

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

Gustavo Rodrigues de Moraes

**CONTRIBUIÇÃO DE UM MODELO SUSTENTÁVEL DE OTIMIZAÇÃO E  
DE SIMULAÇÃO EM REDE PETRI P-TEMPORIZADA NAS  
ESTRATÉGIAS DE EXPANSÃO DA REDE INTERMODAL DE  
TRANSPORTE DE SOJA DO ESTADO DO MATO GROSSO**

Belo Horizonte

2023

Gustavo Rodrigues de Moraes

**CONTRIBUIÇÃO DE UM MODELO SUSTENTÁVEL DE OTIMIZAÇÃO E  
DE SIMULAÇÃO EM REDE PETRI P-TEMPORIZADA NAS  
ESTRATÉGIAS DE EXPANSÃO DA REDE INTERMODAL DE  
TRANSPORTE DE SOJA DO ESTADO DO MATO GROSSO**

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Andrey Maia

Belo Horizonte

2023

M827c

Morais, Gustavo Rodrigues de.

Contribuição de um modelo sustentável de otimização e de simulação em rede petri p-temporizada nas estratégias de expansão da rede intermodal de transporte de soja do Estado do Mato Grosso [recurso eletrônico] / Gustavo Rodrigues de Moraes. - 2023.

1 recurso online (267 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodney Rezende Saldanha.

Coorientador: Carlos Andrey Maia.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 233-267.

Bibliografia: f. 217-232.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Logística - Teses. 3. Otimização - Teses. 4. Redes de petri - Teses. 5. Simulação (Computadores) - Teses. 6. Soja - Teses. I. Saldanha, Rodney Rezende. II. Maia, Carlos Andrey. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

### FOLHA DE APROVAÇÃO

**"CONTRIBUIÇÃO DE UM MODELO SUSTENTÁVEL DE OTIMIZAÇÃO E DE SIMULAÇÃO EM REDE PETRI P-TEMPORIZADA NAS ESTRATÉGIAS DE EXPANSÃO DA REDE INTERMODAL DE TRANSPORTE DE SOJA DO ESTADO DO MATO GROSSO"**

**GUSTAVO RODRIGUES DE MORAIS**

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 14 de setembro de 2023. Por:

Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha  
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Carlos Andrey Maia  
DEE (UFMG) - Coorientador

Prof. Dr. Jose Carlos Cesar Amorim  
Recursos Hídricos (Instituto Militar de Engenharia)

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez  
Instituto de Engenharia Mecânica (UNIFEI)

Prof. Dr. Yuri Clements Daglia Calil  
Department of Agricultural Economics (Texas A&M University TAMU)

Prof. Dr. Adriano Chaves Lisboa  
Diretor Técnico (GAIA - CEFETMG)

Prof. Dr. Vinícius Mariano Gonçalves  
DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Rodney Rezende Saldanha, Membro de comissão**, em 18/09/2023, às 09:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yuri Clements Daglia Calil, Usuário Externo**, em 18/09/2023, às 11:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Mariano Goncalves, Membro**, em 18/09/2023, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Barreira Martinez, Usuário Externo**, em 18/09/2023, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Chaves Lisboa, Usuário Externo**, em 18/09/2023, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Andrey Maia, Professor do Magistério Superior**, em 18/09/2023, às 19:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos Cesar Amorim, Usuário Externo**, em 19/09/2023, às 23:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2616729** e o código CRC **1639DC14**.

*Dedico este trabalho a minha querida família.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela proteção constante.

À meus pais, José Rodrigues de Moraes (*In Memoriam*) e Maria Francisca de Moraes, pelo carinho e incentivo em todas as etapas da minha vida.

À minha esposa Priscilla Chantal, pelo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis, pelo cuidado, amor e companheirismo que tornaram possível essa conquista. Aos meus filhos Lucas e Luan, pelo amor incondicional e os diversos momentos de alegria.

À minha irmã Andréa Rodrigues, pelas energias positivas e incentivos.

Ao professor e orientador Dr. Rodney Rezende Saldanha, por sua grande amizade e disponibilidade para oportunas conversas. E, também, pela oportunidade de novamente receber sua valiosa orientação e auxílio nos momentos mais difíceis. Muito obrigado por acreditar no meu potencial, no meu desenvolvimento como pessoa e pesquisador.

Ao professor e coorientador Dr. Carlos Andrey Maia, pelo seu apoio, cordialidade e disponibilidade. Muito obrigado por sua amizade, direcionamentos e paciência.

À banca examinadora, pela disponibilidade, análise crítica e contribuições para a melhoria do texto.

Ao colega Gabriel Faria e sua esposa, pelos anos de amizade e companheirismo durante parte da pesquisa.

À Universidade Federal de Itajubá, pela concessão de licença para capacitação.

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade de realizar o curso.

À secretaria do PPGEE, pela cordialidade e tempestividade nos atendimentos às solicitações.

Ao corpo docente do PPGEE e demais colegas, pelo convívio e amizade, os quais me propiciaram um ambiente de ensino de altíssima qualidade.

Por fim, agradeço as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Nunca me esquecerei desse acontecimento  
na vida de minhas retinas tão fatigadas.  
Nunca me esquecerei que no meio do caminho  
tinha uma pedra  
tinha uma pedra no meio do caminho [...]”*

**Carlos Drummond de Andrade**



## RESUMO

A produção da soja brasileira tem ganhado destaque no mercado mundial, gerando uma revolução no setor do agronegócio. O grão tornou-se um dos principais destaques das exportações, impulsionando significativamente a economia nacional, graças aos seus custos de produção reduzidos e a elevada qualidade do produto. Contudo, ainda que mantenha a liderança no *raking* mundial nesse quesito, o Brasil tem perdido vantagem competitiva quanto às dificuldades de distribuição do produto em função das limitações de sua rede logística. Esse é um dos problemas mais emergentes do estado do Mato Grosso, o maior produtor e exportador de soja do Brasil. Nesse sentido, o objetivo deste estudo é propor um modelo sustentável de otimização e simulação em rede Petri P-temporizada direcionados às estratégias de expansão do transporte intermodal de soja do estado do Mato Grosso. As técnicas permitem localizar, dimensionar e estimar custos de instalação terminais de transbordo no estado, além de analisar diferentes cenários para o fluxo doméstico de exportação de soja para os principais portos considerando o *trade-off* custo de transporte e sustentabilidade ambiental. A investigação considera a base de dados de exportação de soja realizada do ano de 2021 e a projeção para o ano 2025. Os resultados do modelo de otimização indicam uma redução mínima de 20% na emissão de CO<sub>2</sub> em todos os cenários analisados, mantendo o foco no custo mínimo de instalação da infraestrutura dos terminais. As soluções do simulador de rede de Petri P-temporizada estocástico apontam várias alternativas para redução no custo de transporte, mesmo considerando um aumento 20,6% na quantidade de soja destinada à exportação do ano de 2021 para 2025. Em relação aos cenários explorados, constata-se a importância da ferrovia EF-170 (ferrogrão) quanto ao seu impacto na diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> e na redução dos custos de transportes de soja destinada à exportação. As técnicas aplicadas comprovam efetivamente sua eficiência como valiosas ferramentas estratégicas na tomada de decisão acerca dos projetos de expansão da rede de transportes intermodal do estado. Dessa forma, conclui-se que é possível obter soluções eficientes e inovadoras que combinam a redução de custos no sistema logístico da soja no estado do Mato Grosso com a devida responsabilidade ambiental. Portanto, é essencial que empresas e governos invistam na intermodalidade de transporte, de forma a melhorar a competitividade do setor no mercado internacional.

Palavras-chave: logística; otimização; rede de petri; simulação; soja.

## ABSTRACT

The production of Brazilian soybean has gained prominence in the world market, generating a revolution in the agribusiness sector. The grain has become one of the main highlights of exports, significantly boosting the national economy, due to its low production costs and the high quality of the product. However, even though it maintains the leadership in the world ranking in this regard, Brazil has lost a competitive advantage in terms of product distribution difficulties due to the limitations of its logistics network. This is one of the most emerging problems in the state of Mato Grosso, the largest producer, and exporter of soy in Brazil. So, this study addresses the intermodal expansion strategies for MT soybeans. To tackle the problem, we propose a sustainable optimization and simulation model in P-timed Petri net directed. The techniques allow locating, dimensioning, and estimating installation costs for transshipment terminals in the state. Then, we can analyze different scenarios for the domestic flow to the main ports, considering the trade-off cost of transport and environmental sustainability. The investigation considers the soybean export database for the year 2021 and the projection for the year 2025. The results of the optimization model indicate a minimum reduction of 20% in CO<sub>2</sub> emissions in all analyzed scenarios, keeping the focus on the minimum cost of installing the terminal infrastructure. The stochastic P-timed Petri net simulator solutions point to several alternatives for reducing the cost of transport even considering a 20.6% increase in the amount of soy destined for export from 2021 to 2025. Regarding the explored scenarios, the importance of the EF-170 railroad (ferrogrão) is verified in terms of its impact on reducing CO<sub>2</sub> emissions and reducing transport costs for soy destined for export. The applied techniques effectively prove their efficiency as valuable strategic tools in decision-making about expansion projects for the state's intermodal transport network. Thus, we concluded that it is possible to obtain efficient and innovative solutions that combine cost reduction in the soybean logistics system in the state of Mato Grosso with due environmental responsibility. Therefore, it is essential that companies and governments invest in transport intermodality, in order to improve the sector's competitiveness in the international market.

