

BERNARDO TINOCO D'ONÓFRIO

Gestão e Agendamento de Rebocadores em Operações Portuárias:
Desafios e Oportunidades à Luz da Literatura Internacional e de um Estudo de
Caso Sul-Americano

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
APRESENTADO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL
DA PUC-RIO, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE BACHAREL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Orientador: Luiz Felipe Scavarda

Departamento de Engenharia Industrial
Rio de Janeiro, 12 de Junho de 2026.

RESUMO

Os rebocadores portuários desempenham papel essencial na segurança, fluidez e eficiência das operações marítimas, especialmente em portos sujeitos a restrições operacionais, janelas de manobra, condições ambientais variáveis e necessidade de coordenação entre múltiplos agentes. Apesar da relevância desses ativos para a logística portuária, a literatura sobre gestão e agendamento de rebocadores ainda se concentra majoritariamente em modelos matemáticos e algoritmos de otimização aplicados a portos internacionais de alta densidade, havendo menor disponibilidade de estudos empíricos voltados ao contexto sul-americano. Diante dessa lacuna, este Trabalho Final de Curso tem como objetivo analisar o papel dos rebocadores no ambiente de logística portuária, com foco na gestão de seus agendamentos e nos principais parâmetros que influenciam essas decisões, comparando práticas observadas na literatura internacional com a realidade operacional de uma empresa sul-americana atuante no Porto de Santos. Para isso, foi adotada uma metodologia em duas etapas: inicialmente, realizou-se uma *scoping review*, com o objetivo de identificar os principais desafios e oportunidades relacionados à gestão do agendamento de rebocadores. Em seguida, foi desenvolvido um estudo de caso qualitativo-exploratório, por meio de um painel de especialistas, para compreender como tais parâmetros se manifestam na prática operacional em uma realidade sul-americana. Os resultados indicam que a literatura internacional enfatiza soluções baseadas em automação, sistemas inteligentes de apoio à decisão, otimização de tempos de espera e eficiência ambiental. No entanto, o estudo de caso evidenciou que, no Porto de Santos, a gestão ainda se apoia fortemente na experiência dos operadores, na atuação do Centro de Operações e na centralização informacional pela praticagem local. Verificou-se, ainda, que diferenças de escala, maturidade tecnológica, governança operacional e características locais influenciam diretamente a aplicabilidade de modelos internacionais ao contexto brasileiro. Assim, o trabalho contribui ao aproximar o debate acadêmico sobre agendamento de rebocadores da realidade empírica sul-americana, evidenciando limites, adaptações necessárias e oportunidades de melhoria para a gestão desses recursos críticos.

Palavras-chave: Rebocadores portuários, Agendamento de rebocadores, Logística portuária, Porto de Santos, *Scoping review*, Estudo de caso.

ABSTRACT

Port tugboats play an essential role in the safety, fluidity, and efficiency of maritime operations, especially in ports subject to operational constraints, maneuvering windows, variable environmental conditions, and the need for coordination among multiple stakeholders. Despite the relevance of these assets to port logistics, the literature on tugboat management and scheduling still focuses mainly on mathematical models and optimization algorithms applied to high-density international ports, with fewer empirical studies addressing the South American context. In light of this gap, this Undergraduate Final Project aims to analyze the role of tugboats in the port logistics environment, focusing on the management of their scheduling processes and on the main parameters that influence these decisions, by comparing practices observed in the international literature with the operational reality of a South American company operating in the Port of Santos. To achieve this objective, a two-step methodology was adopted: first, a scoping review was conducted to identify the main challenges, and opportunities related to tugboat scheduling management; second, a qualitative-exploratory case study was developed through a panel of experts, in order to understand how these parameters are reflected in a South American operational practice. The results indicate that the international literature emphasizes solutions based on automation, intelligent decision-support systems, waiting-time optimization, and environmental efficiency. However, the case study showed that, in the Port of Santos, management still relies heavily on operators' experience, the role of the Operations Center, and the centralization of information by the local pilotage service. The findings also indicate that differences in scale, technological maturity, operational governance, and local characteristics directly influence the applicability of international models to the Brazilian context. Thus, this study contributes by bringing the academic debate on tugboat scheduling closer to the South American empirical reality, highlighting the limits, necessary adaptations, and improvement opportunities for the management of these critical resources.

Keywords: Port tugboats, Tugboat scheduling, Port logistics, Port of Santos, Scoping review, Case study

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Logística Portuária e Coordenação de Recursos	4
2.2 Rebocadores Portuários como Recursos Operacionais Críticos	5
2.3 Gestão e Agendamento de Rebocadores Portuários	7
2.4 Parâmetros de Eficiência na Gestão de Rebocadores	9
2.5 Lacunas da Literatura e Necessidade de Estudos Empíricos	10
3 METODOLOGIA	14
3.1 <i>Scoping Review</i>	14
3.2 Estudo de caso – <i>Panel of Experts</i>	16
4 SCOPING REVIEW	18
4.1 <i>Scoping Review</i> : Desafios	18
4.1.1 Desafios Físico-Operacionais	18
4.1.2 Desafios Informacionais e Regionais	20
4.1.3 Desafios Tecnológico-Ambientais	21
4.2 <i>Scoping Review</i> : Oportunidades	22
4.2.1 Oportunidades em Sistemas de Inteligência e Automação de Decisão	24
4.2.2 Oportunidades em Modelos de Eficiência Verde (Green Shipping)	24
4.2.3 Oportunidades em Governança Estratégica e Infraestrutura	25
5 ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE REBOCADORES PORTUÁRIOS SUL-AMERICANA	27
5.1 Introdução a empresa estudada e à sua operação	27
5.2 Análise Crítica – Desafios	29
5.3 Análise Crítica – Oportunidades	30
5.4 Discussões	33
6 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representação dos pontos de atuação dos rebocadores (<i>tug points</i>) em diferentes tipos de manobras portuárias	6
Figura 2: <i>Framework</i> de solução para o problema de agendamento dinâmico de rebocadores (DTugSP)	8
Figura 3: Estrutura em rede do problema de agendamento de rebocadores portuários	11
Figura 4: Estágios da abordagem metodológica inspirada em Wieland e Wallenburg	14
Figura 5: O modelo PRISMA (<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>) para a revisão de escopo	16

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Desafios Críticos na Gestão Portuária e Agendamento de Rebocadores.....	18
Tabela 2: Oportunidades Estratégicas na Gestão de Rebocadores e Eficiência Portuária.....	22
Tabela 3: Número Mínimo de Rebocadores no Porto de Santos	28

GLOSSÁRIO

AT (Atracação – *Berthing*): Operação na qual uma embarcação é posicionada e amarrada em um berço portuário para realização de carga, descarga ou outras atividades.

BP (*Bollard Pull*): Capacidade máxima de tração estática de um rebocador, normalmente expressa em toneladas-força (tf), utilizada como principal indicador de potência operacional.

CEOP (Centro de Operações): Setor responsável pelo monitoramento, coordenação e programação das operações de rebocadores.

DT (Desatracação – *Unberthing*): Operação de retirada de uma embarcação de seu berço para início da navegação.

DWT (*Deadweight Tonnage*): Capacidade total de carga de uma embarcação, incluindo carga, combustível, água, provisões e tripulação.

ETA (*Estimated Time of Arrival*): Horário estimado de chegada de uma embarcação ao porto ou local de operação.

ETS (*Estimated Time of Sailing*): Horário estimado de saída de uma embarcação do porto ou local de operação.

FCFS (*First Come, First Served*): Regra de priorização em que o primeiro navio a solicitar atendimento é o primeiro a ser atendido.

MDP (*Markov Decision Process*): Modelo matemático utilizado para apoiar a tomada de decisões em ambientes sujeitos a incertezas.

MILP (*Mixed Integer Linear Programming*): Método de otimização matemática empregado para resolver problemas de planejamento, alocação e programação de recursos.

NORMAM-12: Norma da Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil que estabelece requisitos e procedimentos relacionados ao serviço de praticagem.

NTCP (Normas e Procedimentos da Capitania dos Portos): Conjunto de normas locais que regulamentam a navegação e as operações portuárias em determinada jurisdição.

WT (Tempo de Espera – *Waiting Time*): Período em que uma embarcação aguarda atendimento para a realização de uma operação portuária.

1 INTRODUÇÃO

Muito por conta da geografia em que o Brasil se insere caracterizada por uma grande costa e um elevado número de rios, nas *commodities* que o país produz e no grande volume de exportação e importação de produtos via modal marítimo, é visível um constante uso de portos e navios para o seu devido transporte interno e externo (ANTAQ, 2025). Nesse contexto, os portos configuram-se como nós logísticos que influenciam diretamente nas cadeias de suprimentos atuantes no país, nas quais a eficiência operacional e coordenação de recursos tornam-se fatores críticos para o desempenho da economia local, regional e global.

O aumento do porte das embarcações, impulsionado por economias de escala, trouxe grandes ganhos de eficiência no transporte de cargas, mas, em contrapartida, aumentou significativamente a complexidade das operações portuárias. Esse cenário torna-se benéfico uma vez que se pode economizar em combustível, frete e diminuir as emissões de gases poluentes que prejudicam o meio ambiente. Por outro lado, com navios maiores, as restrições de manobrabilidade mostram-se cada vez mais presentes, exigindo uma maior coordenação de recursos auxiliares nas suas manobras (WEI et al., 2024).

Segundo a Associação Mundial para a Infraestrutura de Transportes Aquaviários (PIANC, 2020), com o passar dos anos, foi possível observar um aumento nos investimentos relacionados a esse meio, possibilitando a construção de navios cada vez maiores. Por conta disso, foi necessário o desenvolvimento de outras embarcações, os rebocadores, para que a atracação e a desatracação de navios em portos fossem feitas da melhor e mais segura forma. Logo, a partir do momento em que esses navios começaram a operar mandatoriamente nos portos, esse processo tornou-se uma etapa crítica para a fluidez do *supply-chain* global.

Apesar do seu porte reduzido, os rebocadores configuram-se como recursos operacionais críticos, caracterizados por sua alta potência, elevado custo operacional e difícil disponibilidade. A alocação incorreta desses recursos pode gerar atrasos, aumento de custos e impactos negativos para todos os representantes das operações portuárias, reforçando ainda mais a sua importância e relevância na sua gestão operacional (SETYAWAN, ALIYYAH, MUTTAQIN, 2024). O papel específico do agendamento, neste contexto, é gerir a interdependência entre práticos, equipes de terra e rebocadores sob janelas de maré, condições meteorológicas e o padrão de demanda MSMW (*Multiple Services from Multiple Waypoints*), que obriga diferentes unidades a entrarem na manobra em tempos e pontos geográficos distintos.

Vale ressaltar, também, que a gestão dos rebocadores é caracterizada por ser de alta complexidade, uma vez que envolve diferentes variáveis que, nem sempre, co-dependem entre si. Esses podem incluir desde disponibilidade da frota e janelas operacionais, até condições meteorológicas e restrições portuárias, exigindo uma constante coordenação e tomada de decisão a cada momento, visando sempre minimizar os impactos e os custos relacionados (FANG et al., 2025). Portanto, o agendamento proativo deixa de ser uma mera lista de tarefas para se tornar uma estratégia de otimização bi-objetivo, visando simultaneamente a minimização dos tempos de espera e a redução da pegada de carbono por meio da otimização das velocidades de trânsito e da espera estratégica em pontos de maior probabilidade de demanda.

Apesar dos avanços observados na literatura acadêmica, ainda existe uma lacuna na literatura significativa no que se refere à estudos empíricos da gestão de agendamento de rebocadores portuários fora dos principais núcleos internacionais, ou até mesmo fora da Ásia. Em particular, o cenário brasileiro e, de forma mais ampla o sul-americano, ainda é pouco explorado no quesito dessas operações, carecendo de análises que investiguem essas operações e permitam comparações do que é feito atualmente no Brasil com o que é feito nos grandes polos logísticos e na literatura internacional (VIEIRA et al., 2015). Nesse sentido, torna-se necessário aprofundar a compreensão sobre a gestão do agendamento de rebocadores a partir da identificação e análise de seus principais benefícios e desafios, de modo a confrontar a realidade amplamente discutida no âmbito global com a realidade operacional de um porto situado em um país sul-americano, como o Brasil (WEI et al., 2025).

Enquanto o estado da arte na literatura foca em algoritmos proativos para portos como Singapura (WEI et al., 2025) e Xangai (JIA et al., 2021), a gestão no cenário brasileiro enfrenta o desafio prévio da racionalização informacional. No Porto de Santos, um dos mais importantes da América do Sul, a multiplicidade de fluxos de dados e sistemas desconexos eleva o tempo de permanência da carga a patamares críticos (VIEIRA et al., 2015), situando a eficiência técnica abaixo dos padrões globais de excelência (MILLER & HYODO, 2022).

Diante disso, as perguntas de pesquisa são colocadas:

PP1: Quais são os principais benefícios e desafios da gestão do agendamento de operações de rebocadores portuários?

PP2: De que forma as práticas e características observadas nas operações globais de agendamento de rebocadores se relacionam com a realidade da gestão dessas operações em um porto da América do Sul?

Neste contexto, o objetivo principal deste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Produção é analisar o papel dos rebocadores no ambiente de logística portuária, com um maior enfoque na gestão dos seus agendamentos e nos principais parâmetros que influenciam essas decisões. Adicionalmente, o estudo busca comparar as práticas e abordagens observadas nas operações globais, conforme a literatura, e a realidade sul-americana, tendo como objeto o Porto de Santos.

Para alcançar o objetivo geral proposto, este estudo tem como objetivos específicos identificar, na literatura acadêmica, os principais parâmetros relacionados à gestão do agendamento de rebocadores portuários, bem como os benefícios e desafios associados a essas operações, compreender de que forma tais parâmetros são tratados na prática operacional, comparar convergências e divergências entre as práticas observadas na literatura internacional e a realidade dos portos sul-americanos, aqui representados pelo Porto de Santos e, por fim, identificar oportunidades de melhoria para a gestão do agendamento de rebocadores no contexto analisado.

