI, Z. *et al.* A review of multiproduct pipeline scheduling: from bibliometric analysis to research framework and future research directions. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, v. 1, n. 4, p. 395-406, 2021.

LI, Z. *et al.* A decision-making framework for scheduling of multiproduct pipeline under the fair opening. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, v. 4, n. 4, p. 100185, 2024a.

LI, Z. *et al.* Two-stage optimization model for scheduling multiproduct pipeline network with multi-source and multi-terminal. **Energy**, v. 306, p. 132511, 2024b.

LIMA, C.; RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. Downstream oil supply chain management: A critical review and future directions. **Computers & Chemical Engineering**, v. 92, p. 78-92, 2016.

LUO, C.; RONG, G. Hierarchical approach for short-term scheduling in refineries. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 46, n. 11, p. 3656-3668, 2007.

MAGATÃO, S. N. B. *et al.* Planning and sequencing product distribution in a real-world pipeline network: an MILP decomposition approach. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 12, p. 4591-4609, 2012.

MÁS, R.; PINTO, J. M. A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. **Optimization and Engineering**, v. 4, n. 1, p. 23-64, 2003.

MEIRA, W. T. *et al.* A matheuristic decomposition approach for the scheduling of a single-source and multiple destinations pipeline system. **European Journal of Operational Research**, v. 268, n. 2, p. 665-687, 2018.

MEIRA, W. H. T. *et al.* A solution framework for the long-term scheduling and inventory management of straight pipeline systems with multiple-sources. **Computers & Operations Research**, v. 127, p. 105143, 2021.

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and Combinatorial Optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

QIN, Q. *et al.* Crude oil scheduling for coastal refineries with long-distance pipelines: application of mixed-integer programming and supervised learning. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 64, n. 21, p. 10532-10549, 2025.

REJOWSKI JR, R.; PINTO, J. M. Scheduling of a multiproduct pipeline system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 27, n. 8-9, p. 1229-1246, 2003.

REKLAITIS, G. V. Overview of Scheduling and Planning of Batch Process Operations. In: REKLAITIS, G. V. *et al.* (Ed.). **Batch processing systems engineering: fundamentals and applications for chemical engineering**. NATO ASI Series, vol 143. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, p. 660-705, 1996.

SAHEBI, H.; NICKEL, S.; ASHAYERI, J. Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context—A review. **Computers & Chemical Engineering**, v. 68, p. 56-77, 2014.

SHAH, N. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. **Computers & Chemical Engineering**, v. 20, p. S1227-S1232, 1996.

SHAO, K. *et al.* Efficient pump scheduling for large-scale multiproduct pipelines using deep reinforcement learning. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, p. 1-13, 2024.

SOUZA, T. C. N. Distribuição de derivados de petróleo por redes de polidutos: uma abordagem através de algoritmos evolucionários híbridos para um problema triobjetivo. 2015. Tese (Doutorado em Sistemas e Computação) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/20222/1/ThatianaCunhaNavarroDeSouza\\_TESE.pdf](https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/20222/1/ThatianaCunhaNavarroDeSouza_TESE.pdf). Acesso em: 09 set. 2024.

TU, R. *et al.* Machine learning application in batch scheduling for multi-product pipelines: A review. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, p. 100180, 2024.

WANG, C. *et al.* A novel multi-operation sequencing formulation for the crude oil scheduling problem with restricted overlapping constraints. **Computers & Chemical Engineering**, v. 187, p. 108714, 2024.

WEI, Z. *et al.* Multimodal Transportation Optimization of Refined Oil Logistics Considering Daily Scheduling: Case from China. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 15, n. 2, p. 04024009, 2024.

XU, Y. *et al.* Scheduling of straight multiproduct pipelines considering the contamination control. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 14, n. 4, p. 04023027, 2023.

ZIMBERG, B.; FERREIRA, E.; CAMPONOGARA, E. A continuous-time formulation for scheduling crude oil operations in a terminal with a refinery pipeline. **Computers & Chemical Engineering**, v. 178, p. 108354, 2023.