Keywords: logistics; optimization; petri net; simulation; soybean.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – As maiores <i>commodities</i> do Brasil . . . . .  | 33 |
| Figura 2 – Evolução de longo prazo dos preços das <i>commodities</i> . . . . .  | 34 |
| Figura 3 – Contribuição da população de determinados países no crescimento do uso de alimentos . . . . .  | 36 |
| Figura 4 – Área plantada de soja do Mato Grosso . . . . .   | 37 |
| Figura 5 – Produção de soja do Mato Grosso . . . . .  | 38 |
| Figura 6 – Mapa da evolução da produção de soja no Brasil . . . . .   | 39 |
| Figura 7 – Exportações do Brasil com destino a Ásia em 2020 . . . . .   | 40 |
| Figura 8 – Valor em US\$ da exportação de soja do estado do Mato Grosso . . . . .   | 40 |
| Figura 9 – Participação da soja nas exportações brasileiras . . . . .   | 42 |
| Figura 10 – Saldo da Balança Comercial Brasileira de 2008 a 2019 (em US\$ bilhões) . . . . .  | 45 |
| Figura 11 – Histórico do investimento público federal em infraestrutura de transportes (em R\$ bilhões) . . . . .   | 47 |
| Figura 12 – Participação dos estados brasileiros na exportação da soja em 2020 . . . . .  | 54 |
| Figura 13 – Principais destinos da soja brasileira em 2020 . . . . .  | 54 |
| Figura 14 – PNL 2025 - Gargalos Logísticos . . . . .  | 56 |
| Figura 15 – Potencial das Hidrovias do Brasil . . . . .   | 58 |
| Figura 16 – Projetos Ferroviários . . . . .   | 60 |
| Figura 17 – Comparativo entre modais de transporte . . . . .  | 61 |
| Figura 18 – Comparativo de custos entre modais de transporte . . . . .  | 62 |
| Figura 19 – Potencial do transporte hidroviário brasileiro . . . . .  | 62 |
| Figura 20 – Diferença entre os custos de transportes Brasil - Estados Unidos para a China . . . . .   | 64 |
| Figura 21 – Diferença entre os custos de transportes do Mato Grosso (BR) - Iowa (EUA) para a China . . . . .  | 65 |
| Figura 22 – Percentual de participação dos tipos de modais do Brasil para o transporte de cargas . . . . .  | 66 |
| Figura 23 – Modelo ilustrativo do sistema logístico com os possíveis modais que podem ser utilizados como rota de exportação da soja do estado do Mato Grosso . . . . . | 77 |
| Figura 24 – Representação de uma rede de Petri . . . . .  | 86 |
| Figura 25 – Exemplo de uma rede de Petri ilimitada. . . . .   | 88 |
| Figura 26 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar P2 . . . . .  | 89 |
| Figura 27 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar P2 - disparo T2 . . . . .   | 89 |
| Figura 28 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar P2 - disparo T3 . . . . .   | 90 |
| Figura 29 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar P2 - disparo T2 . . . . .   | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 30 – Representação de uma rede de Petri T-temporizada . . . . .   | 92  |
| Figura 31 – Representação de uma rede de Petri P-temporizada . . . . .   | 93  |
| Figura 32 – Fluxograma de funcionamento do simulador de rede de Petri P-temporizada  | 103 |
| Figura 33 – Representação do sistema de serviço . . . . .  | 105 |
| Figura 34 – Sistema de serviço representado por Rede de Petri . . . . .  | 106 |
| Figura 35 – Alteração realizada no lugar P5 . . . . .  | 107 |
| Figura 36 – Autômatos modulares do sistema de serviço . . . . .  | 108 |
| Figura 37 – Composição paralela $F  S$ . . . . .   | 108 |
| Figura 38 – Cadeia de Markov correspondente . . . . .  | 109 |
| Figura 39 – Rede de Petri modificada e representativa do sistema . . . . .   | 110 |
| Figura 40 – Localização das 141 cidades do Mato Grosso . . . . .   | 116 |
| Figura 41 – Significância das variáveis que compõem o modelo estatístico . . . . .   | 118 |
| Figura 42 – Resíduos, ajuste do modelo e histograma da distribuição de resíduos do<br>modelo . . . . .   | 119 |
| Figura 43 – Economia de escala por tipo de terminal . . . . .  | 120 |
| Figura 44 – Variação do valor unitário em função do ‘Ano’ . . . . .  | 121 |
| Figura 45 – Variação do valor unitário em função do atributo ‘Outro’ . . . . .   | 122 |
| Figura 46 – Mapa representativo para o estudo do escoamento de soja do estado<br>do Mato Grosso com localização de portos, possíveis rotas hidroviárias,<br>ferroviárias e potenciais municípios candidatos à instalação de terminais<br>de transbordo . . . . . | 124 |
| Figura 47 – Principais rotas de exportação da soja brasileira . . . . .  | 125 |
| Figura 48 – Rotas numeradas de exportação da soja brasileira . . . . .   | 126 |
| Figura 49 – Modais em operação e planejados no Brasil . . . . .  | 128 |
| Figura 50 – Principais portos considerados no modelo de simulação . . . . .  | 130 |
| Figura 51 – Representação em rede de Petri das rotas de exportação de soja a partir<br>de um mapa de referência . . . . .  | 136 |
| Figura 52 – Resultado do cenário 1 para 2021: localização dos terminais de trans-<br>bordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente mu-<br>nicipios com potencial de intermodalidade ferroviária. . . . .  | 141 |
| Figura 53 – Resultado do cenário 1 para 2025: localização dos terminais de trans-<br>bordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente mu-<br>nicipios com potencial de intermodalidade ferroviária. . . . .  | 141 |
| Figura 54 – Resultado do cenário 2 para 2021: localização dos terminais de trans-<br>bordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente mu-<br>nicipios com potencial de intermodalidade hidroviária. . . . .  | 142 |
| Figura 55 – Resultado do cenário 2 para 2025: localização dos terminais de trans-<br>bordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente mu-<br>nicipios com potencial de intermodalidade hidroviária. . . . .  | 143 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 56 – Resultado do cenário 3 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária e hidroviária em 50%. . . . .        | 144 |
| Figura 57 – Resultado do cenário 3 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária e hidroviária em 50%. . . . .        | 144 |
| Figura 58 – Resultado do cenário 4 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 75% e hidroviária em 25%. . . . . | 145 |
| Figura 59 – Resultado do cenário 4 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 75% e hidroviária em 25%. . . . . | 146 |
| Figura 60 – Resultado do cenário 5 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 25% e hidroviária em 75%. . . . . | 147 |
| Figura 61 – Resultado do cenário 5 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 25% e hidroviária em 75%. . . . . | 147 |
| Figura 62 – Análise da variação do peso $\theta$ para o resultado do cenário 1 com a preferência de utilização de intermodalidade em 100% de ferrovias no ano de 2021 e 2025. . . . .   | 149 |
| Figura 63 – Análise da variação do peso $\theta$ para o resultado do cenário 2 com a preferência de utilização de intermodalidade em 100% de hidrovias no ano de 2021 e 2025. . . . .   | 151 |
| Figura 64 – Análise da variação do peso $\theta$ para o resultado do cenário 3 com a preferência de utilização de intermodalidade em 50% de ferrovias e 50% de hidrovias no ano de 2021 e 2025. . . . .                           | 153 |
| Figura 65 – Análise da variação do peso $\theta$ para o resultado do cenário 4 com a preferência de utilização de intermodalidade em 75% de ferrovias e 25% de hidrovias no ano de 2021 e 2025. . . . .                           | 155 |
| Figura 66 – Análise da variação do peso $\theta$ para o resultado do cenário 5 com a preferência de utilização de intermodalidade em 25% de ferrovias e 75% de hidrovias no ano de 2021 e 2025. . . . .                           | 157 |
| Figura 67 – Mapa de referência do cenário 1a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% ferroviário . . . . .   | 161 |
| Figura 68 – Modelo de rede de Petri do cenário 1a para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário . . . . .  | 163 |
| Figura 69 – Mapa de referência do cenário 1b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% ferroviário . . . . .   | 168 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 70 – Mapa de referência do cenário 1c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% ferroviário . . . . .                       | 172 |
| Figura 71 – Mapa de referência do cenário 2a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% hidroviário . . . . .                       | 176 |
| Figura 72 – Mapa de referência do cenário 2b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% hidroviário . . . . .                       | 179 |
| Figura 73 – Mapa de referência do cenário 2c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% hidroviário . . . . .                       | 182 |
| Figura 74 – Mapa de referência do cenário 3a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .      | 186 |
| Figura 75 – Mapa de referência do cenário 3b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .      | 189 |
| Figura 76 – Mapa de referência do cenário 3c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .      | 192 |
| Figura 77 – Mapa de referência do cenário 4 utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 75% ferroviário e 25% hidroviário . . . . .       | 196 |
| Figura 78 – Mapa de referência do cenário 5a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .      | 200 |
| Figura 79 – Mapa de referência do cenário 5b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .      | 203 |
| Figura 80 – Mapa de referência do cenário 5c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .      | 206 |
| Figura 81 – Resumo dos resultados de custos e emissão de CO <sub>2</sub> unitários dos cenários obtidos pelo simulador de rede de Petri . . . . . | 209 |
| Figura 82 – Resultados de custos e emissão de CO <sub>2</sub> unitários do cenário 1b obtido pelo simulador de rede de Petri . . . . .            | 210 |
| Figura 83 – Resultados de custos e emissão de CO <sub>2</sub> unitários do cenário 4 obtido pelo simulador de rede de Petri . . . . .             | 211 |
| Figura 84 – Resultados de custos e emissão de CO <sub>2</sub> unitários do cenário 1b obtido pelo simulador de rede de Petri . . . . .            | 212 |
| Figura 85 – Resultados de custos e emissão de CO <sub>2</sub> unitários do cenário 4 obtido pelo simulador de rede de Petri . . . . .             | 212 |
| Figura 86 – Modelo de rede de Petri do cenário 1a para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário . . . . .  | 234 |
| Figura 87 – Modelo de rede de Petri do cenário 1b para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário . . . . .  | 237 |
| Figura 88 – Modelo de rede de Petri do cenário 1c para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário . . . . .  | 240 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 89 – Modelo de rede de Petri do cenário 2a para os anos de 2021 e 2025 -<br>100% hidroviário . . . . .                  | 243 |
| Figura 90 – Modelo de rede de Petri do cenário 2b para os anos de 2021 e 2025 -<br>100% hidroviário . . . . .                  | 245 |
| Figura 91 – Modelo de rede de Petri do cenário 2c para os anos de 2021 e 2025 -<br>100% hidroviário . . . . .                  | 247 |
| Figura 92 – Modelo de rede de Petri do cenário 3a para os anos de 2021 e 2025 -<br>50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . . | 249 |
| Figura 93 – Modelo de rede de Petri do cenário 3b para os anos de 2021 e 2025 -<br>50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . . | 251 |
| Figura 94 – Modelo de rede de Petri do cenário 3c para os anos de 2021 e 2025 -<br>50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . . | 253 |
| Figura 95 – Modelo de rede de Petri do cenário 4 para os anos de 2021 e 2025 - 75%<br>ferroviário e 25% hidroviário . . . . .  | 255 |
| Figura 96 – Modelo de rede de Petri do cenário 5a para os anos de 2021 e 2025 -<br>25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . . | 257 |
| Figura 97 – Modelo de rede de Petri do cenário 5b para os anos de 2021 e 2025 -<br>25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . . | 259 |
| Figura 98 – Modelo de rede de Petri do cenário 5c para os anos de 2021 e 2025 -<br>25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . . | 261 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – PIB do agronegócio: taxa de variação acumulada no período (%) . . . . .   | 42  |
| Tabela 2 – Histórico do PIB do agronegócio brasileiro . . . . .  | 44  |
| Tabela 3 – Acumulado de investimentos público federal nos modais de transportes<br>(em R\$ bilhões e porcentagem) . . . . .  | 51  |
| Tabela 4 – Parâmetros de configuração do simulador RdP P-temporizada estocástico   | 111 |
| Tabela 5 – Resultados do modelo analítico . . . . .  | 112 |
| Tabela 6 – Resultados do modelo Álgebra Max-Plus . . . . .   | 112 |
| Tabela 7 – Resultados do modelo RdP P-temporizada estocástico . . . . .  | 113 |
| Tabela 8 – Tipos de terminais (com valores aproximados do mundo real para o<br>custo de instalação no ano de 2021 e capacidade de armazenamento). . . . .  | 123 |
| Tabela 9 – Rotas de exportação da soja do Mato Grosso - 2020 . . . . .   | 127 |
