



## **ANÁLISE QUANTITATIVA DAS PARALISAÇÕES DE NAVIOS GRANELEIROS UM ESTUDO NO PORTO DE PARANAGUÁ**

### **QUANTITATIVE ANALYSIS OF DELAYS FROM BULK CARRIER VESSELS A CASE STUDY AT THE PORT OF PARANAGUÁ**

**DENNIS CACETA (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA)**  
dennisdc@ita.br

#### **RESUMO**

Este estudo investiga os principais fatores gerenciáveis que influenciam o tempo operacional das atracções de navios graneleiros no Porto de Paranaguá, com base em 873 operações realizadas ao longo de 2024. Fatores não controláveis, como condições climáticas e restrições de maré, foram excluídos, permitindo o foco em paralisações passíveis de mitigação por meio de decisões operacionais. Utilizando dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), reportados pelas operadoras à Autoridade Portuária de Paranaguá (APPA), aplicaram-se as técnicas de Regressão Linear Múltipla (RLM) e árvore de decisão (CART). Ambas as abordagens indicaram que paralisações relacionadas à troca de turno, mudança de porão, espera por transporte rodoviário e liberação documental por órgãos públicos exercem maior influência no tempo total de operação. A RLM ofereceu uma visão quantitativa precisa dos impactos individuais, enquanto o modelo CART demonstrou maior aplicabilidade prática, ao permitir a construção de perfis operacionais críticos e regras decisórias diretas. Os resultados sustentam recomendações para aprimoramento da gestão portuária, com ênfase na redução de paralisações simultâneas e integração de sistemas logísticos e administrativos

**PALAVRAS-CHAVE:** Paranaguá; Operações Portuárias; Tempo Operacional; Regressão Linear Múltipla; Árvore de Decisões.

#### **ABSTRACT**

This study investigates the main manageable factors influencing the operational time of bulk carrier berthings at the Port of Paranaguá, based on 873 operations conducted throughout 2024. Non-controllable factors, such as weather conditions and tidal restrictions, were excluded to focus on delays that can be mitigated through operational decisions. Using data from the Brazilian National Agency for Waterway Transportation (ANTAQ), reported by terminal operators to the Port Authority of Paranaguá (APPA), two analytical approaches were applied: Multiple Linear Regression (MLR) and Classification and Regression Trees (CART). Both methods identified shift changes, hold shifts, waiting for road transport, and clearance by public agencies as the most influential delays in total operational time. MLR provided a precise quantitative assessment of the individual impact of each factor, while the CART model demonstrated greater practical applicability by enabling the identification of



critical operational profiles and straightforward decision rules. The results support recommendations for improving port management, especially by minimizing concurrent delays and enhancing integration between logistical and administrative systems.

**KEYWORDS:** Paranaguá; Port Operations; Operational Time; Multiple Linear Regression; Decision Trees.

## 1 INTRODUÇÃO

O Porto de Paranaguá é um dos principais terminais graneleiros da América Latina e opera de forma multipropósito, movimentando granéis sólidos, líquidos, carga geral e contêineres. Entre os desafios enfrentados pelos operadores portuários está a redução de paralisações durante as operações de carga e descarga, especialmente nas atracações de navios graneleiros.

Paralisações podem ocorrer por diversos motivos, alguns dos quais não são gerenciáveis (ex.: condições climáticas adversas/chuvas, marés) e outros que dependem diretamente de ações humanas, decisões operacionais, falhas técnicas ou articulação entre agentes logísticos. Neste estudo, opta-se por analisar apenas as paralisações **gerenciáveis**, ou seja, aquelas cuja mitigação pode ser planejada ou executada por operadores, terminais, transportadoras ou entidades reguladoras.

O objetivo central deste trabalho é identificar quais dessas paralisações mais impactam o tempo operacional de atracação dos navios e, a partir disso, construir modelos preditivos que sirvam como apoio à gestão portuária e à priorização de ações de melhoria.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Eficiência Portuária e Tempo de Atracação

Gestão eficiente do tempo de atracação de navios é essencial para a competitividade e produtividade portuária. Estudos demonstram que a redução do tempo operacional reduz custos logísticos, impacto ambiental e congestionamentos logísticos (RAO; WANG; GUPTA, 2025). Em particular, a previsão de delay time ou turnaround time dos navios é crucial para o planejamento das operações portuárias (STEPĚC et al., 2021)

### 2.2 Abordagens Estatísticas e de Machine Learning

A regressão linear múltipla é frequentemente utilizada em estudos logísticos por permitir a interpretação direta de efeitos marginais das variáveis sobre o tempo de operação (MONTGOMERY; PECK; VINING, 2012).