Para atingir seu objetivo, uma metodologia em dois passos é realizada. Primeiramente é realizado um *scoping review* (revisão do escopo) para identificar os principais benefícios e desafios existentes na literatura acadêmica associados à gestão do agendamento de operações de rebocadores portuários, respondendo assim a primeira pergunta de pesquisa. Em seguida é realizado um estudo de caso em uma empresa sul-americana que possui alta cobertura em inúmeros portos brasileiros, comparando-a com o que se tem exposto na literatura em portos asiáticos de forma a comparar uma realidade sul-americana com operações internacionais, respondendo assim a segunda pergunta de pesquisa.

Este trabalho de pesquisa está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1, Introdução, apresenta o contexto, a relevância do tema, o problema de pesquisa, as perguntas de pesquisa e os objetivos geral e específicos do estudo. O Capítulo 2 trata do Referencial Teórico, reunindo os principais conceitos necessários para a compreensão do tema e para embasar as análises dos resultados. No Capítulo 3, é descrita a metodologia adotada para a realização da pesquisa. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com *scoping review* da literatura, endereçando a PP1. O Capítulo 5 apresenta o estudo de caso de uma operação sul-americana, incluindo sugestões de melhorias nos processos observados, respondendo a PP2. Por fim, o Capítulo 6, Conclusão, retoma as perguntas de pesquisa e os objetivos, apresentando as principais contribuições do estudo. Também são indicadas possibilidades de pesquisas futuras relacionadas ao tema, mas que extrapolam o escopo deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a pesquisa, sendo organizado em cinco seções que juntas reúnem conceitos e informações essenciais para a compreensão do tema.

2.1 Logística Portuária e Coordenação de Recursos

A logística portuária pode ser considerada uma das parcelas mais estratégicas e importantes da cadeia logística, sendo uma das principais maneiras de transportar produtos e matérias-primas intercontinentalmente em uma alta quantia e preços mais acessíveis (Armac, 2022).

Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2025), mais de 90% do transporte referente ao comércio exterior é feito por meio de portos, fazendo com que sua infraestrutura se torne algo de extrema importância para a cadeia logística brasileira. Em 2024, o Brasil movimentou aproximadamente 1,321 bilhão de toneladas de cargas em portos nacionais, cerca de 1,23% a mais do que no ano anterior. Sendo assim, o país se consolida como um dos principais atores e nós logísticos da América Latina.

A partir do que foi apresentado pelo relatório da Allied Market Research (AMR, 2023), o setor da infraestrutura portuária mundial apresenta uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) em torno de 4,4% no período de 2020 até 2021. Além disso, o valor estimado da indústria em 2030 estará em aproximadamente USD 243 bilhões e, consequentemente, irá modernizar os portos e todos os seus componentes.

Diante desse panorama, pode-se deduzir que, cada vez mais, os portos são vistos como nós de alta importância no comércio internacional. Consequentemente, esses deixam de ser apenas pontos de transbordo de cargas e passam a configurar sistemas operacionais complexos, nos quais a gestão eficiente do tempo e a coordenação de recursos tornam-se elementos centrais para o desempenho logístico (NOTTEBOOM, RODRIGUE, 2005; UNCTAD, 2023).

Diante disso, a gestão portuária evoluiu para um modelo de governança de recursos que exige uma visão cada vez mais integrada e sistêmica e, segundo Fang et al. (2025, p. 4, tradução livre), "a gestão de operações portuárias estabeleceu um *framework* colaborativo de múltiplas camadas centrado na alocação de berços, agendamento de guindastes e sequenciamento de tráfego de embarcações". Essa conjuntura mostra-se presente tanto com rebocadores, quanto

guindastes de operações e berços para atracação, os quais são recursos essenciais para a viabilização segura dessa cadeia.

Os portos, além de serem uma área muito benéfica para diferentes nações de portos distintos, apresenta diferentes restrições que necessitam de um alto controle relacionados à própria gestão interna. Segundo Wei et al. (2024), a eficiência logística em portos contemporâneos é condicionada pela orquestração de recursos em ambientes de espaço físico limitado, onde a gestão de ativos deve respeitar rigorosas janelas de atracação e condições ambientais que definem o domínio temporal em que as manobras são viáveis.

Além desse fator, literatura mostra que o sucesso dessas operações depende da sincronização entre os principais agentes já apresentados, exigindo que esses coordenem suas ações de forma escalonada para atender às restrições de mão de obra, infraestrutura e disponibilidade (FANG et al., 2025). A não gestão desses recursos pode causar ineficiências sistêmicas e atrasos onerosos para a cadeia de suprimentos nacional e global.

Portanto, a eficiência da operação portuária depende de inúmeros fatores que necessitam colaborar entre si para garantir a fluidez do transporte marítimo de um porto. É nesse gargalo onde o navio deixa de ser uma unidade de transporte oceânico para se tornar um objeto de manobra restrita, que os recursos de apoio náutico tornam-se o elo determinante para a integridade de todo o sistema logístico portuário do local em que ele está sendo transportado (JIA et al., 2021; WEI et al., 2024).

2.2 Rebocadores Portuários como Recursos Operacionais Críticos

As embarcações marítimas possuem um papel fundamental no transporte de cargas e pessoas, sendo responsáveis por aproximadamente 80% do volume do comércio global, de acordo com a United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, 2024). Elas são essenciais por conseguirem levar grandes volumes em um baixo custo e por sua flexibilidade de operação e de tipos de carga, por exemplo, graneis sólidos, graneis líquidos, contêineres, veículos, entre outros.

Para que essas grandes embarcações possam escoar suas cargas, é necessário o uso de outras embarcações, os rebocadores portuários, para auxiliar em seus processos de manobras nos portos. Os rebocadores são barcos de pequeno porte que, por possuírem uma potência extremamente alta, auxiliam majoritariamente na atracação e desatracação de navios em portos, sendo obrigatória sua presença em grande parte dos portos brasileiros (NORMAM-12/DPC). Eles são essenciais para garantir uma operação mais segura, precisa e ágil, muitas vezes em

áreas restritas, além de terem alta importância na garantia da otimização da logística portuária e são classificados pelo seu Bollard Pull, que mede a tração estática que o cabo da embarcação consegue fazer (HANSEN, HENK, “Tug Use in Ports”, 1997).

A operação dos rebocadores ocorre por meio da atuação em pontos específicos do casco das embarcações, conhecidos como *tug points*, nos quais os cabos de reboque são conectados para permitir o controle da movimentação do navio durante as manobras portuárias. Dependendo do tipo de operação, sendo elas atracação, desatracação ou giro da embarcação, diferentes quantidades de rebocadores e diferentes posições de apoio podem ser necessárias. A Figura 1 ilustra esquematicamente essas configurações operacionais e demonstra como os rebocadores atuam diretamente na condução das manobras em ambientes portuários restritos (JIA et al., 2021).

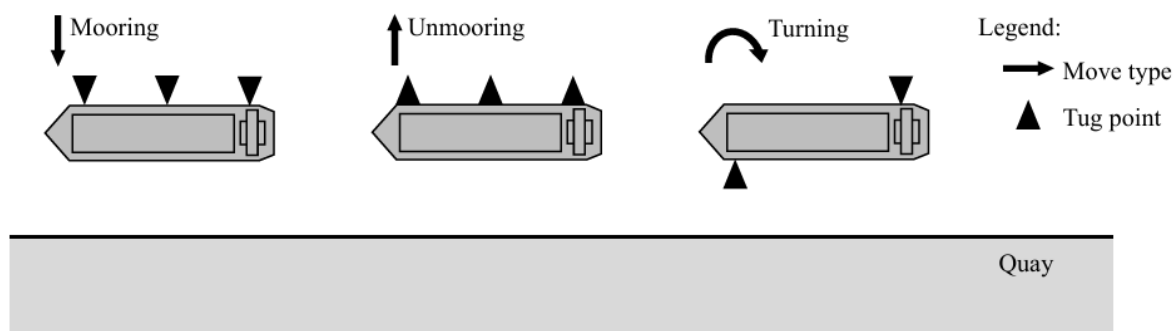


Figura 1 – Representação dos pontos de atuação dos rebocadores (tug points) em diferentes tipos de manobras portuárias

Fonte: Adaptado de Jia et al. (2021).

Dessa forma, destaca-se a importância do uso dos rebocadores, se mostrando um pilar essencial não só para o funcionamento e desempenho de um porto, mas também para a cadeia logística como um todo. Segundo Wei et. al (2025), “navios de grande porte, como os modernos contêineres, enfrentam desafios críticos de navegabilidade ao transitarem por canais estreitos e águas rasas, onde as baixas velocidades exigidas degradam a eficácia de seus próprios lemes e propulsores”.

Por conta disso, sua eficiência influencia diretamente “vessel turnaround time” (tempo de giro do navio), uma vez que qualquer ineficiência no agendamento ou na potência disponível prolonga a permanência da embarcação no porto, impactando a produtividade do terminal (SETYAWAN et. al, 2024). Destaca-se que, além disso, que essa ineficácia pode causar um

efeito cascata na operação do porto, onde o atraso ou qualquer mau uso do rebocador, pode levar na ociosidade de todos os elementos que estão interligados no dia-a-dia do porto, retardando a operação de outras embarcações e, futuramente, prejudicando o lucro daqueles envolvidos nas manobras (WEI et. al, 2025).

Por outro lado, pode-se afirmar que a natureza dos rebocadores é vista, também, como recursos inerentemente escassos e de alta complexidade operacional, podendo causar atrasos e gargalos em momentos com altos picos de demanda (FANG et al., 2025). Além desse fator, o alto custo operacional - como o alto custo de manutenção e de pessoal, junto com o constante consumo de combustível - é uma variável que necessita ser levada a qualquer momento, para que a otimização desses ativos seja a causa de uma fonte rentável para a cadeia logística-portuária como um todo (WEI et al., 2024). Ademais, essa escassez se evidencia ainda mais através da impossibilidade de atender simultaneamente, um rebocador apenas pode operar um navio por vez, como evidenciado por WEI et al., 2020, necessitando sempre uma priorização estratégica no momento das suas chamadas.

Contudo, a operação dos rebocadores portuários não ocorre de maneira independente dentro do cenário de um porto, muitos outros agentes também trabalham para que haja a maior e melhor eficiência do sistema (NOTTEBOOM et al., 2023). A literatura ressalta que o agendamento dessas embarcações deve estar em estrita sincronia com a coordenação dos práticos e a disponibilidade imediata de berços, em conjunto com as janelas de maré, condições climáticas e conjunturas ambientais, que restringem o período em que navios de grande calado podem navegar com segurança (FANG et al., 2025).

2.3 Gestão e Agendamento de Rebocadores Portuários

A logística portuária contemporânea é vista como um dos pontos principais para a cadeia de suprimentos global, sendo caracterizada por um alto fluxo de embarcações de diferentes portes (WEI et al., 2020). Nesse cenário, a produtividade global do terminal não depende exclusivamente da infraestrutura física, mas da orquestração precisa de um framework colaborativo que integra a alocação de berços, o escalonamento de guindastes e o sequenciamento do tráfego náutico (VIEIRA et al., 2015).

Diante disso, a literatura ressalta que a eficiência de um porto é condicionada pela sincronização entre a interface mar e a interface terra, e como já mencionado, os rebocadores portuários ligam-se a essa tese a partir de serem um elo essencial para a garantia da segurança e a eficiência das manobras. Assim, o agendamento desses serviços auxiliares deixa de ser uma

tarefa meramente logística de despacho para se tornar uma variável estratégica: a falha na coordenação dos rebocadores gera efeitos cascata que comprometem a utilização de equipamentos de alto custo e elevam o turnaround time das embarcações (JIA et al., 2020).

A partir desses fatores, fica visível que o agendamento dos rebocadores é uma problemática dinâmica e, segundo WEI et al. (2025), “um dos fatores críticos de dinamismo reside na incerteza dos horários de chegada e partida dos navios, dados globais de 2019 revelam que a pontualidade dos porta-contêineres foi de apenas 47%, o que torna os tempos estimados de chegada, atracação e saída, variáveis pouco confiáveis para planos estáticos”. Como a demanda por serviços não é totalmente conhecida de forma antecipada, tendo em média 2 horas de antecedência até a obtenção das devidas informações, os gestores enfrentam o desafio de integrar novos pedidos a um plano já em curso (WEI et al., 2024).

A literatura modela o problema de agendamento de rebocadores como um processo dinâmico de decisão, no qual o sistema operacional é continuamente atualizado conforme novas informações sobre a chegada de embarcações e a disponibilidade de recursos se tornam conhecidas. A Figura 2 apresenta o framework típico de solução proposto na literatura para resolver o problema de sequenciamento dinâmico de rebocadores (WEI et al., 2021).

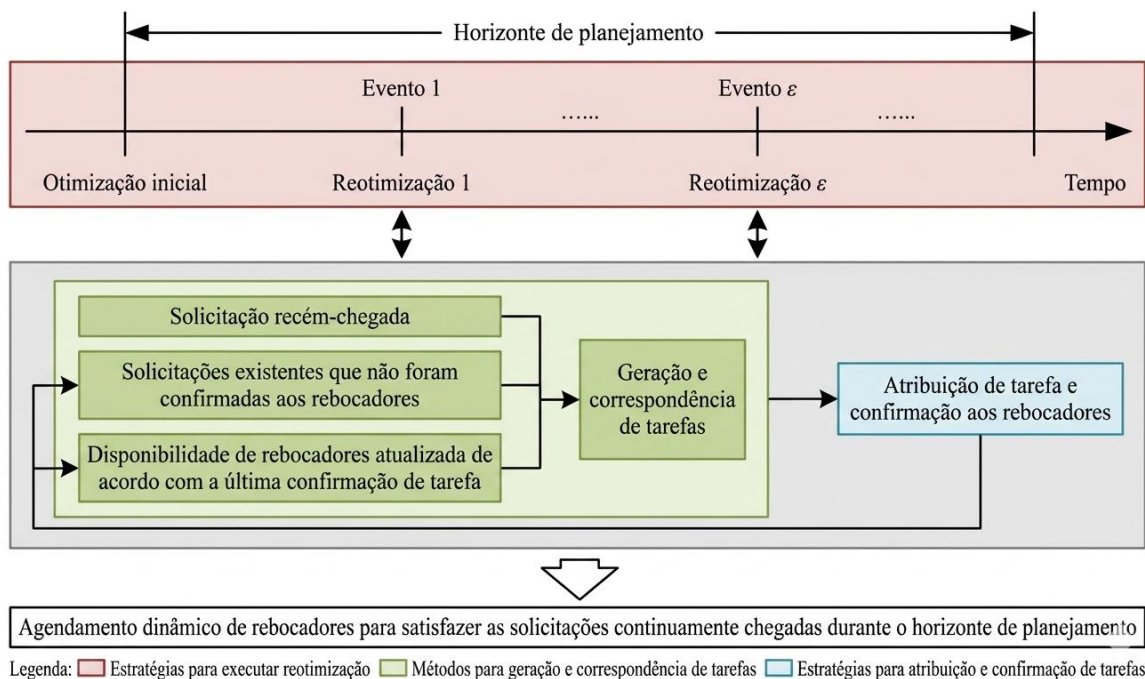


Figura 2 – Framework de solução para o problema de agendamento dinâmico de rebocadores (DTugSP)

Fonte: adaptado de Wei et al. (2021).