| Tabela 10 – Exportação de grãos de soja do Mato Grosso por porto no ano de 2019<br>a 2021 . . . . .  | 129 |
| Tabela 11 – Terminais de transbordo já existentes no estado do Mato Grosso e suas<br>rotas fixas propostas . . . . .   | 131 |
| Tabela 12 – Custo por tonelada-quilômetro e modal de transporte utilizado . . . . .  | 131 |
| Tabela 13 – Emissão de CO <sub>2</sub> por modal de transporte utilizado . . . . .   | 132 |
| Tabela 14 – Conjuntos e índices do modelo. . . . .   | 132 |
| Tabela 15 – Variáveis de decisão. . . . .  | 133 |
| Tabela 16 – Parâmetros do modelo. . . . .  | 133 |
| Tabela 17 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica para<br>o mapa de referência . . . . .   | 138 |
| Tabela 18 – Terminais Intermodais no Mato Grosso . . . . .   | 139 |
| Tabela 19 – Resultado do cenário 1 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação<br>com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento<br>estática total para o ano de 2021 . . . . . | 149 |
| Tabela 20 – Resultado do cenário 1 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação<br>com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento<br>estática total para o ano de 2025 . . . . . | 150 |
| Tabela 21 – Resultado do cenário 2 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação<br>com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento<br>estática total para o ano de 2021 . . . . . | 151 |
| Tabela 22 – Resultado do cenário 2 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação<br>com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento<br>estática total para o ano de 2025 . . . . . | 152 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabela 23 – Resultado do cenário 3 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2021 . . . . . | 153 |
| Tabela 24 – Resultado do cenário 3 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025 . . . . . | 154 |
| Tabela 25 – Resultado do cenário 4 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2021 . . . . . | 155 |
| Tabela 26 – Resultado do cenário 4 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025 . . . . . | 156 |
| Tabela 27 – Resultado do cenário 5 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2021 . . . . . | 157 |
| Tabela 28 – Resultado do cenário 5 considerando a variação do peso $\theta$ e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025 . . . . . | 158 |
| Tabela 29 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 1a - 100% ferroviário . . . . .   | 162 |
| Tabela 30 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 1a nos anos de 2021 e 2025 . . . . .  | 162 |
| Tabela 31 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2021 - 100% ferroviário . . . . .  | 164 |
| Tabela 32 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2025 - 100% ferroviário . . . . .  | 165 |
| Tabela 33 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 1a no ano de 2021 - 100% ferroviário . . . . .  | 166 |
| Tabela 34 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 1a no ano de 2025 - 100% ferroviário . . . . .  | 166 |
| Tabela 35 – Resultado do custo da rota para o cenário 1a no ano de 2021 - 100% ferroviário . . . . .   | 166 |
| Tabela 36 – Resultado do custo da rota para o cenário 1a no ano de 2025 - 100% ferroviário . . . . .   | 167 |
| Tabela 37 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 1b - 100% ferroviário . . . . .   | 169 |
| Tabela 38 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 1b nos anos de 2021 e 2025 . . . . .  | 169 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 39 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 1b no ano de 2021 - 100%<br>ferroviário . . . . .          | 169 |
| Tabela 40 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 1b no ano de 2025 - 100%<br>ferroviário . . . . .          | 170 |
| Tabela 41 – Resultado do custo da rota para o cenário 1b no ano de 2021 - 100%<br>ferroviário . . . . .                       | 170 |
| Tabela 42 – Resultado do custo da rota para o cenário 1b no ano de 2025 - 100%<br>ferroviário . . . . .                       | 170 |
| Tabela 43 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 1c - 100%<br>ferroviário . . . . .                       | 173 |
| Tabela 44 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 1c nos anos de<br>2021 e 2025 . . . . .                    | 173 |
| Tabela 45 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 1c no ano de 2021 - 100%<br>ferroviário . . . . .          | 174 |
| Tabela 46 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 1c no ano de 2025 - 100%<br>ferroviário . . . . .          | 174 |
| Tabela 47 – Resultado do custo da rota para o cenário 1c no ano de 2021 - 100%<br>ferroviário . . . . .                       | 174 |
| Tabela 48 – Resultado do custo da rota para o cenário 1c no ano de 2025 - 100%<br>ferroviário . . . . .                       | 175 |
| Tabela 49 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 2a - 100%<br>hidroviário . . . . .                       | 176 |
| Tabela 50 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 2a nos anos de<br>2021 e 2025 . . . . .                    | 177 |
| Tabela 51 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 2a nos anos de 2021 e 2025<br>- 100% hidroviário . . . . . | 177 |
| Tabela 52 – Resultado do custo da rota para o cenário 2a nos anos de 2021 e 2025 -<br>100% hidroviário . . . . .              | 178 |
| Tabela 53 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 2b - 100%<br>hidroviário . . . . .                       | 179 |
| Tabela 54 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 2b nos anos de<br>2021 e 2025 . . . . .                    | 180 |
| Tabela 55 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 2b nos anos de 2021 e<br>2025 - 100% hidroviário . . . . . | 180 |
| Tabela 56 – Resultado do custo da rota para o cenário 2b nos anos de 2021 e 2025 -<br>100% hidroviário . . . . .              | 181 |
| Tabela 57 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 2c - 100%<br>hidroviário . . . . .                       | 182 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 58 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 2c nos anos de 2021 e 2025 . . . . .                                     | 183 |
| Tabela 59 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 2c nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário . . . . .                  | 183 |
| Tabela 60 – Resultado do custo da rota para o cenário 2c nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário . . . . .                               | 184 |
| Tabela 61 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 3a - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .                       | 186 |
| Tabela 62 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 3a nos anos de 2021 e 2025 . . . . .                                     | 187 |
| Tabela 63 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 3a nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . . | 187 |
| Tabela 64 – Resultado do custo da rota para o cenário 3a nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .              | 188 |
| Tabela 65 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 3b - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .                       | 189 |
| Tabela 66 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 3b nos anos de 2021 e 2025 . . . . .                                     | 190 |
| Tabela 67 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 3b nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . . | 190 |
| Tabela 68 – Resultado do custo da rota para o cenário 3b nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .              | 191 |
| Tabela 69 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 3c - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .                       | 192 |
| Tabela 70 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 3c nos anos de 2021 e 2025 . . . . .                                     | 193 |
| Tabela 71 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 3c nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . . | 193 |
| Tabela 72 – Resultado do custo da rota para o cenário 3c nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário . . . . .              | 194 |
| Tabela 73 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 4 - 75% ferroviário e 25% hidroviário . . . . .                        | 196 |
| Tabela 74 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 4 nos anos de 2021 e 2025 . . . . .                                      | 197 |
| Tabela 75 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 4 nos anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidroviário . . . . .  | 197 |
| Tabela 76 – Resultado do custo da rota para o cenário 4 nos anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidroviário . . . . .               | 198 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 77 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 5a - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .                              | 200 |
| Tabela 78 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 5a nos anos de 2021 e 2025 . . . . .  | 201 |
| Tabela 79 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 5a nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .        | 201 |
| Tabela 80 – Resultado do custo da rota para o cenário 5a nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .                     | 202 |
| Tabela 81 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 5b - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .                              | 203 |
| Tabela 82 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 5b nos anos de 2021 e 2025 . . . . .  | 204 |
| Tabela 83 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 5b nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .        | 204 |
| Tabela 84 – Resultado do custo da rota para o cenário 5b nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .                     | 205 |
| Tabela 85 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 5c - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .                              | 206 |
| Tabela 86 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 5c nos anos de 2021 e 2025 . . . . .  | 207 |
| Tabela 87 – Resultado de emissão de CO <sub>2</sub> para o cenário 5c nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .        | 207 |
| Tabela 88 – Resultado do custo da rota para o cenário 5c nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário . . . . .                     | 208 |
| Tabela 89 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2021 - 100% ferroviário . . . . .          | 235 |
| Tabela 90 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2025 - 100% ferroviário . . . . .          | 236 |
| Tabela 91 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1b para o ano de 2021 - 100% ferroviário . . . . .          | 238 |
| Tabela 92 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1b para o ano de 2025 - 100% ferroviário . . . . .          | 239 |
| Tabela 93 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1c para o ano de 2021 - 100% ferroviário . . . . .          | 241 |
| Tabela 94 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1c para o ano de 2025 - 100% ferroviário . . . . .          | 242 |
| Tabela 95 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 2a para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário . . . . . | 244 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 96 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 2b para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidrovíario . . . . .         | 246 |
| Tabela 97 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 2c para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidrovíario . . . . .         | 248 |
| Tabela 98 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 3a para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidrovíario  | 250 |
| Tabela 99 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 3b para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidrovíario  | 252 |
| Tabela 100 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 3c para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidrovíario | 254 |
| Tabela 101 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 4 para os anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidrovíario  | 256 |
| Tabela 102 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 5a para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidrovíario | 258 |
| Tabela 103 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 5b para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidrovíario | 260 |
| Tabela 104 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 5c para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidrovíario | 262 |
| Tabela 105 – Feasible triples for a highly variable Grid . . . . .   | 263 |