Por outro lado, modelos baseados em árvores de decisão (como CART) e outras técnicas de aprendizado de máquina mostram eficácia na previsão de tempo de permanência dos navios em portos. Abreu et al. (2023) propuseram uma árvore de

decisão para estimar a stay time de navios em portos brasileiros, demonstrando clareza interpretativa e boa performance preditiva (ABREU et al., 2023). Outro trabalho recente destaca que modelos baseados em árvores apresentaram melhor desempenho que métodos lineares na análise de portos brasileiros (RAO; WANG; GUPTA, 2025).

### **2.3 Fatores Gerenciáveis na Operação Portuária**

A literatura distingue claramente entre paralisações gerenciáveis (ex.: falhas operacionais, demora na liberação documental, atrasos logísticos) e não gerenciáveis (clima, maré), recomendando foco analítico nos primeiros já que eles são alvo de ações de melhoria (FILOM et al., 2022)

### **3. METODOLOGIA**

O banco de dados utilizado contém 873 registros de atracções no Porto de Paranaguá em 2024, todos referentes a operações de granéis sólidos. As informações foram obtidas através do portal de dados da Agência Nacional de Transporte Aquaviário (ANTAQ, 2025), que consolida e publica dados recebidos da Autoridade Portuária de Paranaguá e Antonina (APPA) – que, por sua vez, os recebe dos operadores portuários locais. (conforme Resolução Normativa ANTAQ nº 62/2021, que obriga as administrações dos portos organizados a reportarem periodicamente indicadores de desempenho à agência reguladora).

Trata-se, portanto, da melhor informação disponível, ainda que sujeita a limitações inerentes à consolidação de dados operacionais. Inicialmente, foram mapeadas 14 categorias de paralisações. Após análise exploratória, foram excluídas aquelas com baixa frequência, baixa duração média ou natureza não gerenciável, como:

- Fundeio sem previsão de atracção
- Greve ou falta de trabalhadores portuários
- Falta de energia elétrica
- Recheço
- Condições climáticas (ex: chuva)
- Restrições de maré

Permaneceram, portanto, 8 variáveis de paralisação utilizadas como preditoras. A variável resposta do estudo foi o tempo total de operação (em horas) de cada atracção. As análises foram conduzidas no software Minitab 21, utilizando técnicas de:

- Regressão linear múltipla
- Árvore de regressão (CART)
- Análise de resíduos e importância relativa das variáveis

### **4 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS**

A **Tabela 1** apresenta estatísticas descritivas das variáveis consideradas na análise, com foco nas paralisações de natureza gerenciável. A variável resposta Toperação representa o tempo total de operação (em horas) de cada navio durante a sua estadia atracado no porto.

**Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis em estudo**

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
Toperação (resposta)	72,08	46,39	0	61	216,27
Mudança de porão	4,6	3,32	0	4,42	36,32
Quebra de equipamento - Operador	3,68	7,22	0	1,68	90,68
Aguardando transporte rodoviário	4,54	9,66	0	0	87,18
Troca de turno	2,1	7,94	0	0	85,47
Liberação de órgãos públicos	12,17	33,32	0	0	309,83
Quebra de equipamento - Porto	3,53	9,3	0	0	95,67
Arqueação	0,96	1,43	0	0	9,15
Limpeza operacional	1,1	1,68	0	0	6,25

Fonte: APPA – elaboração do autor

Nota-se que diversas variáveis possuem distribuição assimétrica, com mediana igual a zero. Isso indica que muitas atracções não apresentaram determinados tipos de paralisação, o que é comum em registros operacionais. Ainda assim, suas ocorrências ocasionais podem ser altamente impactantes no tempo total da operação, justificando sua inclusão na análise.