Com o objetivo de ilustrar e exemplificar a arquitetura sistêmica do método de Solução Dinâmica de Agendamento de Rebocadores (DTS), a Figura 2 é estruturada em três macrocomponentes interdependentes que operam ao longo do horizonte de planejamento. O processo é desencadeado por estratégias de reotimização baseadas em eventos, como, por exemplo, a chegada de novas requisições ou a confirmação de serviços, que disparam o ciclo de decisão toda vez que o estado do sistema é alterado. No centro desse fluxo, encontram-se os métodos para a geração e o emparelhamento de tarefas, que processam dados de requisições recém-chegadas, demandas pendentes e a disponibilidade atualizada da frota heterogênea para criar conjuntos de tarefas viáveis. Por fim, o *framework* consolida a gestão operativa por meio de estratégias de atribuição e confirmação de serviços, resultando em um agendamento dinâmico que minimiza os custos operacionais totais enquanto responde prontamente ao caráter estocástico e dinâmico das operações portuárias contemporâneas.

Por outro lado, a otimização do agendamento de rebocadores é orientada pela necessidade fundamental de equilibrar a eficiência econômica com o nível de serviço oferecido aos armadores (JIA et al., 2021). Diante disso, WEI et al. (2020) focam na minimização dos custos operacionais de deslocamento, FANG et al. (2025) destacam a gestão de tempo e a competitividade é afetada a partir do momento que o tempo de espera para as manobras mudam, WEI et al. (2025) introduzem a necessidade de mitigar a tardança no atendimento, com um maior foco em sustentabilidade e eficiência energética, todos esses aspectos entram em discussão tendo em base a maximização da utilização da frota.

2.4 Parâmetros de Eficiência na Gestão de Rebocadores

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2022), eficiência operacional se dá a partir da realização de operações portuárias com o menor tempo, custo e desperdício possível, mas sem perder a qualidade oferecida. Dessa maneira, pode-se dizer que é um dos principais indicadores que fazem um porto se destacar dos demais.

A literatura aponta que a eficiência da logística portuária pode ser avaliada a partir de diferentes indicadores de desempenho operacional. Entre os principais estão o tempo de permanência de navios no porto, o tempo de espera para atracação, a capacidade de movimentação de cargas e o nível de utilização da infraestrutura portuária. Esses indicadores, frequentemente chamados de *Port Performance Indicators* (PPIs), são utilizados para medir a produtividade e a eficiência das operações portuárias, sendo influenciados por fatores como

capacidade de berços, equipamentos de movimentação e organização das operações logísticas (MILLER & HYODO, 2022; WORLD BANK, 2023).

Dentro desse contexto, a gestão eficiente dos recursos operacionais torna-se um elemento essencial para o desempenho dos portos. Entre esses recursos destacam-se os rebocadores portuários, que desempenham papel fundamental na realização de manobras de atracação e desatracação de navios. A adequada alocação e coordenação desses recursos pode reduzir tempos de espera e atrasos nas operações, contribuindo para melhorar a eficiência geral das atividades portuárias (JIA et al., 2021; WEI et al., 2021).

Diante do que foi analisado pela PIANC, o uso de tecnologias, automatização de processos e sistemas, junto com o monitoramento de operações em tempo real, estão se mostrando como um diferencial. Isso faz com que muitos portos melhorem suas operações e adquiram indicadores positivos, impactando as operações de cabotagem e internacionais.

Nesse sentido, a literatura aponta que a eficiência na gestão de rebocadores pode ser analisada a partir de diferentes parâmetros operacionais, tais como o tempo de espera das embarcações para atendimento (FANG et al., 2025; WEI et al., 2025), o tempo médio de realização das manobras, componente crítico do vessel turnaround time (SETYAWAN et al., 2024; WEI et al., 2024), o nível de utilização da frota de rebocadores (WEI et al., 2024; WEI et al., 2025) e os custos operacionais associados às operações portuárias, incluindo consumo de combustível e taxas fixas (JIA et al., 2021; WEI et al., 2024). A análise desses parâmetros permite avaliar o desempenho das operações de apoio à navegação e compreender de que forma a gestão desses recursos impacta a eficiência geral das atividades portuárias, uma vez que a coordenação entre o lado mar (seaside) e o lado terra (landside) determina a fluidez do nó logístico (MILLER & HYODO, 2022; WEI et al., 2024).

2.5 Lacunas da Literatura e Necessidade de Estudos Empíricos

A produção acadêmica voltada à gestão e ao escalonamento de rebocadores portuários caracteriza-se por uma forte predominância de abordagens centradas em modelos teóricos e de otimização matemática (WEI et al., 2025). Diversas pesquisas dedicam-se ao desenvolvimento de metodologias para aperfeiçoar o agendamento desses recursos, incorporando variáveis como restrições operacionais severas, incertezas estocásticas e metas de desempenho, tendo um maior destaque para a mitigação da tardança dos navios e a redução de custos operacionais e de combustível (FANG et al., 2025).

Embora tais contribuições ampliem o entendimento técnico-científico acerca da complexidade do problema, (frequentemente classificado como NP-difícil), nota-se que a literatura tende a privilegiar simulações e modelos computacionais que operam sob suposições simplificadoras, como velocidades padronizadas ou frotas homogêneas (WEI et al., 2020). Consequentemente, observa-se uma lacuna em relação a análises que aprofundem o entendimento das práticas operacionais reais e dos fluxos de informação cotidianos adotados nos terminais, os quais frequentemente dependem de decisões manuais e enfrentam disfunções de coordenação que os modelos teóricos nem sempre capturam (VIEIRA et al., 2015).

A literatura internacional tem avançado significativamente na modelagem matemática do problema de agendamento de rebocadores portuários. Diversos estudos formulam o problema como modelos de programação inteira ou estruturas de otimização em rede, capazes de representar simultaneamente as restrições de capacidade, janelas de tempo e compatibilidade entre embarcações e rebocadores. A Figura 3 apresenta um exemplo de representação em rede utilizada para modelar o problema de *scheduling* de rebocadores, evidenciando a complexidade estrutural envolvida na otimização dessas operações (JIA et al., 2021).

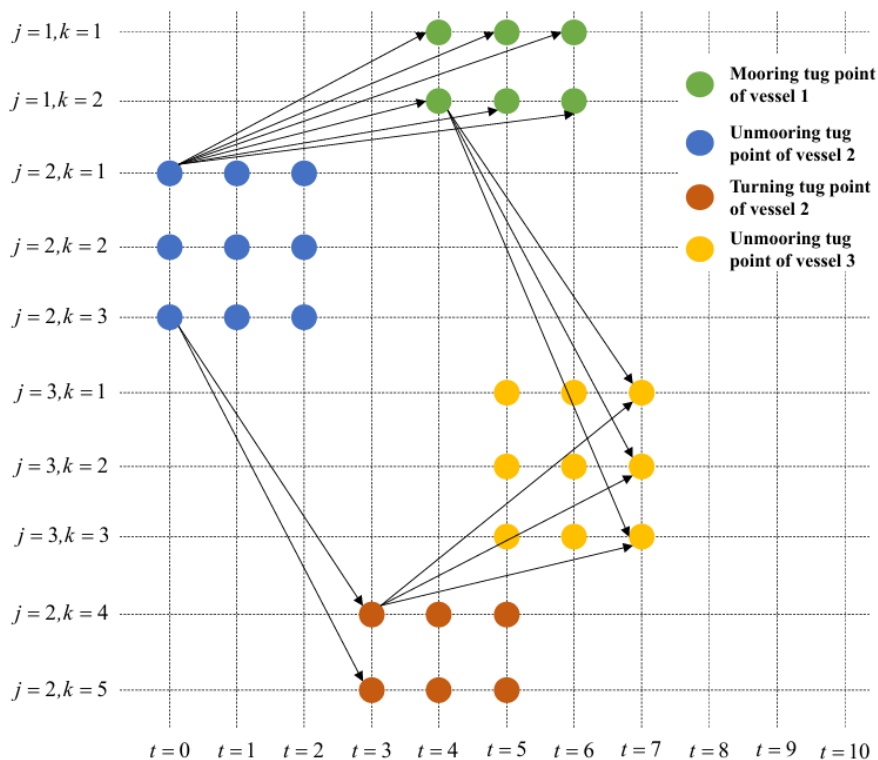


Figura 3 – Estrutura em rede do problema de agendamento de rebocadores portuários

Fonte: Adaptado de Jia et al. (2021).

A utilização de estruturas matemáticas dessa natureza evidencia o elevado nível de sofisticação alcançado pela literatura internacional na análise do problema. Entretanto, segundo Vieira et al. (2015), muitos portos ainda operam com processos decisórios baseados predominantemente na experiência operacional dos gestores e na comunicação direta entre os agentes envolvidos, o que reforça a necessidade de estudos empíricos que investiguem como essas decisões são tomadas na prática.

A produção técnico-científica acerca da gestão de rebocadores e otimização portuária apresenta uma marcante concentração geográfica em terminais de alta densidade localizados na Ásia, Europa e América do Norte. Estudos contemporâneos utilizam predominantemente dados operacionais de portos como os de Singapura e Xangai, caracterizados por uma infraestrutura logística altamente desenvolvida e ampla disponibilidade de dados de monitoramento em tempo real, como o sistema AIS (WEI et al., 2024; JIA et al., 2021). Nesses contextos, a literatura foca em modelos matemáticos avançados (MILP e MDP) para refinar a eficiência de frotas que já operam em níveis de excelência global (WEI et al., 2025; FANG et al., 2025).

Como consequência dessa questão apresentada, observa-se uma limitação de pesquisas voltadas para a realidade técnica e informacional de portos em países em desenvolvimento, com destaque para a América Latina e o Caribe (MILLER & HYODO, 2022). Enquanto os modelos internacionais buscam otimizar variáveis como a velocidade de trânsito para redução de carbono (WEI et al., 2025), a realidade sul-americana enfrenta gargalos estruturais e burocráticos distintos. Miller e Hyodo (2022) ressaltam que, embora a expansão do Canal do Panamá tenha impulsionado a eficiência técnica na região (subindo de 72% para 75% de média anual), portos como o de Santos, vistos por Vieira et al., 2015, mesmo sendo o maior da América Latina (APS - Autoridade Portuária de Santos, 2023), ainda registram baixos índices de qualidade de infraestrutura se comparados aos pares asiáticos.

Essa lacuna dificulta a aplicação dessas práticas de gestão, uma vez que o contexto logístico sul-americano é marcado por disfunções na coordenação de recursos. Vieira et al. (2015) demonstram que, no Porto de Santos, a ineficiência não decorre apenas de limitações físicas, mas de uma severa "multiplicidade de sistemas para gerir operações" e fluxos de informação fragmentados, o que eleva o dwell time (tempo de permanência) na importação para 15,6 dias, patamar consideravelmente superior aos padrões de portos de transbordo internacionais (VIEIRA et al., 2015; MILLER & HYODO, 2022). Portanto, a compreensão de como recursos críticos, como os rebocadores, são agendados em cenários de alta incerteza e

baixa integração sistêmica permanece um campo fértil e necessário para estudos empíricos locais.

Portanto, diante do predomínio de modelos puramente matemáticos aplicados a portos de alta densidade na Ásia e Europa (WEI et al., 2024; JIA et al., 2021), torna-se essencial o desenvolvimento de estudos empíricos que investiguem a gestão de rebocadores em ecossistemas portuários reais, especialmente no contexto da América Latina. Análises fundamentadas em estudos de caso permitem compreender como as decisões de agendamento são processadas frente a restrições operacionais severas, à disponibilidade limitada de ativos e às disfunções de coordenação, como a multiplicidade de sistemas e fluxos de informação fragmentados identificados no Porto de Santos (VIEIRA et al., 2015). Essa abordagem possibilita o contraste entre os parâmetros de eficiência discutidos na literatura acadêmica, como, por exemplo, a otimização bi-objetivo de "carbono-tempo" e a espera proativa (FANG et al., 2025; WEI et al., 2025), e as práticas reais de gestão manual que ainda predominam em terminais com menores índices de qualidade de infraestrutura e avanços tecnológicos (MILLER & HYODO, 2022).

Em última análise, essa investigação contribui para aproximar o rigor teórico da realidade prática, ampliando o entendimento sobre como o agendamento preciso de recursos escassos pode mitigar o *vessel turnaround time* e elevar a competitividade sistêmica do nó portuário (SETYAWAN et al., 2024; VIEIRA et al., 2015).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste Trabalho Final de Curso está estruturada em duas etapas complementares e sequenciais, cada uma detalhada em uma subseção específica. Na primeira etapa, realiza-se uma *scoping review* (MACHADO et al., 2021) com o objetivo de mapear e sistematizar, a partir da literatura acadêmica, os principais benefícios e desafios associados à gestão do agendamento de operações de rebocadores portuários, permitindo responder à primeira pergunta de pesquisa. Na segunda etapa, desenvolve-se um estudo de caso, através de um *panel of experts* (SANTIAGO et al., 2025), em uma empresa sul-americana com ampla atuação em diversos portos brasileiros, no qual são analisadas as práticas operacionais adotadas e estabelecida uma comparação com aquelas reportadas na literatura internacional, especialmente em portos asiáticos. Essa abordagem possibilita contrastar a realidade sul-americana com contextos internacionais de referência, atendendo à segunda pergunta de pesquisa. Abaixo está apresentada a Figura 4 que sumariza essa abordagem de pesquisa em dois estágios inspirada por Wieland e Wallenburg (2012), que é descrita nas duas subseções seguintes.