## LISTA DE ALGORITMOS

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 1 | Pseudocódigo da estrutura do simulador - adaptado de Oliveira (2021) . . . | 104 |
|---|--|-----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |  |
|----------|--|
| a.C.     | Antes de Cristo  |
| AgroStat | Base de dados sobre o comércio exterior do agronegócio brasileiro                        |
| API      | <i>Application Programming Interface</i>   |
| CNA      | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil   |
| ComexVis | Sistema de visualização gráfica do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços |
| Conab    | Companhia Nacional de Abastecimento  |
| DEA      | <i>Data Envelopment Analysis</i>   |
| DNIT     | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes                                   |
| EEA      | <i>European Environment Agency</i>   |
| Embrapa  | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  |
| Esalq    | Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP                                     |
| EUA      | Estados Unidos da América  |
| FAO      | <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>                           |
| FAOSTAT  | Banco de dados estatísticos corporativos da FAO  |
| FICO     | Ferrovias de Integração Centro-Oeste   |
| FIOL     | Ferrovias de Integração Oeste-Leste  |
| FNS      | Ferrovias Norte-Sul  |
| GO       | Goiás  |
| hec.     | Hectares   |
| IBGE     | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  |
| kg       | Quilogramas  |
| km       | Quilômetro   |
| MAPA     | Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento                                      |

|       |  |
|-------|--|
| mi    | Milhões  |
| MT    | Mato Grosso                                    |
| PA    | Pará   |
| PAM   | Produção Agrícola Municipal - IBGE             |
| PIB   | Produto Interno Bruto                          |
| PNL   | Plano Nacional de Logística                    |
| PNLT  | Plano Nacional de Logística e Transportes      |
| RdP   | Rede de Petri                                  |
| RMN   | Rumo Malha Norte                               |
| RO    | Rondônia                                       |
| Secex | Secretaria de Comércio Exterior                |
| SED   | Sistemas a Eventos Discretos                   |
| SP    | São Paulo                                      |
| TO    | Tocantins                                      |
| ton.  | Toneladas                                      |
| USDA  | <i>United States Department of Agriculture</i> |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |
|-----------|---|
| $A$       | Matriz de incidência                                    |
| $D_{max}$ | Deslocamento Máximo                                     |
| $P$       | Conjunto de lugares                                     |
| R\$       | Real brasileiro   |
| $T$       | Conjunto de Transições                                  |
| $T_{pr}$  | Ordem de prioridade das transições                      |
| US\$      | Dólar Americano   |
| $X_0$     | Marcação inicial da rede                                |
| $w$       | Função de ponderação dos arcos                          |
| $\infty$  | Infinito  |
| $\rho$    | Taxa de Ocupação  |
| $\tau$    | Tempo de atraso correspondente para cada um dos lugares |

## SUMÁRIO

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>28</b>  |
| <b>2</b> | <b>PANORAMA SOBRE O TEMA</b>                                  | <b>32</b>  |
| 2.1      | <i>Commodities</i> e o Consumo Alimentar no Mundo             | 32         |
| 2.2      | A Participação da Soja no PIB Brasileiro                      | 41         |
| 2.3      | A Logística da Soja Brasileira                                | 45         |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                  | <b>67</b>  |
| 3.1      | Estudos Sobre Rotas da Soja no Estado do Mato Grosso e Brasil | 67         |
| 3.2      | Estudos de Problemas de Logística com o Uso de Redes de Petri | 72         |
| 3.3      | A Localização deste Estudo na Literatura                      | 75         |
| <b>4</b> | <b>REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b>                     | <b>78</b>  |
| 4.1      | Otimização  | 78         |
| 4.1.1    | Problema de Localização de Facilidades                        | 80         |
| 4.2      | Otimização Multiobjetivo                                      | 81         |
| 4.2.1    | Método da Soma Ponderada                                      | 83         |
| 4.3      | Sistemas a Eventos Discretos                                  | 83         |
| 4.4      | Rede de Petri - Conceitos Básicos                             | 84         |
| 4.5      | Rede de Petri Limitada  | 88         |
| 4.6      | Rede de Petri Temporizada                                     | 90         |
| 4.6.1    | Rede de Petri T-temporizada                                   | 91         |
| 4.6.2    | Rede de Petri P-temporizada                                   | 92         |
| 4.7      | Considerações Sobre Incertezas em Problemas Estocásticos      | 94         |
| 4.8      | Análise dos Dados de Saída de um Modelo de Simulação          | 96         |
| 4.8.1    | Medidas de Desempenho   | 97         |
| 4.8.2    | Comparando Amostra de Dados                                   | 98         |
| 4.8.3    | Inferência Estatística  | 99         |
| 4.8.4    | Intervalo de Confiança  | 99         |
| 4.8.5    | Cálculo do Intervalo de Confiança                             | 100        |
| 4.8.6    | Simulação Terminal e não Terminal                             | 101        |
| 4.9      | Simulador de Rede de Petri P-temporizada                      | 102        |
| 4.10     | Teste Comparativo do Simulador RdP P-temporizada              | 105        |
| 4.10.1   | Modelo Analítico  | 107        |
| 4.10.2   | Modelo Álgebra Max-Plus                                       | 110        |
| 4.10.3   | Modelo Simulador RdP P-temporizada Estocástico                | 111        |
| 4.10.4   | Resultados dos Modelos de RdP                                 | 112        |
| <b>5</b> | <b>DETALHAMENTO DO ESTUDO DE CASO</b>                         | <b>114</b> |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.1      | Metodologia . . . . .   | 114        |
| 5.2      | Recursos Computacionais . . . . .   | 115        |
| 5.3      | Detalhamento do Problema . . . . .  | 116        |
| 5.4      | Definição dos Portos e Rotas dos Terminais Existentes no Estado . . . . .                 | 128        |
| 5.5      | Definição dos Custos de Operação e Emissão de CO <sub>2</sub> por Tipo de Modal . . . . . | 131        |
| 5.6      | Modelagem do Problema de Otimização . . . . .   | 132        |
| 5.7      | Modelagem do Problema de Simulação . . . . .  | 135        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO . . . . .</b>                                       | <b>139</b> |
| 6.1      | Resultados dos Cenários do Modelo de Otimização . . . . .                                 | 140        |
| 6.1.1    | Cenário 1 . . . . .   | 140        |
| 6.1.2    | Cenário 2 . . . . .   | 142        |
| 6.1.3    | Cenário 3 . . . . .   | 143        |
| 6.1.4    | Cenário 4 . . . . .   | 145        |
| 6.1.5    | Cenário 5 . . . . .   | 146        |
| 6.2      | Análise dos Resultados dos Cenários do Modelo de Otimização . . . . .                     | 148        |
| <b>7</b> | <b>RESULTADOS DO MODELO DE REDE DE PETRI P-TEMPORIZADA</b>                                | <b>159</b> |
| 7.1      | Resultados dos Cenários da Rede de Petri P-temporizada . . . . .                          | 159        |
| 7.1.1    | Cenário 1 . . . . .   | 160        |
| 7.1.1.1  | Cenário 1a . . . . .  | 160        |
| 7.1.1.2  | Cenário 1b . . . . .  | 167        |
| 7.1.1.3  | Cenário 1c . . . . .  | 171        |
| 7.1.2    | Cenário 2 . . . . .   | 175        |
| 7.1.2.1  | Cenário 2a . . . . .  | 175        |
| 7.1.2.2  | Cenário 2b . . . . .  | 179        |
| 7.1.2.3  | Cenário 2c . . . . .  | 182        |
| 7.1.3    | Cenário 3 . . . . .   | 185        |
| 7.1.3.1  | Cenário 3a . . . . .  | 185        |
| 7.1.3.2  | Cenário 3b . . . . .  | 189        |
| 7.1.3.3  | Cenário 3c . . . . .  | 192        |
| 7.1.4    | Cenário 4 . . . . .   | 195        |
| 7.1.5    | Cenário 5 . . . . .   | 199        |
| 7.1.5.1  | Cenário 5a . . . . .  | 199        |
| 7.1.5.2  | Cenário 5b . . . . .  | 203        |
| 7.1.5.3  | Cenário 5c . . . . .  | 206        |
| 7.2      | Análise dos Resultados da Rede de Petri P-temporizada . . . . .                           | 209        |
| <b>8</b> | <b>CONCLUSÃO . . . . .</b>  | <b>214</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>  | <b>217</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – Modelos e parâmetros da rede de Petri . . . . .</b>                       | <b>233</b> |