#### 4.1 Abordagem por Regressão Linear Múltipla

A Regressão Linear Múltipla foi empregada com o objetivo de investigar o impacto de diferentes tipos de paralisações operacionais sobre o tempo total de operação das atracções no Porto de Paranaguá, no ano de 2024. Considerando que algumas variáveis de paralisação são externas ao controle da gestão portuária (como condições climáticas e marés), optou-se por restringir a análise às causas **gerenciáveis**, ou seja, aquelas cuja redução ou eliminação pode ser alcançada por meio de planejamento, investimentos ou intervenções operacionais.

##### 4.1.1 Especificação do Modelo

A variável dependente considerada foi o tempo total de operação da atracção, em horas. As variáveis independentes incluídas foram:

- Mudança de porão
- Quebra de equipamento do operador
- Aguardando transporte rodoviário

- Troca de turno
- Liberação de órgãos públicos
- Quebra de equipamento do porto
- Arqueação
- Limpeza operacional

A equação ajustada pelo modelo é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Toperação} &= 53,69 \\ &+ 0,915 \text{ Mudança de porão} \\ &+ 0,607 \text{ Quebra Operador} \\ &+ 0,746 \text{ Aguard. transporte} \\ &+ 0,390 \text{ Troca de turno} \\ &+ 0,2825 \text{ Liberação} \\ &+ 0,503 \text{ Quebra Porto} \\ &+ 2,36 \text{ Arqueação} \\ &+ 0,233 \text{ Limpeza} \end{aligned}$$

#### 4.1.2 Resultados Estatísticos

O modelo apresentou os seguintes indicadores de ajuste:

<b>Estatística</b>	<b>Valor</b>
Erro padrão da estimativa (S)	42,67
Coefficiente de determinação ( $R^2$ )	16,17%
$R^2$ ajustado	15,39%
$R^2$ previsto	11,58%

Os resultados indicam que o modelo explica aproximadamente **15,39% da variabilidade** observada no tempo de operação das atracções. Esse valor, embora relativamente modesto, é consistente com a complexidade do processo operacional portuário, o qual envolve variáveis não modeladas, como características da embarcação, produtividade dos equipamentos, tipo de carga, entre outros fatores externos.

#### 4.1.3 Significância dos Coeficientes

Todos os coeficientes, exceto os associados à **Limpeza operacional** e à **Troca de turno**, apresentaram valores de  $p$  inferiores a 0,05, indicando **significância estatística** ao nível de 95%. Dentre os efeitos mais relevantes, destacam-se:

- **Liberação de órgãos públicos** ( $p < 0,001$ ), com coeficiente de 0,2825, indicando aumento no tempo de operação para cada hora adicional de espera por liberação.
- **Aguardando transporte rodoviário** ( $p < 0,001$ ), com impacto estimado em 0,746 horas adicionais por hora de paralisação registrada.

- **Arqueação**, com coeficiente de 2,36, representando o maior impacto marginal entre todas as variáveis significativas.

Já a **Limpeza operacional** ( $p = 0,812$ ) mostrou-se estatisticamente irrelevante, possivelmente por apresentar baixa variação ou ocorrência nos dados. A **Troca de turno** mostrou significância marginal ( $p = 0,058$ ), o que pode justificar sua permanência em análises complementares.

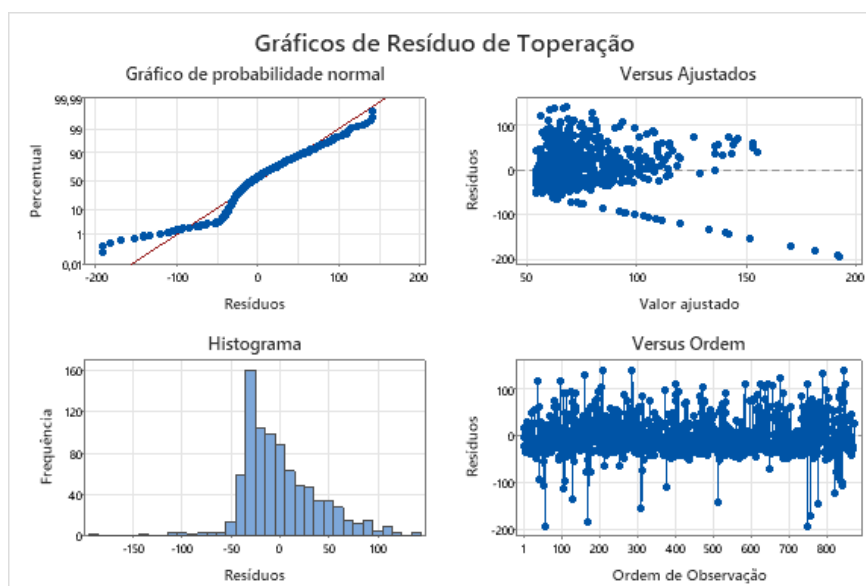
#### 4.1.4 Análise dos Resíduos

A avaliação dos resíduos (**Gráfico 1**) evidenciou alguns desvios em relação aos pressupostos do modelo:

- O histograma dos resíduos apresentou **assimetria positiva**, sugerindo que o modelo tende a subestimar algumas durações operacionais.
- O gráfico de resíduos versus valores ajustados apontou sinais de **heterocedasticidade**, ou seja, variância dos resíduos não constante ao longo da faixa de predição.
- A distribuição dos resíduos também diverge da normalidade, o que pode comprometer a validade dos testes inferenciais clássicos.

Esses indícios, somados ao baixo valor de  $R^2$ , sugerem que **o modelo linear, embora interpretável, pode não capturar completamente a complexidade das relações envolvidas.**

**Gráfico 1. Avaliação de resíduos da variável Toperação**



Fonte: APPA – elaboração do autor

#### 4.1.5 Considerações Operacionais

A abordagem por regressão linear múltipla apresenta como principal vantagem a **simplicidade interpretativa**. Cada coeficiente estimado pode ser lido diretamente como o impacto marginal (em horas) de uma unidade de tempo de paralisação sobre o tempo total de operação. Essa clareza pode ser útil para gestores portuários que desejam entender o peso relativo de cada causa e priorizar ações corretivas.

No entanto, a principal limitação está na **baixa capacidade preditiva**, especialmente diante de um fenômeno influenciado por múltiplas interações não lineares e não observáveis. Ainda assim, o modelo oferece **insumos valiosos para diagnóstico** e seleção preliminar de variáveis para abordagens mais sofisticadas, como árvores de regressão (CART) e modelos não lineares.

#### 4.2 Análise por Árvore de Decisão (CART)

Para complementar a abordagem por regressão linear múltipla e explorar possíveis interações não lineares entre as variáveis, aplicou-se a técnica de árvore de decisão do tipo CART (Classification And Regression Tree), utilizando como variável de resposta o tempo operacional ("Toperação") e como preditores as paralisações operacionais gerenciáveis.

##### 4.2.1 Construção do Modelo

A árvore foi construída com base em 873 atracações de navios graneleiros no Porto de Paranaguá, sendo utilizados os seguintes fatores como preditores: *Troca de turno, Mudança de porão, Aguardando transporte rodoviário, Liberação de órgãos públicos, Limpeza operacional, Quebra de equipamento do Porto, Quebra de equipamento do Operador e Arqueação.*