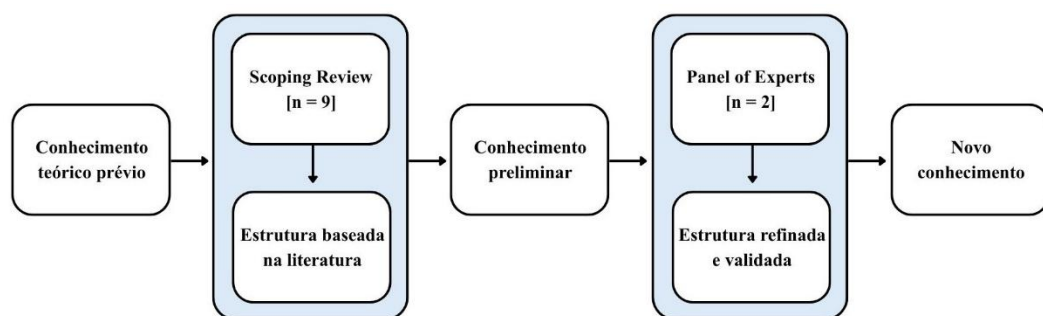


Figura 4: Estágios da abordagem metodológica (Wieland & Wallenburg, 2012)

Fonte: Autoral

3.1 *Scoping Review*

A primeira fase da pesquisa consiste em uma *scoping review*, procedimento sistemático ideal para mapear conceitos fundamentais e evidências em áreas de conhecimento complexas ou em rápida evolução. Seguindo as diretrizes de Arksey e O'Malley (2005), esta etapa visa identificar o "estado da arte" do agendamento de rebocadores, focando na extração de variáveis críticas e modelos de decisão reportados globalmente.

Com base no *Scoping Review*, são identificados os principais parâmetros operacionais, possuindo um maior enfoque nos desafios operacionais e oportunidades estratégicas emergentes associados à gestão de rebocadores portuários. Entre esses parâmetros, destacam-se fatores como tempo de espera, alocação de recursos, janelas operacionais, variabilidade da demanda, restrições ambientais, entre outros. Essa etapa permite estruturar com mais clareza o conhecimento teórico de forma aplicada, servindo como o principal recurso utilizado nas análises subsequentes e, conseqüentemente, resultado desta revisão fornece a fundamentação teórica para as categorias analíticas que guiarão a coleta de dados empíricos.

Para assegurar o rigor metodológico e a transparência no processo de seleção das evidências científicas, a primeira etapa deste trabalho, a *scoping review*, utilizou o protocolo PRISMA (Figura 5). Esse procedimento permitiu o mapeamento sistemático da literatura através de quatro fases distintas: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Inicialmente, foram consultadas bases de dados de alta relevância para a engenharia industrial e logística, como Scopus e Web of Science, utilizando strings de busca que integram os conceitos de agendamento de rebocadores, gestão portuária e eficiência operacional.

O processo de filtragem incluiu a remoção de duplicatas e a aplicação de critérios de inclusão rigorosos, focando exclusivamente em artigos de periódicos revisados por pares que abordassem desafios operacionais e oportunidades de otimização tecnológica. Adicionalmente, aplicou-se a técnica de busca em cadeia (*snowballing*) para garantir a inclusão de obras seminais não capturadas nas buscas iniciais (Thomé et al, 2016), resultando em uma amostra robusta que fundamenta as categorias analíticas exploradas nas seções de Desafios e Oportunidades deste estudo. Iniciou-se com 21 artigos tendo como base nas palavras-chaves “tugboats” e “supply chain” nas bases de dados do Scopus e Web of Science. Após remoção das duplicatas, triagens por títulos e resumos, e retirada dos estudos que não se tratavam diretamente sobre a busca, chegou-se no número de 9 artigos para serem usados de base no *Scoping Review*, conforme o que está exposto na Figura 5 abaixo.

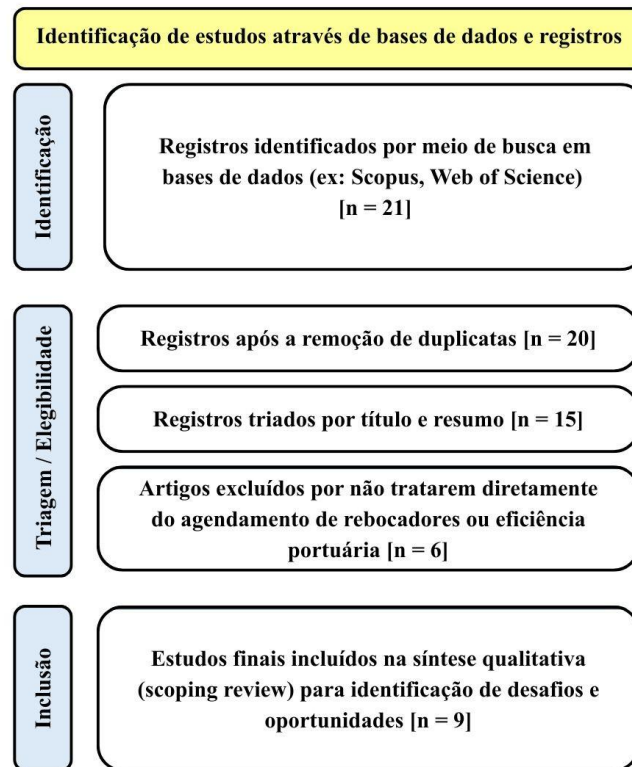


Figura 5: O modelo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) para a revisão de escopo.

Fonte: Autoral

3.2 Estudo de Caso – *Panel of Experts*

A segunda etapa metodológica transita da teoria para a prática industrial por meio de um estudo de caso qualitativo-exploratório. Para validar os achados da literatura e adaptá-los à realidade logística brasileira, utiliza-se a técnica de *panel of experts* (painel de especialistas), conforme aplicado em Machado et al. (2021) e Santiago et al. (2025).

Diante dos parâmetros de desafios e oportunidades identificados na literatura, foi elaborado um roteiro de entrevistas semiestruturadas, com o objetivo de capturar a percepção dos profissionais envolvidos nas operações portuárias de uma Empresa de Rebocadores Portuários Sul-americana. As perguntas foram direcionadas, resumidamente, para compreender o processo de agendamento dos rebocadores, identificar variáveis consideradas na tomada de decisão, levantar dificuldades operacionais e indicar oportunidades de melhoria.

Essa etapa garantiu o alinhamento entre teoria e coleta de dados empíricos, além de entender se existem ou não parâmetros abordados na realidade sul-americana que não foram estudados, ou não são uma realidade, da literatura internacional. A etapa buscou obter dados

qualitativos sobre o funcionamento das operações da empresa, incluindo, critérios de alocação de rebocadores, dinâmica das operações, limitações enfrentadas no dia a dia. Os dados coletados foram analisados com o objetivo de compreender a gestão operacional dos rebocadores portuários na empresa estudada e envolveram identificação do fluxo de decisão, entendimento das restrições operacionais, avaliação da eficiência do processo de agendamento.

Por fim, realizou-se uma análise comparativa entre os desafios e oportunidades identificados na literatura, e a realidade observada no estudo de caso, identificando-se, assim, as lacunas entre teoria da literatura internacional e prática da empresa sul-americana, aderência dos modelos teóricos à operação real e oportunidades de melhoria na sua gestão.

A aplicação dessas etapas possibilitou uma abordagem estruturada para o estudo do agendamento de rebocadores portuários, integrando fundamentos teóricos e evidências empíricas. A combinação entre *scoping review* e estudo de caso permitiu não apenas compreender os avanços da literatura internacional, mas também avaliar sua aplicabilidade no contexto operacional real, contribuindo para a identificação de lacunas e oportunidades de desenvolvimento na área.

4 SCOPING REVIEW

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos com o *scoping review*, tendo sua primeira seção focada nos desafios e a segunda nas oportunidades, endereçando, assim, a PP1.

4.1 Scoping Review: Desafios

A Tabela 1 apresenta os desafios que foram analisados na literatura internacional, o tipo de desafio que ele representa, sua breve descrição e suas respectivas referências. Os desafios estão organizados em Físico-operacionais, informacionais e regionais e tecnológicos ambientais, conforme descritos a seguir e que serão aprofundados mais à frente.

Tabela 1: Desafios na Gestão Portuária e Agendamento de Rebocadores

DESAFIO	TIPO DE DESAFIO	DESCRIÇÃO TÉCNICA E IMPACTO OPERACIONAL	REFERÊNCIAS
Dinamismo e Estocasticidade	Físico-Operacionais	Incerteza nos horários de chegada (ETA) e partida (ETD), apenas 47% dos navios cumpriram janelas em 2019. Demanda revelada em tempo real exige agendamento adaptativo.	WEI et al. (2025, 2024); SETYAWAN et al. (2024).
Complexidade de Coordenação (MSMW)	Físico-Operacionais	O padrão <i>Multiple Services from Multiple Waypoints</i> exige que múltiplos rebocadores entrem/saiam da manobra em pontos geográficos e tempos distintos, gerando alta interdependência.	WEI et al. (2021, 2024, 2025); FANG et al. (2025).
Restrições Ambientais e Físicas	Físico-Operacionais	Janelas de maré rigorosas, ventos e manobrabilidade limitada em canais estreitos/rasos que tornam a assistência náutica mandatória e sensível ao tempo.	FANG et al. (2025); WEI et al. (2021, 2025); JIA et al. (2021).
Disfunções de Informação	Informacionais e Regionais	Fragmentação de dados, multiplicidade de sistemas desconexos e processos manuais que elevam o dwell time.	VIEIRA et al. (2015); MILLER & HYODO (2022).

Gargalos de Infraestrutura (LAC – <i>Latin America and the Caribbean</i>)	Informacionais e Regionais	Baixa qualidade de infraestrutura em portos da América Latina e Caribe comparada a centros globais, limitando a escala de operação.	MILLER & HYODO (2022).
Equilíbrio Bi-objetivo (Green Shipping)	Tecnológico-Ambientais	Conflito entre minimizar o tempo de espera do navio e reduzir emissões de CO ₂ /consumo de combustível da frota de rebocadores.	FANG et al. (2025); WEI et al. (2025).
Ineficiência Energética da Frota	Tecnológico-Ambientais	Rebocadores operam em baixa carga (menos de 20% da potência) em 87% do tempo, resultando em alto desperdício e custos operacionais desnecessários.	HAYTON (2023).
Complexidade Computacional (NP-Hard)	Tecnológico-Ambientais	Dificuldade matemática de otimizar frotas heterogêneas e múltiplas bases em tempo real para evitar o efeito cascata de atrasos.	JIA et al. (2021); WEI et al. (2024, 2025).

Fonte: Autoral & Referências Expostas

4.1.1 Desafios Físico-Operacionais

Os desafios físico-operacionais referem-se às restrições materiais e espaciais inerentes ao ambiente portuário, onde a infraestrutura limitada e a hidrodinâmica dos canais de acesso condicionam a manobrabilidade das embarcações. Sob a ótica da logística portuária, o porto deixa de ser apenas uma interface terrestre e passa a ser um sistema de manobra restrita, onde a fluidez é ditada pela capacidade física de canais e berços de absorverem o tráfego náutico sob condições ambientais variáveis. Pode-se incluir dentro desse conjunto de desafios os tópicos de Dinamismo e Estocasticidade (1), Complexidade de Coordenação (MSMW) (2) e Restrições Ambientais e Físicas (3).

Em relação ao Desafio 1, Dinamismo e Estocasticidade, pode-se afirmar que ele se refere à variabilidade imprevisível nos horários de chegada (ETA) e partida (ETS) das embarcações, influenciada por condições climáticas, congestionamento de tráfego e falhas mecânicas. Diante desse fator, o agendamento não pode ser analisado como um estudo estático, ele exige atualizações em tempo real conforme as solicitações de serviço são confirmadas, muitas vezes com menos de duas horas de antecedência. Essa natureza estocástica obriga os gestores a adotarem modelos adaptativos para evitar a subutilização da frota ou atrasos críticos,

pois, segundo dados de 2019 trazidos por Wei et al., 2025, apenas 47% dos porta-contêineres cumpriram suas janelas de tempo. Por fim, levando para a realidade dos rebocadores portuários, essa questão os faz aguardar ou realizar trânsitos apressados para compensar o atraso do cliente.

No que se refere ao Desafio 2, Complexidade de Coordenação (MSMW - *Multiple Services from Multiple Waypoints*), é possível observar, primeiramente, que a logística portuária e marítima, diferentemente da logística de terra, onde um veículo atende múltiplos clientes, na rebocagem ocorre o inverso: múltiplos recursos atendem um único cliente. Traduzido para o português, MSMW significa “Múltiplos Serviços de Múltiplos Pontos”, o conceito o qual descreve manobras onde rebocadores adicionais devem entrar na operação em pontos geográficos específicos (*waypoints*) à medida que o navio avança por canais restritos, intensificando a complexidade de sua operação. Essa problemática pode ser exemplificada através de ambas os pontos de vista, tanto o do cliente, com o efeito cascata da falta ou atraso de um ou mais rebocadores ao atender a manobra, quanto do fornecedor, que já está presente com todas as embarcações e o navio ainda não está preparado para sua atracação, os quais ambos impactam toda a sincronia e funcionamento do terminal e, ou, porto.

Acerca do Desafio 3, voltado para Restrições Ambientais e Físicas, pode-se constatar que a infraestrutura física impõe limites severos na operação de atracação e desatracação dos navios. Aqueles de grande porte apresentam uma manobrabilidade ainda mais restringida, esse cenário se torna ainda mais presente a partir do momento em que os canais se tornam mais estreitos e rasos, carecendo o uso dos rebocadores portuários. Por outro lado, em muitos terminais, a viabilidade técnica da manobra é restrita a janelas temporais rígidas ditadas pelas marés, o que torna o tempo um recurso escasso onde navios de grande calado sofrem dificuldades em suas atracações nos terminais.