|   |            |
|---|------------|
| A.1 Modelos e parâmetros da rede de Petri P-temporizada estocástica utilizados nos cenários . . . . . | 233        |
| <b>APÊNDICE B – Identificação Numérica das Cidades do Estado do Mato Grosso . . . . .</b>             | <b>263</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é um dos mercados mais emergentes na atualidade. Comumente conhecido como celeiro do mundo, o Brasil tem tomado a liderança na exportação de produtos agrícolas. A soja é uma das culturas de maior impacto no agronegócio (Coradi et al., 2020). Kamali et al. (2016) apontam que a produção de soja possui um papel crucial no desenvolvimento da agricultura, tornando-se a mais importante *commodity* do agronegócio brasileiro.

O cultivo da soja é milenar, cerca de 2800 a.C. Considera-se que a leguminosa tenha sido muito utilizada como alimento na cultura chinesa. No continente americano, a primeira referência data de 1804 e, no Brasil, a primeira referência encontrada na literatura sobre a soja data de 1882 (Gazzoni e Dall’Agnol, 2018). Segundo os autores, a leguminosa ganhou rápida expansão em decorrência de diversos fatores como: (i) fácil adaptação das variedades e técnicas de cultivo, provavelmente advindas dos Estados Unidos; (ii) possibilidade de intercalação com a cultura de milho, permitindo assim o aproveitamento de mão de obra, máquinas e equipamentos, assim como armazéns; (iii) política de autossuficiência do milho, o que possibilitou uma melhor capitalização do produtor; (iv) possibilidades de mecanização total da cultura; (v) condições favoráveis de exportação; (vi) carência de óleos vegetais comestíveis para substituir a gordura animal; (vii) desenvolvimento rápido do parque de processamento, garantindo a total absorção da matéria-prima; (viii) participação de cooperativas nos processos de produção e comercialização; (ix) geração de tecnologias adaptadas às diferentes condições do país, possibilitando ganhos em produtividade e expansão para novas regiões.

A expansão da produção de soja foi desencadeada pela grande demanda por farelo e óleo de soja a níveis mundiais (MVO, 2011). Segundo Fearnside (2001), a soja é uma *commodity* agrícola de larga escala mundial. Cerca de 94% da soja é esmagada e somente 6% da produção é consumida e utilizada na forma de grãos (Oliveira e Schneider, 2016).

No que concerne à expansão da soja, Reenberg e Fenger (2011) apontam que a área global de terras voltadas para a produção de soja já vinha aumentando significativamente há décadas. Essa visão também é reforçada por Schaffer-Smith et al. (2018), que confirmam que esse aumento se deve à demanda global. Por consequência, esses autores enfatizam que o aumento tem como principal razão o crescimento populacional exponencial. Dessa forma, tanto a soja, quanto seus derivados, tornaram-se o alvo estratégico para o agronegócio.

De acordo com a Conab (2014), o Brasil tem se relevado como um dos maiores exportadores de soja do mundo. Segundo a Fao (2018) e de acordo com os dados da FAOSTAT, em 2016, o Brasil era o segundo maior produtor mundial de soja; o terceiro

maior produtor de milho e nono na produção mundial de arroz. O relatório da [OECD e FAO \(2019\)](#) indica que a produção de soja continuará em crescimento na próxima década e uma maior expansão do uso da terra para a soja é projetada em detrimento das pastagens. [Coradi et al. \(2020\)](#) atestam que, até 2019, o Brasil ocupava a segunda posição mundial para a produção de soja. Logo, já se tratava de um potencial fornecedor para o abastecimento global. Segundo os autores, a soja tem um mercado em expansão e exigente por conta do crescimento populacional.

A cadeia de abastecimento da soja é algo complexo pelo fato de envolver vários locais de produção e transporte. [Liu et al. \(2017\)](#) chamavam a atenção para a produção americana compreendendo-a como a posição de maior produção e exportação de soja. Em 2016, os EUA já contavam com 54,1 milhões de toneladas em volume de exportação e de 142 milhões de toneladas em volume produzido. Nesse período, os Estados Unidos até então ocupavam uma posição de destaque.

Embora os EUA assumissem essa posição de principal produtor de soja, em níveis mundiais, a soja brasileira também se destacava nas exportações, em geral, com o impacto na linha de mais de 40% do mercado mundial, juntamente com os EUA e Argentina ([USDA, 2017](#)). No cenário de 2020, referente à safra de 2019/2020 que atingiu patamares acima dos 123 milhões de toneladas de soja colhida, o Brasil volta a liderar o ranking dos países produtores de soja como maior produtor mundial, em função da queda americana no período, conforme levantamento do United States Department of Agriculture - [USDA \(2020\)](#). A partir daí, em 2020, o Brasil assumiu a liderança global. Embora a China tenha sido o berço da soja há milhares de anos e historicamente exportadora do grão, como afirmam [Sun et al. \(2015\)](#), ela foi superada pelos EUA. [Reenberg e Fenger \(2011\)](#) relatam que os EUA ultrapassaram a China com um dominante sistema de exportação. A China por sua vez, nesse contexto, passou a importar soja. Segundo [Schaffer-Smith et al. \(2018\)](#), as importações da China, nesse período, já correspondiam a 50% das exportações globais.

Vale lembrar que um dos empecilhos do Brasil para o avanço do setor do agronegócio se insere na infraestrutura para movimentação e escoamento dos produtos agrícolas. O setor do agronegócio tem grande participação na economia brasileira, seja pela contribuição significativa para a balança comercial, seja para o índice *superávit* para o país. Por essa razão, destaca-se a relevância do tema. Afinal, compreende-se que aspectos ligados à infraestrutura engendram impactos para a eficiência e desenvolvimento econômico.

[Amaral et al. \(2012\)](#) apontam que o país vem enfrentando diversidades quanto ao fato de transportar volumes de produção crescentes a cada ano, do interior do país para os terminais portuários localizados no litoral. A produção de soja tem concentração no estado do Mato Grosso. Cerca de 46% da produção de grãos brasileiros, incluindo o milho, concentra-se na região Centro-Oeste, nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás ([Zimmer e Marques, 2021](#)). Somente com uma infraestrutura eficiente dos serviços

de transportes é possível garantir uma melhor operacionalização da logística, na circulação de produtos do complexo da soja, do local de produção aos recintos alfandegários<sup>1</sup> (Jesus e Pereira, 2020). Com efeito, este estudo propõe a seguinte problemática: de que forma a otimização e simulação em rede de Petri podem auxiliar como ferramenta estratégica de tomada de decisão sustentáveis na gestão da complexa logística de transportes para facilitar o escoamento da soja?

Assim, o objetivo geral desta tese é propor um modelo sustentável de otimização e simulação em rede Petri P-temporizada direcionado às estratégias de expansão da rede intermodal de transporte de soja do estado do Mato Grosso. O intuito é explorar alternativas que promovam o melhor escoamento do produto destinado a exportação, considerando o *trade-off* custo e sustentabilidade. Como desdobramento, tem-se como objetivos específicos: (i) propor um modelo de otimização que promova uma análise de localização e na capacidade de terminais de transbordo no estado, levando em consideração aspectos de priorização de instalação quanto a a disponibilidade de modais, custos e emissão de CO<sub>2</sub>; (ii) analisar as rotas utilizadas na exportação da soja brasileira nas mesorregiões Norte, Nordeste e Sudeste Mato-Grossense; (iii) analisar a rede intermodal de transporte de soja, considerando os aspectos de eficiência e promoção da intermodalidade, no que tange ao escoamento da produção; (iv) criar uma ferramenta que permita simular alternativas estratégicas para o processo logístico de soja para o estado que auxilie a tomada de decisão envolvendo o *trade-off* custo e sustentabilidade ambiental.

O interesse pela temática se deu por uma predileção pela otimização dos processos produtivos e escoamento de produção, correlacionada à estratégia de negócios no campo das *commodities*, sobretudo no que diz respeito ao grande complexo da soja brasileira no estado do Mato Grosso, onde se localiza o maior centro produtivo do grão no Brasil. Acredita-se que, com o georreferenciamento dos dados e compreendendo a dinâmica do sistema a partir de estudos geográficos conjuntamente aos projetos estruturantes governamentais, os modelos propostos sejam capazes de otimizar e simular melhores alternativas de rotas para o escoamento do grão com ênfase na sustentabilidade.