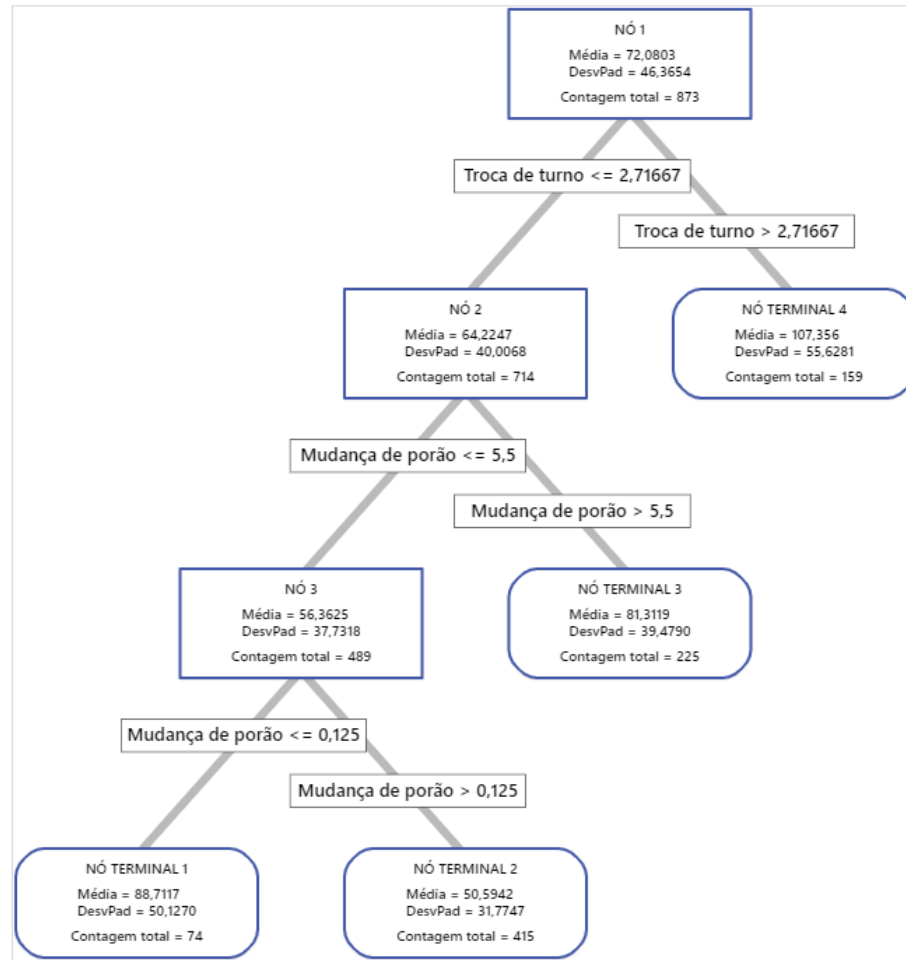
O modelo selecionado automaticamente pelo Minitab como "ótimo" apresenta **5 nós terminais**, definido com base no ponto de inflexão do gráfico de  $R^2$  em função do número de nós (valor ótimo  $\approx 20,22\%$ ).

##### 4.2.2 Resultados

O diagrama da árvore de decisão (**Figura 1**) mostra que a "**Troca de turno**" foi a variável mais influente, aparecendo como primeiro divisor. Esse fator sozinho segregou os dados em dois grandes grupos: atracações com até aproximadamente 2,7 horas de troca de turno apresentaram uma média de tempo operacional inferior (64,2 h), enquanto aquelas com maior duração atingiram médias superiores a 107 horas.

Figura 1. Diagrama de árvore ótima

Diagrama da Árvore Ótima



Fonte: APPA – elaboração do autor

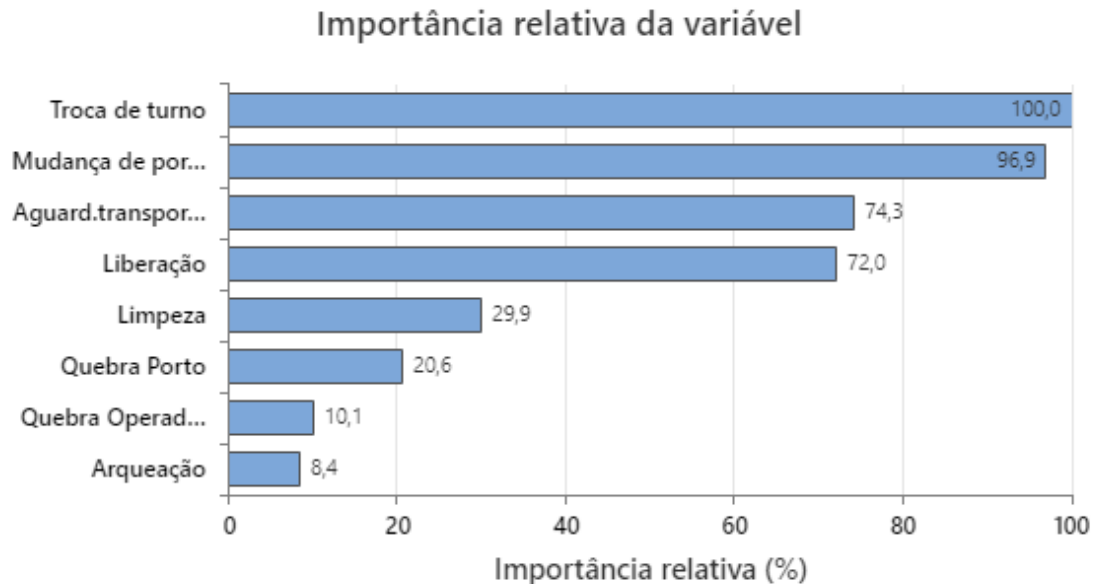
Em sequência, "**Mudança de porão**" e "**Aguardando transporte rodoviário**" também se mostraram altamente relevantes, principalmente no grupo com menor troca de turno. O terminal com menor tempo médio de operação ( $\approx 50,6$  h) reuniu atracções com baixa troca de turno, baixa mudança de porão e valores baixos para transporte rodoviário.