4.1.2 Desafios Informacionais e Regionais

Este grupo de desafios compreende a arquitetura dos fluxos de dados e a governança entre os diversos atores da cadeia portuária, situando o problema dentro de um contexto geográfico específico, nesse caso no porto de Santos no início dos anos de 2010 e o porto do Panamá no início dos anos 2020. A eficiência técnica não é apenas uma função de ativos físicos, mas da racionalização de sistemas e da capacidade de integração informacional entre autoridades portuárias, terminais e prestadores de serviço, especialmente em economias em desenvolvimento. Incluem-se nesse contexto os tópicos referentes às Disfunções de Informação (4) e aos Gargalos de Infraestrutura (LAC – *Latin America and the Caribbean*) (5).

Iniciando a análise referente a esse tópico, o Desafio 4, Disfunções de Informação, apresenta que a eficiência técnica é prejudicada, principalmente, pela falha nos fluxos de dados. Dentro desse fator, a existência de múltiplos sistemas desconexos, como o Siscomex, Mercante, Porto Sem Papel, gerando, assim, redundância de dados e atrasos documentais. Por outro lado, as ineficiências informacionais elevam drasticamente o tempo de permanência da carga. Segundo Vieira et al., 2015, em Santos, o *dwell time* na importação chega a 15,6 dias, patamar consideravelmente superior aos padrões globais de eficiência.

Por outra perspectiva, o Desafio 5, caracterizado pelos Gargalos de Infraestrutura (LAC), traz um ponto de vista que, embora após a expansão do Canal do Panamá, em junho de

2016, ainda registram baixos índices de desenvolvimento de infraestrutura se comparados aos terminais asiáticos. Enquanto portos asiáticos utilizam monitoramento AIS avançado para automação, portos sul-americanos sofrem com baixos índices de qualidade de infraestrutura, limitando a capacidade de receber megaembarcações de forma eficiente, resultando em uma maior dificuldade no apontamento dos rebocadores necessários para as operações.

4.1.3 Desafios Tecnológico-Ambientais

Por fim, os desafios tecnológico-ambientais emergem do novo paradigma do "Green Shipping", onde a eficiência portuária passa a ser medida pelo equilíbrio entre produtividade e sustentabilidade. Este conceito introduz a necessidade de transição energética e otimização operacional voltada à redução das emissões de gases de efeito estufa, em conformidade com as diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO) para 2030. Como exemplo deste tipo de caso, as seguintes provocações podem ser caracterizadas: o Equilíbrio Bi-objetivo (*Green Shipping*) (6), a Ineficiência Energética da Frota (7) e a Complexidade Computacional (NP-Hard) (8).

Em relação ao Desafio 6, voltado para o tema de Equilíbrio Bi-objetivo (*Green Shipping*), o obstáculo central reside em minimizar o tempo de espera das embarcações sem elevar as emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa. Diante desse fator, reduzir o tempo de espera do navio muitas vezes exige que os rebocadores naveguem em velocidades elevadas entre as manobras, o que aumenta exponencialmente o consumo de combustível e a pegada de carbono. A literatura mais recente apresenta o desenvolvimento de algoritmos que permitam a "espera proativa", que permite aos rebocadores navegarem em velocidades econômicas sem comprometer o início das manobras. Contudo, é possível averiguar que as operações atuais seguem o paradigma da "eficiência primeiro", onde a sustentabilidade é sacrificada para garantir a pontualidade do terminal e das operações portuárias que lá se encontram.

No que se diz respeito ao Desafio 7, Ineficiência Energética da Frota, é necessário recordar que os rebocadores são equipados com motores de altíssima tração estática (bollard pull), mas passam a maior parte de sua vida operacional executando tarefas que exigem apenas uma fração dessa potência. A partir desse cenário, ressalta-se que existe um grande desperdício de combustível fóssil e custos elevados de manutenção de motores a diesel operando fora de sua carga ideal. Diante do que foi analisado pelo estudo de caso de Hayton, em 2023, é possível exemplificar essa afirmação, a qual um rebocador de 1800 kW demonstrou que a embarcação operou com carga de, apenas, 360 kW (20% da capacidade) ou menos durante 87% do tempo em que esteve navegando. Logo, esse cenário resulta em um alto desperdício de combustível fóssil e elevação de seus custos, impulsionando a busca e estudos pela eletrificação e hibridização dos rebocadores.

Por fim, o Desafio 8, apresentado pela Complexidade Computacional (NP-Hard: "Non-deterministic Polynomial-time"), verifica-se que, matematicamente, a problemática do agendamento de uma frota heterogênea rebocadores com múltiplos clientes é classificado como um problema NP-difícil. À vista dessa situação, é impossível para um gestor humano encontrar a solução ótima global, a complexidade cresce exponencialmente com o número de navios, tornando o agendamento em tempo real um desafio computacional. É comum observar, também, o uso de planilhas ou agendamentos baseados na regra "primeiro a chegar, primeiro a

ser servido" (FCFS - *First-Come, First-Served*), que ignoram as economias de escala e a coordenação de frota. Portanto, como exemplo dessa adversidade, um cenário com 30 navios em 14 horas de operação pode levar mais de 35 minutos para ser resolvido por um solver convencional, tempo este que é inaceitável para uma operação dinâmica de porto de grande porte (WEI et al., 2024).

4.2 Scoping Review: Oportunidades

A Tabela 2 apresentada abaixo mostra as oportunidades que foram analisadas na literatura internacional, o tipo de oportunidade, sua breve descrição e suas respectivas referências. Os tipos de oportunidades estão organizados em sistemas de inteligência e automação de decisão, modelos de eficiência verde (*green shipping*) e governança estratégica e infraestrutura.

Tabela 2: Oportunidades na Gestão de Rebocadores e Eficiência Portuária

OPORTUNIDADE	TIPO DE OPORTUNIDADE	DESCRIÇÃO TÉCNICA E GANHOS ESPERADOS	REFERÊNCIAS
Agendamento Proativo (Espera Proativa)	Sistemas de Inteligência e Automação de Decisão	Uso de informação estocástica para antecipar demandas futuras. Permite o reposicionamento estratégico da frota em "pontos de espera", reduzindo a navegação não-produtiva e seus custos.	WEI et al. (2024, 2025).
Automatização via Modelos MILP e MDP	Sistemas de Inteligência e Automação de Decisão	Transição do agendamento manual para modelos matemáticos de alta complexidade. Garante a alocação ótima de frotas heterogêneas e evita erros humanos de despacho.	JIA et al. (2021); WEI et al. (2024); FANG et al. (2025).
Gestão de Frotas Heterogêneas	Sistemas de Inteligência e Automação de Decisão	Alocação precisa da potência (<i>horsepower</i>) conforme a necessidade real da embarcação. Evita o desperdício de usar rebocadores de grande porte para navios pequenos.	FANG et al. (2025); WEI et al. (2025); JIA et al. (2021).

Otimização de Velocidade de Trânsito	Modelos de Eficiência Verde (<i>Green Shipping</i>)	Ajuste dinâmico da velocidade entre tarefas. Permite navegar em velocidades econômicas quando não há urgência, reduzindo o consumo de combustível sem comprometer a pontualidade.	WEI et al. (2025).
Framework Bi-objetivo "Carbono-Tempo"	Modelos de Eficiência Verde (<i>Green Shipping</i>)	Integração da sustentabilidade no agendamento. Oportunidade de equilibrar a redução de emissões de CO2 com a manutenção de altos níveis de serviço (<i>Vessel Turnaround Time</i>).	FANG et al. (2025); WEI et al. (2025).
Eletrificação e Híbridização da Frota	Modelos de Eficiência Verde (<i>Green Shipping</i>)	Substituição de propulsão diesel por sistemas elétricos. Dado que rebocadores operam em baixa carga 87% do tempo, a eletrificação oferece drástica redução de custos energéticos e emissões.	HAYTON (2023).
Integração Sistêmica (<i>Single Window / PCS</i>)	Governança Estratégica e Infraestrutura	Implementação de "Janelas Únicas" (ex: Porto Sem Papel) e <i>Port Community Systems</i> . Reduz a redundância de dados e a multiplicidade de sistemas, mitigando o dwell time elevado.	VIEIRA et al. (2015).
Melhoria dos PPIs pós-expansão do Canal	Governança Estratégica e Infraestrutura	Aproveitamento da maior eficiência técnica regional (LAC) para atrair navios Neo-Panamax através de investimentos em berços e guindastes STS de última geração.	MILLER & HYODO (2022).

Fonte: Autoral & Referências Expostas

4.2.1 Oportunidades em Sistemas de Inteligência e Automação de Decisão

Em primeiro lugar, as Oportunidades em Sistemas de Inteligência e Automação de Decisão são um grupo que foca na transição tecnológica da gestão manual baseada na experiência para a gestão baseada em dados (Data-Driven Management). Essas ocasiões residem na aplicação de modelos matemáticos avançados para resolver o problema NP-difícil do agendamento de rebocadores, transformando a estocasticidade, ou também incerteza, da demanda em uma vantagem competitiva através de algoritmos preditivos e proativos. Pode-se incluir nesse grupo o Agendamento Proativo (Espera Proativa) (1), a Automatização via Modelos MILP e MDP (2), e a Gestão de Frotas Heterogêneas (3).

A Oportunidade 1 analisa o Agendamento Proativo, sendo mais focado na Espera Proativa, ou seja, ele fundamenta-se na utilização de informações estocásticas para antecipar cenários de demanda futura antes mesmo da confirmação formal dos seus respectivos pedidos. Exemplifica-se essa conduta através do posicionamento estratégico em rebocadores em "pontos de espera" calculados via algoritmos de *clustering* (como *k-means*), permitindo que a frota responda mais rapidamente a novos chamados. Estudos apresentados por Wei et al., 2025, demonstram que a incorporação dessa proatividade, em contraste com agendamentos meramente reativos, pode resultar em uma redução de até 12,8% nos custos totais de navegação.

Em relação à Oportunidade 2, voltada para a Automatização via Modelos MILP (Programação Linear Inteira Mista) e MDP (Processos de Decisão de Markov), inicia-se através da transição do agendamento manual, hoje dependente da experiência subjetiva de operadores em centros de comando, para modelos matemáticos robustos que garantem a otimização da alocação de recursos. O uso do MILP e do MDP gera atualizações dinâmicas e permite elaborar a complexidade de frotas heterogêneas localizadas em múltiplas bases localizadas em diferentes pontos do terminal/porto. Dessa maneira, essas automatizações reduzem drasticamente os erros humanos e garante que as decisões de despacho sejam pautadas pela eficiência sistêmica, levando, assim, a uma operação portuária mais eficaz e controlada.

Considerando a Oportunidade 3, que analisa a Gestão de Frotas Heterogêneas, ela investiga os requisitos de potência específicos de cada ponto de apoio do navio para diferentes tipos de manobra (atracação, desatracação, giro) permite uma alocação mais precisa da frota heterogênea. A oportunidade reside em evitar o desperdício operacional de utilizar rebocadores de alta tração (*bollard pull*) para embarcações de pequeno porte, evitando utilizar ativos de alta potência para embarcações que não demandam tal esforço. Por fim, essas investigações de sensibilidade mostram que o aumento da proporção de rebocadores de alta classe na frota rompe gargalos operacionais, embora apresente retornos marginais decrescentes após certos níveis de investimento.

4.2.2 Oportunidades em Modelos de Eficiência Verde (*Green Shipping*)

As Oportunidades em Modelos de Eficiência Verde (*Green Shipping*) refletem a necessidade premente de alinhar as operações náuticas às metas de descarbonização da Organização Marítima Internacional (IMO) para 2030, apresentada por Fang et al., em 2025. A oportunidade aqui reside no binômio "carbono-tempo", onde a sustentabilidade ambiental

deixa de ser um custo e passa a ser um parâmetro de eficiência que atrai armadores e empresas de rebocadores comprometidos com o transporte verde. Como exemplo deste tipo de caso, as seguintes chances de melhorias podem ser apresentadas: Otimização de Velocidade de Trânsito (4), Framework Bi-objetivo "Carbono-Tempo" (5) e Eletrificação e Híbridação da Frota (6).

A partir desse cenário, a Oportunidade 4, voltada para a Otimização de Velocidade de Trânsito, foca-se nos trânsitos independentes entre bases e manobras, os quais oferecem um momento favorável e crítico para a eficiência da operação dos rebocadores, diferentemente da navegação em comboio que tem como principal objetivo seguir a velocidade da embarcação que está sendo escoltada e assistida. Essa circunstância enfatiza, majoritariamente, ajustar dinamicamente a velocidade de trânsito para patamares econômicos sempre que não houver urgência imediata para o início da próxima tarefa, sem comprometer a dinâmica do porto/terminal. Dessa forma, modelos de otimização evidenciados por Wei et al., 2025, demonstram que manter velocidades menores dentro dos limites de latência aceitáveis é um dos métodos mais eficazes para a redução direta do consumo de combustível, reduzindo drasticamente as emissões de CO₂ dessas companhias.

Assim como apresentado no Desafio 5, Oportunidade 5 destaca-se pelo Framework Bi-objetivo "Carbono-Tempo", o qual a transição para esse tipo de agendamento permite que as autoridades portuárias equilibrem dois indicadores frequentemente conflitantes: o nível de serviço, enfatizando a pontualidade, e a preocupação ambiental, acentuado pelas emissões de gases presentes no efeito estufa. Enquanto abordagens tradicionais priorizam apenas a minimização da tardança dos navios, o que muitas vezes exige altas velocidades e maior consumo, este cenário busca soluções "Pareto-ótimas", classificadas por ser um conjunto de soluções de diferentes problemas multiobjetivos, que todas as soluções que melhoram um cenário sem piorar outro (FANG et al., 2025). Logo, essa questão possibilita que os gestores escolham planos de operação que garantam a fluidez do tráfego náutico enquanto mitigam o impacto ambiental, alinhando-se às diretrizes de "Green Shipping" da Organização Marítima Internacional (IMO).

Portanto, a Oportunidade 6, Eletrificação e Híbridação da Frota, introduz a ideia de propulsão elétrica e baterias de estado sólido para os rebocadores portuários. Essa característica técnica representa uma oportunidade massiva para a eletrificação ou hibridização da propulsão, já que motores elétricos são drasticamente mais eficientes em regimes de baixa potência do que os motores a diesel convencionais, cenário o qual essas embarcações encontram-se em grande parte do tempo. Diante disso, a utilização de baterias de íon-lítio ou estado sólido, carregadas via shore power, surge como a solução de vanguarda para a descarbonização portuária.