Para um melhor entendimento deste estudo, organiza-se o texto da seguinte forma: O Capítulo 1 apresentou uma breve introdução do assunto, além da problemática, objetivos e justificativa. No Capítulo 2 realiza-se uma análise mais detalhada do tema, com destaque para a *commodity*, sua participação no PIB do Brasil e desafios logísticos para o seu escoamento. O Capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura com os principais trabalhos relacionados ao tema. No Capítulo 4 abordam-se os conceitos fundamentais das principais técnicas de otimização e simulação que serão utilizadas para desenvolver o trabalho, além das estratégias para a implementação. No Capítulo 5 detalha-se o estudo de caso, a

---

<sup>1</sup> Espaços delimitados pela autoridade aduaneira: portos, aeroportos e pontos de fronteira, cuja finalidade consiste em controlar a movimentação, armazenagem e despacho aduaneiro de mercadorias destinadas ou procedentes do exterior (BRASIL, 2009)

modelagem e as delimitações para o tratamento do problema. Os resultados do modelo de otimização são explicitados no Capítulo 6 e da rede de Petri P-temporizada no Capítulo 7. No Capítulo 8 é apresentado a conclusão do trabalho, as limitações da pesquisa e sugestões de avanços para novos estudos. Na sequência, elencam-se as principais referências consultadas. Complementarmente, o Apêndice A detalha as redes de Petri P-temporizadas utilizadas nos cenários e o Apêndice B caracteriza numericamente as cidades do Mato Grosso e suas coordenadas georreferenciadas.



## 2 PANORAMA SOBRE O TEMA

O presente capítulo apresenta um panorama sobre o papel da produção de *commodities* brasileiras e o fluxo de exportação do agronegócio em consonância com o consumo de alimentos em nível global. Trata também da importância do PIB do agronegócio brasileiro e dos desafios logísticos para o escoamento da produção na matriz de transportes.

### 2.1 *Commodities* e o Consumo Alimentar no Mundo

O aumento da demanda da produção de alimentos tem sido uma preocupação mundial. [OECD e FAO \(2019\)](#) preveem uma elevação do consumo de produtos agrícolas de cerca de 15% na próxima década. Juntamente com a demanda, observam-se os possíveis impactos do setor sobre diversas frentes, tais como: as de recursos naturais (principalmente a terra, água e biodiversidade) provocados pelas mudanças no uso do solo, as emissões de gases de efeito estufa, assim como os desafios de infraestrutura para gestão de escoamento das *commodities*. De acordo com o relatório da [OECD e FAO \(2019\)](#), há não somente perspectivas de expansão do setor agrícola, mas também desafios para a agricultura na América Latina e Caribe. A região possui o título de maior exportador de *commodities* agrícolas do mundo e o relatório prevê um reforço ainda maior dessa posição para a próxima década. Além disso, é válido destacar a visão de recursos e uma preocupação para com a importação de alimentos.

A América Latina abriga 57% das florestas primárias e é fonte de 40 a 50% da biodiversidade do mundo. São necessárias respostas políticas concatenadas sob medida em toda a América Latina e Caribe para se criar um ambiente propício que apoie a subsistência rural, ao mesmo tempo em que se protege a base recursos naturais do ambiente, com promoções de relações comerciais mutuamente benéficas ante a importação de alimentos dessas regiões ([OECD e FAO, 2019](#)).

As atividades agrocomerciais desempenham um papel importante na economia brasileira, principalmente nas mesorregiões de tendências agrícolas. No setor, a expansão do complexo da soja está diretamente ligada à área de cultivo (soja em grão) e as agroindústrias processadoras que dependem da soja *in natura* para a elaboração de seus produtos. É esperado que o Brasil ocupe uma posição de destaque na próxima década. Segundo [OECD e FAO \(2019\)](#), em função da expectativa de crescimento do consumo, as importações por Bangladesh e Vietnã devem crescer e as importações chinesas se estabilizarem. [U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service \(2016\)](#) aponta que China e Europa são os principais importadores da soja brasileira.

Dentro do cenário do agronegócio no Brasil, a soja ocupa o segundo lugar na quantidade de produção. Nesse quesito, a produção agrícola no estado do Mato Grosso cresceu consideravelmente, tendo em vista favoráveis condições de uso do solo. Segundo dados da [OECD e FAO \(2021\)](#), exibidos na Figura 1, o país produziu 134.934.935 toneladas do grão, perdendo apenas pelo cultivo tradicional da cana de açúcar 715.659.212 toneladas.

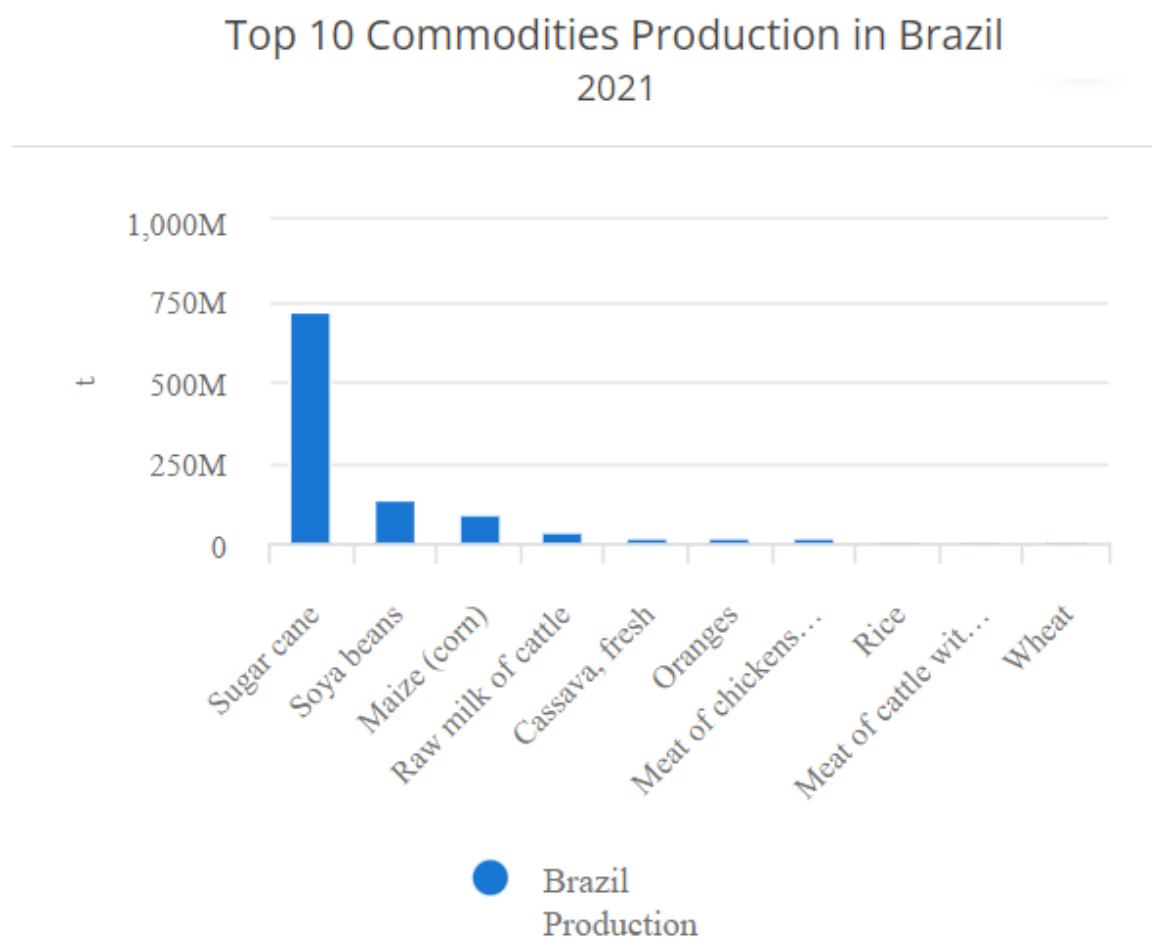


Figura 1 – As maiores *commodities* do Brasil

Fonte: FAOSTAT da [OECD e FAO \(2021\)](#)

Apesar da elevação dos preços da soja ocorrida entre os anos de 2005 e 2014, espera-se que, segundo a [OECD e FAO \(2019\)](#), haja uma queda gradual dos preços reais para a próxima década, conforme Figura 2.

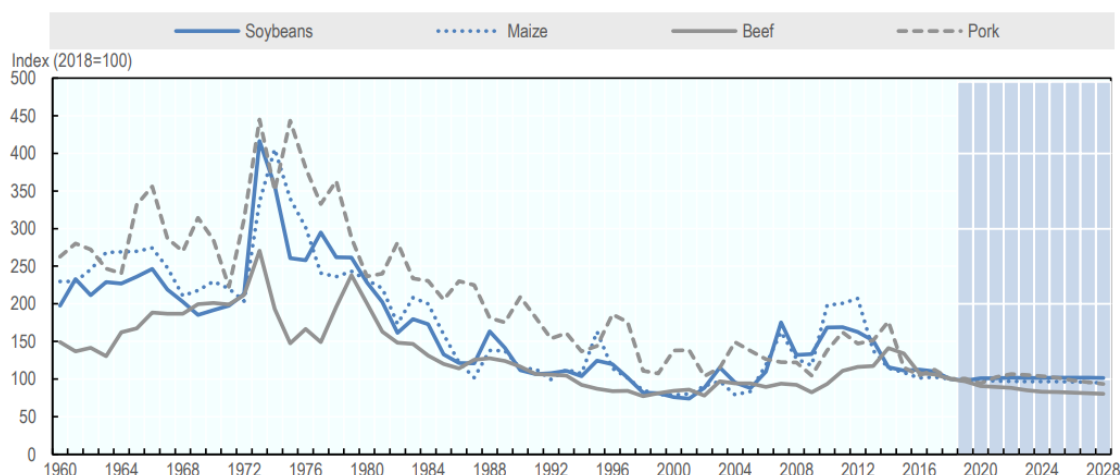


Figura 2 – Evolução de longo prazo dos preços das *commodities*

Fonte: [OECD e FAO \(2019\)](#)

Dados históricos mostram que os preços das *commodities* agrícolas foram muito elevados e tenderam a sofrer certo declínio ao longo dos anos. No entanto, o histórico dos dados também indica a possibilidade de períodos de volatilidade e alta de preços. Há uma certa tendência estrutural, porém eventos imprevisíveis podem ocorrer, tais como: falhas na colheita, mudanças climáticas, choques de demanda, entre outros.