Já o terminal com maior tempo médio ( $\approx 107,4$  h) foi caracterizado por operações com longa troca de turno.

#### 4.2.3 Importância Relativa das Variáveis

O gráfico de importância relativa (Gráfico 2) reforça que *Troca de turno* e *Mudança de porão* foram as variáveis de maior contribuição, com 100% e 96,9%, respectivamente, seguidas de *Aguardando transporte rodoviário* (74,3%) e *Liberção de órgãos públicos* (72%). Fatores como *Quebra de equipamentos* e *Arqueação* tiveram importância relativa inferior a 10%.

Gráfico 2. Importância relativa de cada variável na análise CART



A importância variável mede a melhoria do modelo quando são feitas divisões em um preditor. A importância relativa é definida como o % de melhoria com respeito ao preditor superior.

Fonte: APPA – elaboração do autor

#### 4.2.4 Desempenho do Modelo CART

O desempenho do modelo, segundo as estatísticas de ajuste, apresentou:

- **R<sup>2</sup> de treinamento:** 20,2%
- **R<sup>2</sup> de teste:** 18,5%
- **Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE):** 39,7 h (teste)
- **Erro absoluto médio (MAE):** 29,2 h
- **Erro percentual absoluto médio (MAPE):** 48,8%

Ainda que o R<sup>2</sup> seja ligeiramente superior ao modelo de regressão linear múltipla, a árvore apresenta melhor interpretação de interações, além de permitir segmentações práticas com base em limites objetivos.

#### 4.2.5 Considerações Práticas

O modelo CART se mostra especialmente útil para **identificação de perfis operacionais críticos**, facilitando a tomada de decisão por gestores portuários. Por exemplo, operações com longa troca de turno e alto volume de mudança de porão devem ser priorizadas para intervenções. No entanto, sua capacidade preditiva é limitada tal qual quando comparada a modelos lineares com múltiplos preditores contínuos.

## 5. Discussão dos Resultados

A análise dos dados de atracções no Porto de Paranaguá revelou importantes insights sobre o impacto de paralisações operacionais no tempo total de operação. Foram aplicadas duas abordagens distintas — **Regressão Linear Múltipla (RLM)** e **Árvore de Decisão CART** — com o objetivo de identificar as variáveis mais relevantes e avaliar o potencial de previsão do tempo operacional.

### 5.1 Comparativo entre RLM e CART

Quadro 1. Comparativo entre RLM e CART

Critério	Regressão Linear Múltipla (RLM)	CART
R <sup>2</sup> Ajustado	15,39% – 27,37%	20,22% (máx)
Erro (S / RMSE)	≈ 42,6 h	≈ 39,7 h (teste)
Interpretação	Linear e contínua	Segmentada, por faixas
Variáveis mais relevantes	Liberação, Transporte, Quebras	Troca de turno, Mudança de porão
Interações entre variáveis	Não captadas diretamente	Captadas por divisões na árvore
Aplicação prática	Previsão geral	Tomada de decisão operacional

Fonte: elaboração do autor

A regressão linear múltipla apresentou maior **capacidade preditiva geral** (maior R<sup>2</sup>), sendo mais apropriada para **previsões quantitativas contínuas**. Por outro lado, a árvore de decisão CART teve desempenho levemente inferior em termos de R<sup>2</sup>, mas se destacou pela **facilidade de interpretação e visualização de interações**, oferecendo regras simples e práticas como:

- "Se a troca de turno for superior a 2,7 horas, o tempo operacional tende a ultrapassar 107 horas."
- "Operações com menos de 0,12 horas de mudança de porão e pouca troca de turno apresentam tempos médios inferiores a 51 horas."

### 5.2 Aplicabilidade Operacional

Para fins de **gestão portuária e tomada de decisão**, o modelo CART oferece maior valor prático, por apresentar **limiões claros e intuitivos**. Ele permite à autoridade portuária ou operadores identificar rapidamente **situações críticas** e **intervir com foco** em determinadas causas.