4.2.3 Oportunidades em Governança Estratégica e Infraestrutura

Portanto, o último grupo de oportunidades é o focado em Governança Estratégica e Infraestrutura, o qual aborda o porto como um nó de valor agregado dentro de uma cadeia logística intercontinental, onde a eficiência técnica é impulsionada por reformas estruturais, investimentos em infraestrutura física e melhoria na governança entre os atores públicos e privados. A partir dessa ótica, a modernização do porto deixa de ser apenas uma obra civil para tornar-se uma reorganização institucional que visa reduzir custos de transação e aumentar a competitividade regional. Fazem parte desse conjunto de possibilidades de expansão a

Integração Sistêmica (*Single Window*, PCS) (7) e a Melhoria dos PPIs pós-expansão do Canal do Panamá (8).

Em relação à Oportunidade 7, voltado para a Integração Sistêmica (*Single Window*, PCS), é relatado que a racionalização informacional é a maior oportunidade de ganho de eficiência técnica sem necessidade de grandes obras físicas. Primeiramente, a implementação de Janelas Únicas (*Single Window*), como o Porto Sem Papel, visa eliminar a multiplicidade de sistemas desconexos e a redundância documental (VIEIRA et al., 2015). Além dessa abordagem, a integração de um *Port Community System* (PCS) permitiria o compartilhamento de dados em tempo real entre terminais, práticos e rebocadores, combatendo o elevado *dwell time* de importação, que em Santos chega a 15,6 dias.

Já para a Oportunidade 8, Melhoria dos PPIs pós-expansão do Canal do Panamá, focou em um cenário em que, após a ampliação desse Canal, otimizou a eficiência técnica desses portos, passando de 72% para 75%. Essa nova conjuntura oferece a oportunidade de captar o tráfego de megaembarcações Neo-Panamax por meio de investimentos pontuais em Indicadores de Desempenho Portuário (PPIs) críticos, como o número de guindastes STS e a profundidade dos berços. Dessa maneira, oportunizar serviços de valor agregado e centros logísticos integrados a esses indicadores é vital para manter a competitividade regional frente aos portos globais de grande porte.

5 ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE REBOCADORES PORTUÁRIOS SUL-AMERICANA

O presente capítulo apresentou os resultados obtidos com o estudo de caso, endereçando a PP2 através de uma abordagem qualitativa e comparativa. A estrutura foi organizada em quatro seções: uma introdução da empresa e suas operações, a análise crítica dos desafios operacionais, a análise crítica das oportunidades identificadas e, por fim, as discussões transversais emergidas do Estudo de Caso (EC).

5.1 Introdução a empresa estudada e à sua operação

A organização objeto deste estudo consistiu em uma empresa sul-americana de rebocadores com capilaridade em diversos portos brasileiros, estando presente tanto em cenários fluviais, quanto marítimos, tendo como principal foco e destaque na sua atuação no Porto de Santos. As operações portuárias observadas envolveram manobras de assistência náutica em três categorias principais: atracação (*berthing*), desatracação (*unberthing*) e mudança de berço (*shifting*). Para tais manobras, identificou-se que a empresa operava uma frota heterogênea, classificada por força de tração estática (*bollard pull*), variando desde unidades de médio porte até rebocadores de alta tração destinados a navios de grande porte, possuindo um total de 4 rebocadores no porto mencionado.

Diferentemente dos modelos teóricos que sugerem o uso de softwares de otimização, a empresa baseia suas decisões em uma Central de Operações (CEOP) que funciona 24 horas, com uma escala de trabalhadores presente 100% do tempo para garantir todas as operações cobertas pela empresa, incluindo o porto santista. O agendamento é pautado por tabelas de referência que relacionam o porte bruto (*Deadweight – DWT*) e o calado do navio ao terminal de operação, bem como, fundamentalmente, pelas Normas e Procedimentos das Capitânias dos Portos (NPCP), que estabelecem os critérios técnicos de potência (*Bollard Pull – BP*) necessários para cada embarcação, conforme a Tabela 3 exposta abaixo. A coordenação logística depende intrinsecamente do portal da praticagem local, que centraliza as informações de manobras em uma só plataforma de criação própria, tornando-se, assim, o meio oficial de informações necessárias para o agendamento das operações dos rebocadores portuários.

Tabela 3: Número Mínimo de Rebocadores no Porto de Santos

Faixa de Navio	Manobra	Calado	Berços / Terminais				
			Nos berços não especificados	DPW BTP	Arm39 ao Arm37, Cutrale ao TGG, Outeiro ao Arm12A, Sabó, Ilha Barnabé e Ageo	Valongo Alamoia	Usiminas TIPLAM
LOA < 225m e DWT < 60.000t	Direto (AT / DT)	Qualquer	2*	2*	2*	2	2*
	Giro / Shifting	Qualquer	2*	2*	2*	2	2*
225 ≤ LOA < 280m ou 60.000t ≤ DWT < 85.000t	Direto (AT / DT)	<12,0m	2*	2*	2*	2 (1x60t)	2*
		≥12,0m	2 (1x60t)*	2 (1x60t)*	2 (1x60t)*	2x60t	2 (1x60t)*
	Giro / Shifting	<11,5m	2**	2**	2 (1x60t)**	2 (1x60t)	2 (1x60t)
		≥11,5m	2 (1x60t)**	2x60t**	2x60t ou 3 (1x60t)**	2x60t ou 3 (1x60t)	2x60t ou 3 (1x60t)**
280 ≤ LOA < 306m ou 85.000t ≤ DWT < 100.000t	Direto (AT / DT)	<12,0m	2 (1x60t)***	2 (1x60t)***	2 (1x60t)***	2x60t	2 (1x60t)***
		≥12,0m	2x60t***	2x60t***	2x60t***	3 (1x60t)	2x60t***
	Giro / Shifting ****	<12,0m	2 (1x60t)	2 (1x60t)	2x60t	3 (1x60t)	2x60t
		≥12m	3 (1x60t)	3 (1x60t)	3 (2x60t)	3 (2x60t)	3 (2x60t)
306 ≤ LOA < 340m ou 46m < boca ≤ 52m ou 100.000t ≤ DWT < 135.000t	Direto (AT / DT) *****	<11,5m	2 (1x60t)	2 (1x60t)	2 (1x60t)	3 (1x60t)	-
		≥11,5m	2x60t	2x60t	2x60t	3 (2x60t)	
	Giro / Shifting *****	<11,5m	2 (1x60t)	2 (1x60t)	2x60t	3 (2x60t)	
		≥11,5m	3 (2x60t)	3 (2x60t)	3 (2x60t)	4 (2x60t)	
340 ≤ LOA < 370m ou 50m < boca ≤ 52m ou 135.000t ≤ DWT < 160.000t	Direto (AT / DT)	Qualquer	4 (2x70t e 2x60t)	4 (2x70t e 2x60t)	-	-	-
	Giro / Shifting	Qualquer	4 (2x70t e 2x60t)	4 (2x70t e 2x60t)			

* Um rebocador poderá ser acrescentado ou dispensado, de comum acordo entre o prático da manobra e o comandante.

** Um rebocador poderá ser acrescentado ou dispensado, de comum acordo entre o prático da manobra e o comandante.

*** Um rebocador poderá ser dispensado, de comum acordo entre o prático da manobra e o comandante, desde que o navio possua *bow thruster/stern thruster* com potência total maior ou igual a 3.000 HP.

**** O terceiro rebocador de menor potência poderá ser dispensado, de comum acordo entre o prático da manobra e o comandante, desde que o navio possua *bow thruster/stern thruster* com potência total maior ou igual a 3.000 HP.

***** O terceiro rebocador de menor potência poderá ser dispensado, de comum acordo entre o prático da manobra e o comandante, desde que o navio possua *bow thruster/stern thruster* com potência total maior ou igual a 4.000 HP.

Fonte: Adaptada da Capitania dos Portos de São Paulo (2025)

5.2 Análise Crítica - Desafios

Esta seção aborda as limitações enfrentadas na gestão cotidiana, divididas conforme a divisão físico-operacionais, informacionais e regionais e tecnológicos ambientais.

Em relação ao dinamismo e à antecedência de pedidos, a literatura destaca que a incerteza nos horários de chegada (ETA) e partida (ETD) exige modelos adaptativos, visto que apenas 47% dos navios cumprem suas janelas. Enquanto a média internacional de antecedência é de 2 horas, os especialistas indicam que, em Santos, a confirmação ocorre com, no mínimo, 1 hora de antecedência via site da praticagem local. Conforme apontado por Wei et al. (2025), esse horizonte curto impacta diretamente e positivamente a previsão de faturamento e a gestão de recursos.

O padrão *Multiple Services from Multiple Waypoints* (MSMW) exige sincronização de múltiplos recursos a fim de controlar a estocasticidade e a complexidade da coordenação dos rebocadores portuários. A empresa estudada no Estudo de Caso mitiga essa complexidade posicionando-se em uma base estratégica no meio do canal, permitindo maior eficiência na alocação, reduzindo o tempo de resposta e facilitando a movimentação direta entre manobras subsequentes tanto no início do canal, mais próximo da área de fundeio, quanto mais adentro. A frota de quatro rebocadores em Santos permite atender, em média, até duas manobras simultâneas, o qual o desafio de coordenação surge quando a demanda excede essa capacidade. Nestes casos, em vez de alterar os horários das manobras, prática rara em Santos devido à alta rigidez do porto, a empresa opta pelo afretamento de concorrentes. Essa solução comercial garante a fluidez do terminal, embora exija uma coordenação estreita entre o setor comercial, o setor operacional e a Central de Operações (CEOP).

Contrariando a ênfase da literatura em canais estreitos como gargalos críticos, foi indicado que o Porto de Santos possui um canal amplo o suficiente para permitir que dois navios cruzem simultaneamente com seus respectivos rebocadores, permitindo aproximadamente 40 manobras diárias. Embora a literatura foque em janelas de maré, a realidade empírica de Santos aponta a chuva como um fator ambiental crítico, especialmente para navios de granel sólido e líquido. A partir desse cenário, a precipitação impede a operação de carregamento/descarregamento desses terminais, gerando atrasos que desestruturam o planejamento prévio da Central de Operações. Além desse fator, a operação física é estritamente regida pelas Normas e Procedimentos das Capitânicas dos Portos (NTCP), as quais traduzem as restrições físicas do porto em requisitos técnicos de potência, estabelecendo o *Bollard Pull* (BP) mínimo necessário conforme o porte bruto (*deadweight*) do navio.

O cenário de "multiplicidade de sistemas desconexos" descrito por Vieira et al. (2015) é visto pelos especialistas como um problema superado em Santos pela centralização na praticagem, que hoje fornece dados confiáveis. Dentre esses dados, podem-se incluir horário de atracação/desatracação/mudança, local de operação, IMO do navio, bordo (bombordo ou boreste), empresa de rebocador responsável, agência responsável. Além desses, a Central de Operações compara essas informações com as que foram obtidas com a agência, via e-mail, e, para suas cargas, é usado o site da CODESP – Site da autoridade portuária de Santos. Embora a literatura aponte a necessidade de um *Port Community System* (PCS) para resolver a redundância documental, a percepção prática é de que o Porto de Santos já atingiu um nível de

modernidade que flui de maneira eficiente através dos sistemas atuais da Praticagem e da CODESP.

Diferente do cenário generalista de baixa eficiência na América Latina descrito por Miller & Hyodo (2022), o EC conclui que o Porto de Santos é classificado como "diferenciado", com um fluxo operacional que ocorre de maneira eficiente e tecnológica. Por outro lado, o elevado *dwell time* (tempo de permanência da carga), que geralmente é relacionado à falta de integração sistêmica é, na verdade, um reflexo de gargalos logísticos e de infraestrutura terrestre e terminal. O tempo de operação é limitado por fatores climáticos e pela capacidade dos terminais de processar a carga, e não por uma deficiência na infraestrutura de apoio náutico ou no serviço dos rebocadores.

O paradigma do Green Shipping introduz na gestão portuária a necessidade de equilibrar dois indicadores frequentemente conflitantes: a minimização do tempo de espera dos navios (*Vessel Turnaround Time*) e a redução das emissões de gases de efeito estufa e do consumo de combustível, priorizando, sempre, a eficiência antes de tudo. O Estudo de Caso ressalta uma distinção crítica entre o deslocamento e a assistência direta, embora a velocidade de trânsito possa ser otimizada para reduzir emissões, durante as operações de atracação e desatracação não é possível economizar força. Uma divergência interessante em relação à literatura de "Espera Proativa", que sugere manter rebocadores navegando em pontos estratégicos, é a prática da empresa de utilizar energia de terra (*shore power*) enquanto as embarcações estão nas bases.

Um outro gargalo de infraestrutura indireto identificado reside na resistência dos cabeços de amarração em navios menores. Enquanto a tendência do mercado é investir em infraestrutura e rebocadores de alta potência (alto *Bollard Pull*) para atender navios cada vez maiores (Neo-Panamax), ocorre um esquecimento das embarcações de menor porte. O uso de rebocadores potentes em navios pequenos pode causar danos técnicos, evidenciando que a modernização da infraestrutura deve ser equilibrada para manter a segurança em frotas heterogêneas. Além desse fator, o rebocador deve ser compreendido primordialmente como um recurso de segurança, a potência excedente que a literatura classifica como "ociosa" constitui, na verdade, uma reserva energética necessária para situações especiais e manobras críticas, sendo fundamental para a proposta de valor da embarcação.

Confirmando a lacuna apontada na literatura sobre a predominância de decisões baseadas na experiência e no que é exposto pela NTCP, o Estudo de Caso confirmou que a empresa não utiliza softwares de otimização matemática para o agendamento diário. A resolução do problema NP-difícil é feita de forma manual pela Central de Operações (CEOP). A partir do que foi exposto em relação aos critérios de alocação, embora a literatura frequentemente utilize a regra *First-Come, First-Served* (FCFS) para simplificar modelos, a prática em Santos adota um rodízio interno para equilibrar a carga horária das tripulações, sempre condicionado à potência exigida pela NTCP. Nesse cenário, o padrão de uma operação seria o uso de apenas 2, dos 4 rebocadores, podendo, assim, realizar 2 operações ao mesmo tempo ou poder seguir com o rodízio para atingir a operação mais eficiente e saudável para ambas as tripulações e as embarcações.