Em princípio, os preços das *commodities* são influenciados por vários fatores, tais como os custos de transporte, política comercial, tributação e taxas de câmbio. Os preços internacionais também afetam as *commodities*, pois fornecem indicativos sobre a demanda global e as condições de oferta. Como as *commodities* são normalmente cotadas em dólar americano, existem variações constantes nos preços por conta da volatilidade cambial. Apesar de toda essa flutuação, a [OECD e FAO \(2021\)](#) acreditam que, em decorrência do alto crescimento da população global e da necessidade de produção de alimentos, haverá um impulso na demanda por *commodities* agrícolas na próxima década, o que exigirá dos países produtores maior dimensionamento da produção, gestão direcionada para a otimização do escoamento e tratamento adequado dessas *commodities* para se evitar problemas de armazenagem. Vale lembrar que a demanda por produtos agrícolas também está ligada a aspectos políticos e econômicos.

O principal direcionamento de grande parte das *commodities* brasileiras tem sido para os alimentos. Porém, a demanda para a fabricação de ração animal e para fins de combustíveis obtiveram ganhos significativos nas últimas décadas. Mudanças alimentares também costumam influenciar nesse direcionamento. Por exemplo, uma mudança alimentar voltada para o consumo de carne, afetará diretamente a produção de ração animal na pecuária. Conseqüentemente, a produção das *commodities* irá aumentar. A [OECD e FAO \(2021\)](#) acreditam que o crescimento de cereais na ração animal exceda a expansão do uso

de alimentos na próxima década, enquanto que matérias-primas para biocombustíveis, não terão maiores ganhos. Com efeito, os aspectos sociopolíticos também podem ter a sua contribuição no agronegócio. O crescimento populacional, sobretudo, tem um papel relevante nesse processo.

Em geral, o consumo alimentar per capita de produtos básicos (cereais, raízes e tubérculos, leguminosas) se estabilizou globalmente e será impulsionado predominantemente pelo crescimento populacional, enquanto a evolução da demanda de *commodities* de maior valor (açúcar, óleos vegetais, carnes, laticínios) será baseada em uma combinação de renda per capita e crescimento populacional. Como resultado, projeta-se que os produtos de maior valor agregado aumentem mais rápido do que os produtos básicos na próxima década (OECD e FAO, 2021).

A população representa um fator significativo para o crescimento no consumo de alimentos e mercadorias. As *commodities* costumam ter alto um consumo per capita em regiões com forte crescimento populacional. No caso dos cereais, a importância da população como um fator determinante tende a permanecer alta entre as regiões de renda mais baixa, uma vez que a demanda per capita está estagnada ou mesmo diminuindo em vários países de alta renda. A demanda total de bens agrícolas, o crescimento da renda per capita e a dinâmica de aumento populacional variam de região para região. Segundo OECD e FAO (2021), os desenvolvimentos demográficos são um guia de crescimento da demanda por *commodities* em muitas regiões. A Figura 3 mostra, para regiões e *commodities* selecionadas, a parcela do crescimento no uso de alimentos, representada pelo crescimento populacional.



Figura 3 – Contribuição da população de determinados países no crescimento do uso de alimentos

Fonte: Dados da OECD-FAO Agricultural Outlook, OECD Agriculture statistics (database) (OECD e FAO, 2019)

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sob os números da Produção Agrícola Municipal (PAM), em 2020, houve um aumento expressivo no valor da produção agrícola do Brasil, atingindo valores da ordem de R\$ 470,5 bilhões, 30,4% maior que em 2019. Só no estado do Mato Grosso, a produção de soja chegou a 35 milhões de toneladas, conforme o gráfico a seguir. A área plantada no ano de 2020, em nível Brasil, totalizou 83,4 milhões de hectares, sendo 2,7% superior a do ano anterior. A produção de cereais, leguminosas e oleaginosas chegou a 255,4 milhões de toneladas, 5,0% maior que a de 2019. Quanto à área plantada, só o estado do Mato Grosso destinou 10 milhões de hectares, conforme Figura 4, o que demonstra o desempenho do estado frente aos demais estados brasileiros.



Figura 4 – Área plantada de soja do Mato Grosso

Fonte: IBGE (2021)

Comparativamente aos demais estados brasileiros, o estado do Mato Grosso é o destaque na produção da soja brasileira. O município de Sorriso no Mato Grosso segue como a região brasileira com maior número da produção agrícola, segundo a PAM e IBGE (2020). Vale destacar que o crescimento da produção de soja do estado já era sustentado desde 2011, com uma leve queda em 2016, como ilustrado na Figura 5, a seguir:

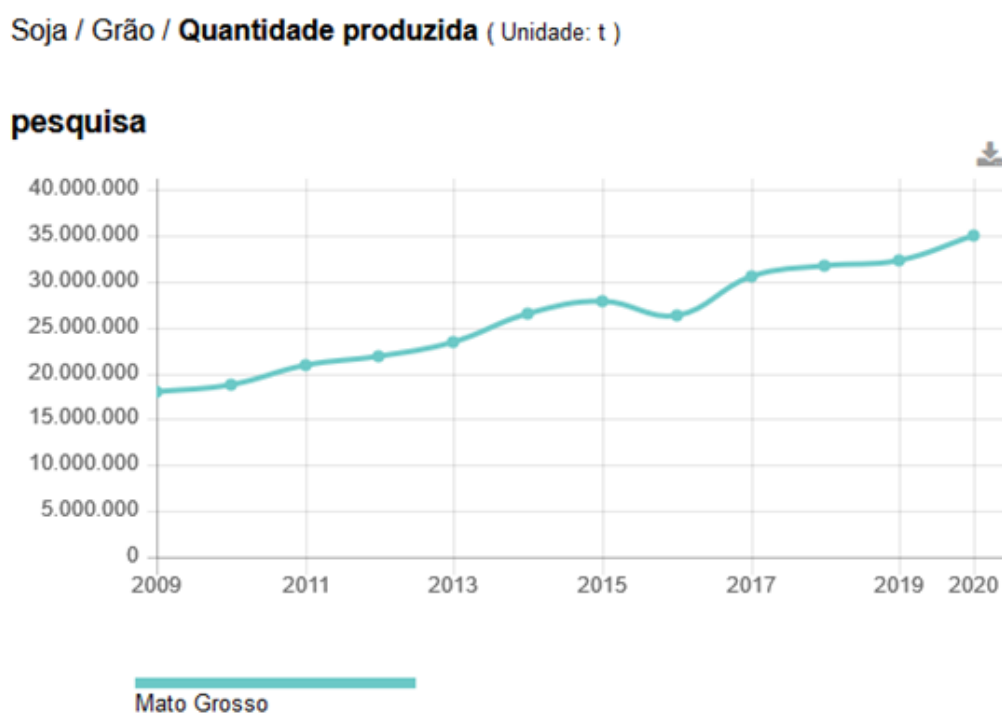


Figura 5 – Produção de soja do Mato Grosso

Fonte: IBGE (2021)

O Brasil se tornou o maior produtor de soja do mundo, ultrapassando os Estados Unidos em 2020. Com condições climáticas favoráveis para o ano, Mato Grosso foi o estado com maior número de produção agrícola. De acordo com a PAM e IBGE (2020), o valor gerado pela soja no ano de 2020 cresceu 35,0%, totalizando R\$ 169,1 bilhões, mantendo a liderança no *ranking* das culturas agrícolas. O rendimento médio da soja também subiu, passando de 2.199 kg/ha (quilos por hectare) em 1995 para 3.275 kg/ha (quilos por hectare) em 2020. Na série histórica da PAM, a safra dos cereais, leguminosas e oleaginosas consolidou-se como a maior registrada em 2020. A soja teve um acréscimo de 7,5 milhões de toneladas, o milho 2,8 milhões de toneladas e o arroz, um ganho de 722,4 mil toneladas.

Na Figura 6 a seguir, pode-se observar nos mapas, a expansão da produção de soja pelo país de 2000 a 2020 com destaques para o estado do Mato Grosso, a região sul do país e parte do nordeste.