Já a regressão linear múltipla é mais indicada para **análises estratégicas ou estudos preditivos de médio/longo prazo**, quando se deseja estimar o impacto marginal de cada tipo de paralisação com maior precisão matemática.

### 5.3 Considerações sobre a Qualidade dos Dados

Deve-se destacar que os dados utilizados, embora robustos, foram originalmente informados por operadores e consolidados por órgãos públicos. Isso implica em **possíveis limitações quanto à completude e uniformidade** das informações, especialmente para causas menos recorrentes ou para eventos de baixa duração. Essa característica pode impactar o desempenho preditivo dos modelos e deve ser considerada ao aplicar os resultados em contextos operacionais reais.

## 6. Conclusão e Recomendações

Este estudo teve como objetivo identificar os principais fatores que influenciam o tempo operacional das atracções de navios graneleiros no Porto de Paranaguá, com base nos dados reportados à Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ). Utilizando duas abordagens distintas — Regressão Linear Múltipla (RLM) e Árvores de Decisão (CART) — foi possível avaliar, com diferentes perspectivas, o impacto de paralisações operacionais no desempenho das operações portuárias.

### 6.1 Principais Achados

- As variáveis mais relevantes de forma geral incluíram **troca de turno, mudança de porão, aguardando transporte rodoviário e liberação por órgãos públicos**.
- A regressão múltipla apontou relações lineares entre as paralisações e o tempo operacional, sendo a **liberação por órgãos públicos** e o **aguardo por transporte rodoviário** as variáveis com maiores coeficientes significativos.
- A árvore CART ofereceu uma segmentação mais intuitiva, permitindo identificar **perfis operacionais críticos**, como operações com troca de turno elevada e mudanças de porão extensas, que resultam em tempos operacionais acima da média geral.

### 6.2 Recomendações

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se:

- **Priorização de esforços gerenciais** para reduzir atrasos causados por **troca de turno e mudança de porão**, especialmente quando ocorrem simultaneamente.
- **Melhor coordenação interna** para mitigar o impacto do tempo de espera por veículos no porto.
- **Integração de sistemas de liberação documental**, visando reduzir atrasos vinculados a trâmites com órgãos públicos.
- **Utilização do modelo CART em ambientes operacionais**, especialmente em painéis de controle ou sistemas de alerta, por sua capacidade de fornecer regras simples e acionáveis.



- **Adoção da regressão múltipla em contextos analíticos ou de planejamento estratégico**, para avaliação quantitativa e comparativa entre diferentes causas de paralisação.

### 6.3 Perspectivas Futuras

Este trabalho reforça a importância da análise de dados para a gestão portuária e sugere que **estudos futuros** explorem:

- A inclusão de **variáveis logísticas externas**, como disponibilidade de transporte e meteorologia.
- Modelos com **séries temporais** para análise sazonal do impacto das paralisações.
- Aplicação de **técnicas mais avançadas de machine learning**, como random forest ou gradient boosting, para maior acurácia preditiva.

## 7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). **Resolução Normativa nº 62, de 30 de setembro de 2021**. Dispõe sobre o envio de informações pelas autoridades portuárias. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br>. Acesso em: 5 ago. 2025.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Portaria nº 530/2021. Institui o Sistema Nacional de Informações de Logística (SNIL)**. Disponível em: <https://www.infraestrutura.gov.br>. Acesso em: 5 ago. 2025.

ANTAQ. **Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Anuário Estatístico Portuário. Brasília, 2025**. Disponível em: <https://www.gov.br/antag/pt-br/assuntos/anuario-estatistico>. Acesso em: 31 jul. 2025.

ABREU, L. R. et al. **A decision tree model for the prediction of the stay time of ships in Brazilian ports**. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 119, p. 105634, 2023. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105634

RAO, A. R.; WANG, H.; GUPTA, C. **Predictive Analysis for Optimizing Port Operations**. *Applied Sciences*, v. 15, n. 6, p. 2877, 2025. DOI: 10.3390/app15062877

FILOM, Siyavash; AMIRI, Amir M.; RAZAVI, Saiedeh. **Applications of machine learning methods in port operations – A systematic literature review**. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 161, p. 102722, 2022. DOI: 10.1016/j.tre.2022.102722

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 5. ed. Wiley, 2012.