5.3 Análise Crítica - Oportunidades

Abaixo, discutem-se as potencialidades de melhoria e modernização em sistemas de inteligência e automação de decisões, modelos de eficiência verde (*green shipping*) e governança estratégica da infraestrutura.

Diante do que se foi apresentado sobre o agendamento proativo, contendo mais enfoque na espera proativa, sugere-se o posicionamento estratégico dos rebocadores em pontos de espera otimizados por algoritmos, o que poderia resultar em uma redução de até 12,8% nos custos totais de navegação ao minimizar deslocamentos não-produtivos. Contudo, a partir do que se foi exposto e analisado no EC, a implementação de modelos de espera proativa não faz sentido para a realidade da empresa no Porto de Santos, uma vez que o posicionamento da base operacional já se encontra em um ponto estratégico no meio do canal, facilitando o atendimento rápido sem a necessidade de deslocamentos antecipados. Além desse fator, observa-se que essa estratégia pode ser uma realidade para concorrentes que possuem frotas maiores ou bases em locais menos favorecidos, as quais essas instalam "eletropostos" em cais públicos para permitir esse posicionamento estratégico sem queimar combustível durante a inércia dos rebocadores ao longo do canal.

A partir do que é visto na literatura diante da automatização de modelos, é visível o uso de modelos de Programação Linear Inteira Mista (MILP) e Processos de Decisão de Markov (MDP) para resolver o agendamento de rebocadores, sendo classificado como um problema NP-difícil devido à sua complexidade exponencial. Por outro lado, o que foi apresentado durante o Estudo de Caso foi que, por conta da obtenção de informações com uma hora de antecedência, o tempo de 35 minutos se torna incompatível, uma vez que com a praticidade dos documentos enviados pela NTCP, em conjunto com a experiência de cada time de operadores, a decisão precisa ser tomada o quanto antes e o uso desses modelos não se mostra, ainda, eficiente.

Segundo Fang et al. (2025) e Jia et al. (2021) no quesito da obtenção de frotas heterogêneas, a alocação precisa basear-se na sensibilidade dos requisitos de cada manobra (atracação, desatracação ou giro), permitindo romper gargalos operacionais e melhorar a rentabilidade dos ativos. Enquanto a tendência de mercado e da engenharia naval foca na construção de rebocadores cada vez mais potentes (no mínimo 70t BP) para atender navios cada vez maiores, foi identificado no *panel of experts* uma oportunidade na manutenção de uma frota verdadeiramente heterogênea. Observa-se que ainda existe um mercado vasto para navios de menor porte que demandam assistência específica e segura, algo que pode ser negligenciado por empresas que focam apenas no aumento contínuo do BP médio de suas frotas. Além desse fator, a Central de Operações (CEOP) busca o equilíbrio entre o que é benéfico para a decisão econômica e a disponibilidade imediata da frota, averiguando as condições apresentadas no documento oficial da praticagem e o histórico de operações de cada prático dentro de cada realidade.

No estudo de caso realizado no Porto de Santos, a análise da oportunidade otimização de velocidade de trânsito demonstrou que a empresa já adota práticas de navegação econômica fundamentadas na previsibilidade das informações obtidas antes mesmo das operações. Isso se dá, a partir, primeiramente, da navegação em velocidade de cruzeiro, o qual os rebocadores podem realizar seus deslocamentos em baixa rotação, mantendo uma velocidade máxima de aproximadamente 7 nós, minimizando o desperdício de combustível a partir do aquecimento

dos motores previamente às operações. Por outro lado, no momento da assistência direta, a diretriz de sustentabilidade é secundária à segurança, não sendo possível economizar força, uma vez que o rebocador deve atuar com toda a potência necessária para garantir a integridade da operação. Além desse fator, em dias de alta demanda onde o principal objetivo é evitar a simultaneidade das operações, a necessidade de movimentação rápida entre manobras sucessivas pode elevar o consumo, reduzindo as janelas para a prática da velocidade econômica.

O conceito de *framework* bi-objetivo "carbono-tempo" representa uma evolução nos modelos de agendamento, propondo a integração da sustentabilidade ambiental como um parâmetro de eficiência central. A prática dessa estrutura em Santos é viabilizada a partir da antecedência de pelo menos uma hora na confirmação das manobras, podendo evitar o gasto do combustível na movimentação rápida das embarcações no canal à fim de chegar à tempo para uma manobra. Logo, esse controle analítico presente na literatura, que permite mensurar com precisão o custo e o consumo de cada operação individual, ainda não é uma realidade plenamente integrada na empresa estudada devido à ausência de algoritmos de otimização, configurando-se como uma oportunidade de evolução para a gestão da frota no futuro, consequentemente, do Porto de Santos.

A eletrificação e hibridização da frota representam uma das fronteiras mais promissoras para a descarbonização portuária e redução de custos operacionais, isso é evidenciado diante da substituição da propulsão térmica por sistemas baseados em baterias de íon-lítio ou estado sólido pode gerar uma redução drástica nas emissões e nos custos de manutenção. O estudo de caso enfatizou que o rebocador deve ser visto primordialmente como um recurso de segurança, o que exige uma reserva energética mandatória. Diante desse fator, foi relatado que os novos rebocadores da frota já saem de estaleiro com motores mais eficientes e preparados para o uso de metanol, visando, assim, uma postura de vanguarda tecnológica, preferindo-se aguardar a consolidação das novas propulsões no mercado global para mitigar riscos de investimento. Além disso, como os clientes e a legislação brasileira não enfatizam a necessidade de obter uma frota híbrida ou elétrica, o investimento cai em um cenário de *marketing* para a firma, essa sendo a primeira empresa de rebocadores do Brasil a ter uma embarcação desse tipo na frota, não tendo lucro direto para a companhia.

A integração sistêmica é apontada pela literatura como a maior oportunidade de ganho de eficiência técnica sem a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura física do porto. A diferença de aproximadamente 10 anos do estudo de Vieira et al. (2015) para a contemporaneidade apresentada no EC se dá, principalmente, pelo desafio informacional, que foi mitigado pela centralização de todas as informações necessárias para a operação no site da Praticagem de Santos. Atualmente, as disfunções decorrentes da falta de integração sistêmica impactam predominantemente as questões de faturamento e receita mensal, e não a precisão do agendamento dos rebocadores, sendo assim, a integração já é uma realidade presente no cotidiano, facilitando a fluidez das manobras.

Segundo Miller & Hyodo (2022), o novo cenário global de 75% de eficiência oferece aos portos a oportunidade de captar o tráfego de megaembarcações por meio de investimentos estratégicos em Indicadores de Desempenho Portuário (PPIs) críticos, como o aumento da profundidade dos berços e a instalação de guindastes STS (Ship-to-Shore) de última geração.

A melhoria desses indicadores é vista como vital para que os terminais sul-americanos mantenham sua competitividade frente aos centros globais de grande porte. Como o Porto de Santos é visto como um caso mais moderno e completo, a infraestrutura física do seu canal, que permite o cruzamento simultâneo de dois grandes navios com seus respectivos rebocadores, é um PPI de alta performance que sustenta uma média de 40 manobras diárias, demonstrando que o porto já absorveu os ganhos de eficiência pós-expansão do canal. A oportunidade de atrair navios Neo-Panamax reflete-se diretamente na estratégia de ativos da empresa, observando que as novas construções de rebocadores acompanham a tendência de gigantismo naval, focando no aumento da potência de tração estática para garantir a segurança nas manobras dessas embarcações de maior porte.

5.4 Discussões

A análise do estudo de caso realizado no Porto de Santos evidencia que a gestão operacional de rebocadores ocorre em um contexto caracterizado por elevada dinamicidade e reduzido horizonte temporal para tomada de decisão. Nesse cenário, observou-se que a operação se estrutura majoritariamente em um regime de reatividade crítica, no qual a experiência prática e o conhecimento subentendido dos gestores do Centro de Operações (CEOP) assumem papel central no processo decisório, substituindo, em grande medida, modelos matemáticos preditivos e algoritmos avançados de otimização. Tal constatação demonstra que, apesar da crescente literatura voltada à aplicação de métodos computacionais para o agendamento de rebocadores, a prática operacional ainda valoriza a capacidade humana de adaptação imediata frente às incertezas e variabilidades inerentes ao ambiente marítimo-portuário.

Cabe destacar, por outro lado, que a diferença de escala entre os portos analisados na literatura internacional e o Porto de Santos influencia diretamente a forma como o problema de agendamento de rebocadores se manifesta. Portos asiáticos de grande porte, como Cingapura, operam com volumes de tráfego substancialmente superiores, o que aumenta a complexidade combinatória das decisões e reforça a necessidade de modelos automatizados de otimização. Em Santos, apesar da elevada relevância regional e da complexidade operacional, a média de aproximadamente 40 manobras diárias permite que a gestão ainda se apoie fortemente na experiência dos operadores e na coordenação via CEOP e praticagem local. Assim, a menor escala relativa do porto brasileiro ajuda a explicar por que soluções algorítmicas avançadas, embora promissoras, ainda não aparecem como requisito operacional imediato no estudo de caso.

Além disso, verificou-se que a denominada “complexidade de coordenação” é mitigada por meio de uma combinação entre fatores geográficos favoráveis e flexibilidade operacional da frota. O Porto de Santos apresenta características náuticas que reduzem parte das restrições físicas normalmente discutidas na literatura internacional, especialmente no que se refere à geometria do canal de navegação. Dessa forma, a variabilidade operacional observada no agendamento mostrou-se mais associada a fatores ambientais, como condições climáticas, e normativos, relacionados às diretrizes da autoridade marítima e da praticagem, do que propriamente às limitações estruturais do porto.

Sob essa perspectiva, os resultados também apontam para uma significativa convergência tecnológica no ambiente portuário santista. Diferentemente do que ainda é relatado em estudos internacionais acerca da fragmentação de dados e da dificuldade de integração informacional entre agentes portuários, verificou-se que a centralização de informações promovida pela praticagem local reduziu consideravelmente os problemas de comunicação operacional. Assim, desafios frequentemente descritos como barreiras críticas ao agendamento de rebocadores foram, no caso analisado, parcialmente superados pela digitalização e integração dos fluxos de informação da comunidade portuária.

Outro aspecto relevante identificado refere-se à questão da infraestrutura portuária. Embora a literatura latino-americana frequentemente associe os gargalos operacionais às limitações físicas dos acessos marítimos, o estudo de caso sugere que o Porto de Santos se configura como uma exceção regional em termos de eficiência náutica. Nesse contexto, os principais entraves operacionais deslocam-se da interface marítima para a interface terrestre, especialmente no que diz respeito às limitações dos terminais e à logística interna dos clientes. Consequentemente, a gestão dos rebocadores passa a ser condicionada, em muitos casos, pelas restrições operacionais dos terminais atendidos, e não necessariamente pelas condições físicas do canal ou do porto.

No que tange à sustentabilidade operacional, observou-se uma divergência relevante entre a abordagem acadêmica e a percepção prática da operação. Enquanto a literatura frequentemente interpreta o elevado consumo energético dos rebocadores como uma ineficiência operacional, a realidade empírica demonstra que a manutenção de elevada disponibilidade energética é entendida como um requisito essencial para garantir confiabilidade e resposta imediata em situações críticas de apoio náutico. Assim, a transição para tecnologias mais sustentáveis, como embarcações híbridas ou elétricas, encontra barreiras não apenas financeiras, mas também relacionadas à confiabilidade operacional e à manutenção dos elevados padrões de segurança exigidos pela atividade.

Os resultados obtidos também indicam que a chamada “complexidade computacional” do problema de agendamento é tratada operacionalmente por meio de mecanismos simplificados de governança e experiência prática. Nesse sentido, a complexidade do agendamento não se limita à definição da quantidade de rebocadores necessários por manobra, mas envolve também a seleção qualitativa dos ativos mais adequados. A exigência de combinações específicas de potência, como a necessidade de rebocadores de 60t ou 70t de Bollard Pull em determinadas faixas de navios e terminais, demonstra que a frota deve ser alocada considerando restrições técnicas discretas, e não apenas critérios de proximidade ou disponibilidade imediata.

Diante desse cenário, em vez da utilização intensiva de modelos matemáticos globais, como MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) ou MDP (*Markov Decision Process*), a eficiência operacional é alcançada através da rápida interpretação de dados centralizados e da aplicação de regras operacionais consolidadas, como sistemas de rodízio e critérios normativos previamente estabelecidos. Dessa forma, a fluidez do atendimento é garantida sem que haja necessidade de soluções computacionais excessivamente sofisticadas para a realidade operacional observada.

Adicionalmente, verificou-se que, embora a literatura internacional defenda a automatização do agendamento por meio de modelos matemáticos avançados, a implementação dessas ferramentas ainda encontra resistência prática diante da efetividade dos mecanismos atualmente utilizados pela operação. A centralização de dados promovida pela praticagem e a experiência acumulada pelos gestores tornam o problema operacional suficientemente administrável sem a necessidade imediata de algoritmos complexos, especialmente considerando a imprevisibilidade característica das chamadas operacionais de curto prazo.

Em relação às oportunidades identificadas, o estudo demonstra que a eficiência operacional no Porto de Santos está fortemente associada à gestão estratégica do posicionamento da frota. Diferentemente de modelos que enfatizam a antecipação constante da demanda, a operação analisada prioriza a manutenção dos rebocadores em bases estrategicamente localizadas, reduzindo deslocamentos desnecessários, consumo energético e desgaste dos motores enquanto aguardam novas demandas operacionais.

Outro ponto relevante refere-se à gestão de frotas heterogêneas. O estudo evidencia que a diversidade da frota não representa apenas uma estratégia de redução de custos, mas também uma necessidade operacional associada à integridade estrutural e à segurança das manobras. Nesse sentido, a empresa busca equilibrar o atendimento às grandes embarcações com a preservação da capacidade técnica necessária para operar, de maneira segura e eficiente, com navios de menor porte, garantindo versatilidade competitiva dentro do complexo portuário. A própria Tabela 3 normativa reforça essa interpretação ao demonstrar que diferentes combinações de rebocadores podem ser exigidas conforme o porte do navio e o terminal atendido. Dessa forma, uma frota excessivamente padronizada em rebocadores de alta potência poderia reduzir a flexibilidade operacional e elevar riscos técnicos em embarcações menores. Portanto, a heterogeneidade da frota deve ser compreendida como uma capacidade estratégica, pois permite à empresa atender simultaneamente às demandas de grandes navios e às especificidades operacionais de embarcações de menor porte.

A pesquisa também demonstra que a otimização da velocidade de trânsito dos rebocadores já se configura como uma prática operacional consolidada. A utilização do tempo de antecedência informacional para ajustar velocidades de deslocamento permite ganhos energéticos relevantes, alinhando eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. Dessa forma, a empresa adota uma lógica operacional em que a potência máxima dos motores é reservada prioritariamente para os momentos críticos das manobras, preservando segurança e desempenho operacional.

Por fim, observou-se que a integração sistêmica no Porto de Santos evoluiu de um problema operacional para uma oportunidade de refinamento administrativo. A centralização das informações operacionais pela praticagem solucionou grande parte das dificuldades de coordenação descritas na literatura, restando como principal desafio futuro a racionalização dos fluxos burocráticos, documentais e financeiros que ainda operam de maneira fragmentada entre os diferentes agentes da cadeia portuária. Nesse contexto, iniciativas futuras de sistemas integrados do tipo *single window* podem representar uma evolução relevante para ampliar a eficiência administrativa e operacional do complexo portuário.

6 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo analisar o papel dos rebocadores portuários no ambiente de logística portuária, com foco na gestão de seus agendamentos e nos principais parâmetros que influenciam essas decisões. Para isso, foi adotada uma abordagem metodológica em duas etapas: inicialmente, uma revisão de escopo da literatura internacional, voltada à identificação dos principais desafios e oportunidades relacionados ao agendamento de rebocadores, em seguida, um estudo de caso em uma empresa sul-americana atuante no Porto de Santos, com o objetivo de comparar os achados da literatura com a realidade operacional observada.

No que se refere à PP1, “Quais são os principais benefícios e desafios da gestão do agendamento de operações de rebocadores portuários?”, a revisão de escopo permitiu identificar que a gestão de rebocadores é caracterizada por elevada complexidade operacional, uma vez que envolve a coordenação de recursos escassos, janelas operacionais restritas, condições meteorológicas, normas portuárias, disponibilidade da frota e incertezas nos horários de chegada e saída das embarcações. Esses fatores tornam o agendamento uma atividade dinâmica, na qual decisões inadequadas podem gerar atrasos, aumento de custos, ociosidade de recursos e impactos em cadeia sobre a operação portuária.

Ainda em resposta à PP1, os principais benefícios associados à boa gestão do agendamento de rebocadores estão relacionados à redução dos tempos de espera, ao aumento da confiabilidade das manobras, à melhor utilização da frota, à diminuição de custos operacionais e à possibilidade de incorporar critérios ambientais à operação. A literatura internacional analisada aponta oportunidades ligadas ao uso de sistemas inteligentes de apoio à decisão, modelos de otimização, automação parcial do agendamento, estratégias de eficiência energética e integração sistêmica entre agentes portuários. Assim, a resposta à PP1 evidencia que o agendamento de rebocadores não deve ser entendido apenas como uma atividade operacional de despacho, mas como um elemento estratégico para a eficiência logística e da cadeia de suprimentos, e para a competitividade portuária.

Em relação à PP2, “De que forma as práticas e características observadas nas operações globais de agendamento de rebocadores se relacionam com a realidade da gestão dessas operações em um porto da América do Sul?”, o estudo de caso mostrou que há tanto convergências quanto divergências entre a literatura internacional e a realidade observada no Porto de Santos. Como convergência, verificou-se que a operação local também ocorre em um ambiente de alta dinamicidade e curto horizonte de decisão, exigindo coordenação constante entre agentes, adaptação rápida às mudanças operacionais e atenção a fatores ambientais e normativos. A própria operação estudada é estruturada a partir de uma Central de Operações que funciona continuamente, tendo a praticagem local como fonte centralizada de informações para o agendamento das manobras.

Por outro lado, a principal divergência observada está no fato de que, diferentemente da literatura internacional, que enfatiza modelos matemáticos, algoritmos preditivos e sistemas avançados de otimização, a prática analisada ainda se apoia fortemente na experiência dos gestores do Centro de Operações. Essa diferença também pode ser associada à escala operacional analisada, uma vez que portos asiáticos de maior volume, como Cingapura, tendem

a apresentar maior complexidade combinatória do que Santos, onde a operação observada ainda permite uma coordenação fortemente apoiada na experiência operacional e na centralização informacional. Dessa forma, a realidade sul-americana analisada não nega a importância das soluções tecnológicas propostas pela literatura, mas indica que sua aplicação depende de condições locais, como maturidade tecnológica, disponibilidade de dados confiáveis, governança operacional e aderência às normas da autoridade marítima e da praticagem.

A análise também permitiu observar que o Porto de Santos apresenta características específicas que relativizam algumas dificuldades apontadas pela literatura. A complexidade de coordenação, por exemplo, é parcialmente mitigada por fatores geográficos favoráveis e pela flexibilidade operacional da frota, sendo a variabilidade mais associada a fatores climáticos, normativos e à praticagem do que a limitações estruturais do canal. Além disso, a centralização das informações pela praticagem reduziu problemas de comunicação operacional, transformando a integração sistêmica de um gargalo crítico em uma oportunidade de refinamento administrativo e financeiro entre os agentes da cadeia portuária.

Dessa forma, a resposta à PP2 indica que as práticas globais discutidas na literatura são relevantes para orientar melhorias no contexto sul-americano, mas não podem ser aplicadas de maneira direta e descontextualizada. O estudo evidencia que o Porto de Santos apresenta avanços importantes em termos de coordenação informacional e desempenho náutico, ao mesmo tempo em que mantém desafios relacionados à dependência da experiência humana, à racionalização de processos burocráticos e à integração administrativa mais ampla entre os agentes portuários.

Como limitação, destaca-se que o estudo de caso foi realizado com base em uma empresa específica e em um recorte concentrado no Porto de Santos, o que restringe a generalização dos resultados para outros portos brasileiros ou sul-americanos. Além disso, a pesquisa possui natureza qualitativa, não tendo realizado testes quantitativos com dados históricos de tempos de espera, consumo de combustível, custos operacionais ou emissões. Para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de estudos comparativos entre diferentes portos da América Latina, bem como a aplicação de modelos quantitativos de otimização com dados reais de operação, a fim de avaliar a viabilidade prática das soluções propostas pela literatura internacional.

Com isso, conclui-se que a principal contribuição deste trabalho está em aproximar a literatura internacional sobre gestão e agendamento de rebocadores da realidade empírica de uma operação sul-americana. Ao responder à PP1, o estudo sistematizou os principais desafios e oportunidades discutidos na literatura, ao responder à PP2, demonstrou como esses elementos se manifestam, se adaptam ou se diferenciam no contexto do Porto de Santos. Assim, o trabalho contribui tanto para o debate acadêmico sobre agendamento de rebocadores quanto para a compreensão prática dos limites e possibilidades de melhoria na gestão dessas operações no Brasil.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, L. C. Estudo de viabilidade técnica e econômica da aplicação de rebocadores portuários azimutais com propulsão diesel-elétrica no porto de Santos. 2009. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl//THESIS/10001628/2009_mestrado_luiz_carlos_de_almeida_20210802154630689.pdf.

AMR. Tugboat Market Analysis Report 2023. Londres: Allied Market Research, 2023.

ANTAQ. Relatório anual de desempenho do setor aquaviário. Brasília: Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2025.

ARKSEY, H.; O'MALLEY, L. Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, v. 8, n. 1, p. 19–32, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.

ARMAC. Relatório técnico de operações portuárias e rebocadores. São Paulo: ARMAC, 2022.

APS – Autoridade Portuária de Santos. Porto de Santos: o maior porto da América Latina. Santos: APS, 2023. Disponível em: Porto de Santos.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. Infraestrutura de transporte: propostas para o avanço da política pública no Brasil. Brasília: CNI, 2022.

ESTACHE, A.; GONZÁLEZ, M.; TRUJILLO, L. Assessment of port efficiency within Latin America. Washington: World Bank, 2002. (Policy Research Working Paper).

FANG, C.; CHAI, T.; HUANG, W.; ZHU, H. Dual-objective optimization of port tugboat scheduling with heterogeneous service capabilities. *Journal of Marine Science and Engineering*, Basel, v. 13, n. 10, p. 2003, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jmse13102003>.

HAYTON, M. Marine electrification is the future: a tugboat case study. In: LI, Y. et al. (eds.). *Proceedings of PIANC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, v. 264. Singapore: Springer, 2023. p. 868–879. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6138-0_77.

HENSEN, H. Tug use in ports: a practical guide. 2. ed. Londres: The Nautical Institute, 1997.

IMO – International Maritime Organization. IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. Londres: IMO, 2022.

JIA, S.; LI, S.; LIN, X.; CHEN, X. Scheduling tugboats in a seaport. SSRN Working Paper, 2021. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=3844673>.

MACHADO, E.; SCAVARDA, L. F.; CAIADO, R. G. G.; THOMÉ, A. M. T. Barriers and enablers for the integration of industry 4.0 and sustainability in supply chains of MSMEs. Sustainability, Basel, v. 13, n. 21, p. 11664, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su132111664>.

MARINHA DO BRASIL. Normas da Autoridade Marítima para embarcações empregadas na navegação de apoio portuário (NORMAM-08/DPC). Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, 2013.

MARTINS, A. A.; LACERDA, F. P.; SANTOS, J. A. Problemas da logística portuária brasileira. São Paulo: FATEC-SP, 2021. Disponível em: https://www.fateczl.edu.br/engetec/engetec_2021/4_EnGeTec_paper_55.pdf.

MILLER, K.; HYODO, T. Assessment of port efficiency within Latin America. Journal of Shipping and Trade, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 1-27, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s41072-021-00102-5>.

NIKGHADAM, S.; VANGA, R.; REZAEI, J.; TAVASSZY, L. Joint scheduling of vessels and vessel service providers for enhancing the efficiency of the port call process. Maritime Economics and Logistics, v. 27, n. 1, p. 211–236, 2025.

NOTTEBOOM, T. E.; PAROLA, F.; SAURUGGER, C.; WINKLE, J. V. Port economics, management and policy. Antwerpen: PortEconomics, 2022. Disponível em: <https://www.porteconomicsmanagement.org/>.

NOTTEBOOM, T. E.; RODRIGUE, J. P. Port regionalization: towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*, v. 32, n. 3, p. 297–313, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03088830500139885>

PIANC. Guidelines for port authorities and terminal operators on managing climate change risks to port infrastructure. Bruxelas: PIANC, 2023.

PIANC. Smart Port Infrastructure. Bruxelas: PIANC, 2020.

PONTES, G. L. Logística Portuária Brasileira: Situação atual na primeira década do século XXI. 2009. Monografia (Bacharelado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/5079/1/GLPontes.pdf>

SANTIAGO, B. S. et al. Corporate social responsibility and circular economy integration framework within sustainable supply chain management: Building blocks for industry 5.0. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, Hoboken, v. 32, n. 1, p. 269–290, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csr.2949>.

SANTOS, K. S. Y. Modelo de síntese e otimização para o projeto de concepção de rebocadores portuários. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/5079/1/GLPontes.pdf>.

SETYAWAN, E. B.; ALIYYAH, A. M.; MUTTAQIN, P. S. Enhanced Model for Tugboat Scheduling Problem Considering Multiple Tugboat Assignment: Reviewing Literature and Proposing Model. In: CONFERÊNCIA IEEE, [S. l.], 2024. p. 1-6.

SOARES, L. S. Metodologia alternativa para aumento potencial da capacidade operacional de navios nos portos brasileiros a partir da utilização de rebocadores portuários. In: Congresso Internacional de Desempenho Portuário, 2019. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/87617356/fulltext_file3-libre.pdf.

SOARES, L. S. Impacto de modelos alternativos de uso de rebocadores portuários no aumento da capacidade de navios. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7456/1/864942.pdf>.

STOPFORD, Martin. Maritime economics. 3. ed. London: Routledge, 2009.

THOMÉ, A. M. T.; Scavarda, L. F.; & Scavarda, A. J. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*, 27(5), 408-420.

UNCTAD. Review of Maritime Transport 2024. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development, 2024.

VIEIRA, G. B. B.; KLIEMANN NETO, F. J.; RIBEIRO, J. L. D. The rationalization of port logistics activities: a study at Port of Santos (Brazil). *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, v. 2, p. 73–86, 2015.

VIEIRA, M. L. O mercado de rebocadores portuários no Brasil: perspectivas e desafios. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 46, p. 203–246, mar. 2017. Disponível em: https://web.bnades.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14135/2/BNDES-Setorial-46_Rebocadores.pdf.

WEI, X.; MENG, Q.; LIM, A.; JIA, S. Dynamic tugboat scheduling for container ports. *Maritime Policy & Management*, [S. l.], v. 48, n. 6, p. 492-514, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1953175>.

WEI, X.; JIA, S.; MENG, Q.; KOH, J. Dynamic tugboat deployment and scheduling with stochastic and time-varying service demands. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 188, p. 103059, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2024.103059>.

WEI, X.; JIA, S.; MENG, Q.; TAN, K. C. Dynamic tugboat scheduling for container ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 122, p. 92–112, 2019.

WEI, X.; JIA, S.; MENG, Q.; TAN, K. C. Tugboat scheduling for container ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 142, p. 102071, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102071>.

WEI, X.; LAU, H. C.; XIAO, Z.; FU, X.; ZHANG, X.; QIN, Z. Bi-objective dynamic tugboat scheduling with speed optimization under stochastic and time-varying service demands. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 193, p. 103876, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103876>.

WIELAND, A.; WALLENBURG, C. M. Dealing with supply chain risks: linking risk management practices and strategies to performance. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 42, n. 10, p. 887–905, 2012.

WORLD BANK. Port reform toolkit. 2. ed. Washington, DC: World Bank, 2023.