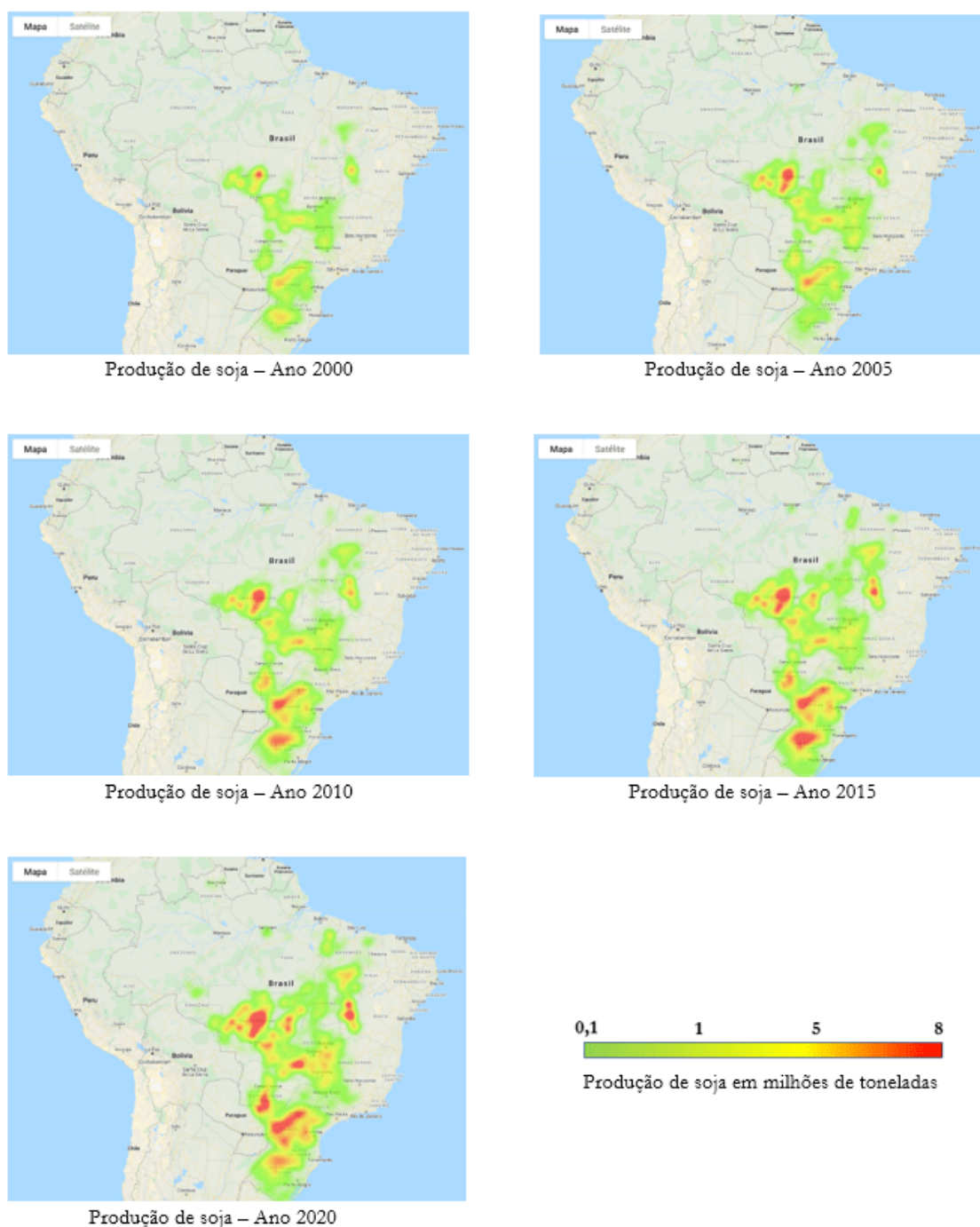


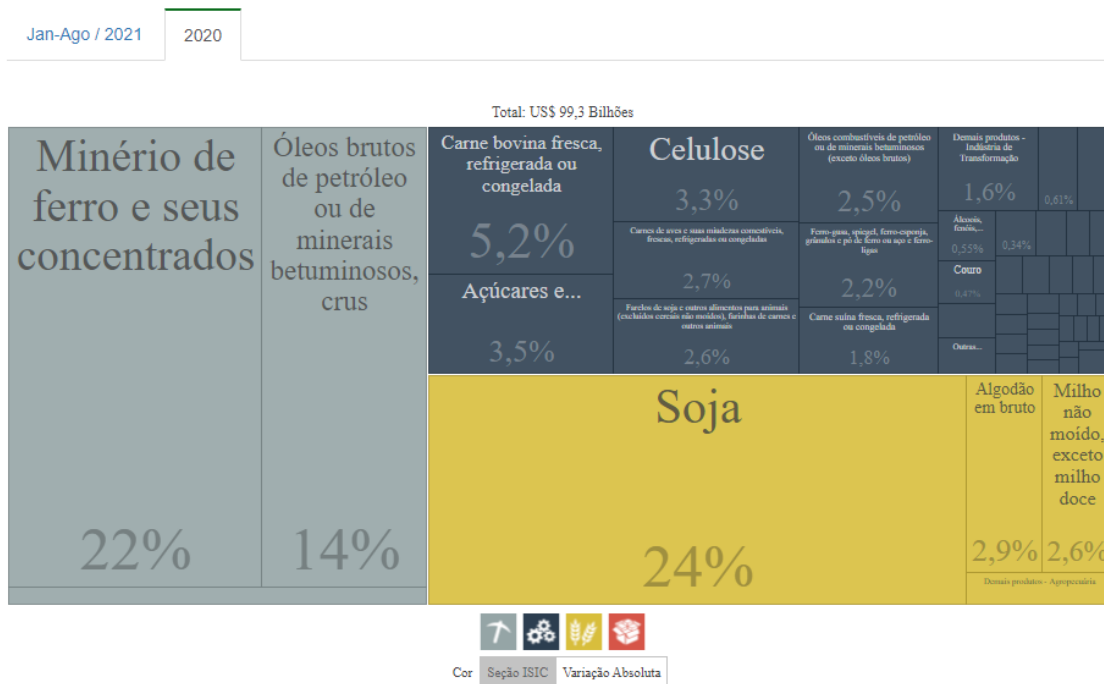
Figura 6 – Mapa da evolução da produção de soja no Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de [IBGE \(2021\)](#)

Vale lembrar também que, dos produtos de exportação, a soja ocupa uma posição importante, ultrapassando inclusive as exportações de minério de ferro em 2020, um dos carros-chefe do Brasil. Isso demonstra que o agronegócio é, de fato, bastante considerável no Brasil e acaba gerando impactos nos índices econômicos do país. Em termos globais, o país é reconhecido pela liderança no setor. A Figura 7 ilustra a situação.



Visão Geral dos Produtos Exportados - Destino: Ásia (Exclusive Oriente Médio)

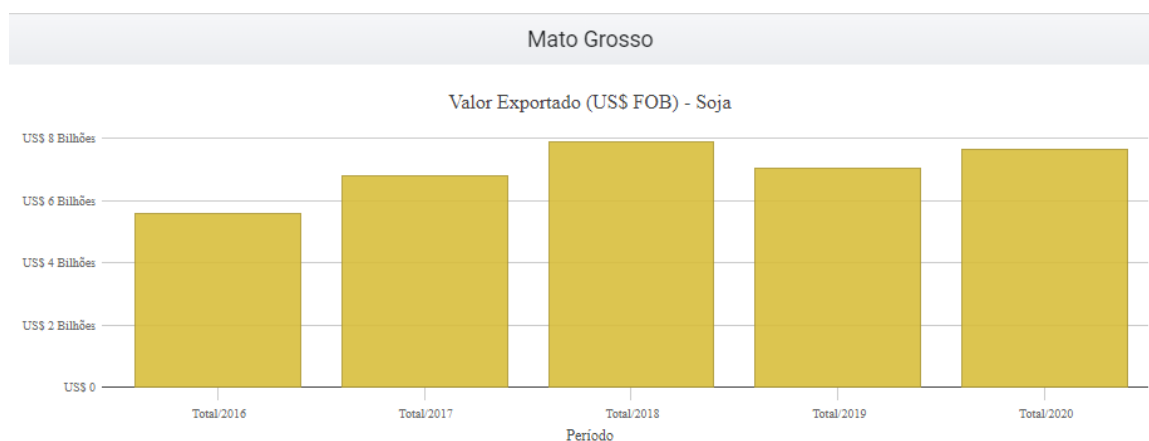


\*Variações em relação ao mesmo mês do ano anterior.

Figura 7 – Exportações do Brasil com destino a Ásia em 2020

Fonte: Secex e ComexVis (2021)

Em se tratando de valores de exportação, a soja correspondeu ao valor próximo de US\$8 bilhões em 2020 somente no estado do Mato Grosso. Além disso, o grão manteve crescimento nos últimos 5 anos, apesar do período pandêmico ter afetado fortemente a economia brasileira, conforme apresentado na Figura 8 a seguir:



\*Variações em relação ao mesmo mês do ano anterior.

Figura 8 – Valor em US\$ da exportação de soja do estado do Mato Grosso

Fonte: Secex e ComexVis (2021)

## 2.2 A Participação da Soja no PIB Brasileiro

O agronegócio tem se demonstrado como um vetor crucial para o crescimento do PIB econômico do Brasil. De acordo com o CNA (2021), entende-se por agronegócio a soma de quatro segmentos: insumo para agropecuária, produção agropecuária básica (ou primária), agroindústria (processamento) e agrosserviços.

O Produto Interno Bruto (PIB)<sup>2</sup> de um país é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos pelo país, estados e cidades, normalmente dentro de um ano (IBGE, 2021). Para o cálculo do PIB, utilizam-se diversos dados, sendo alguns produzidos pelo IBGE e outros provenientes de fontes externas. O PIB consiste em um indicador síntese de uma economia, que mostra o cenário econômico de um país. A partir da performance do PIB é possível compreender diversos fatores e projetar análises como: realizar comparações internacionais sobre o tamanho da economia dos diversos países; analisar o PIB per capita (divisão do PIB) por número de habitantes, medir o quanto do PIB caberia a cada indivíduo se todos recebessem partes iguais (IBGE, 2021).

O agronegócio tem tido uma participação importante no crescimento econômico do Brasil. Segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), em 2019, a soma de bens e serviços gerados no agronegócio correspondeu a R\$1,59 trilhão de reais ou 21,4% do PIB brasileiro, sendo a maior parte proveniente do ramo agrícola, 68% desse valor e 32% à pecuária.

No que se refere à produção de soja, só no ano de 2020, em termos de exportação, o grão correspondeu a mais de 28 bilhões de dólares, o equivalente a uma participação de 13,7% nas exportações totais brasileiras e 63,3% apenas no setor agropecuário, sendo a primeira posição no *ranking*. Os dados exibidos na Figura 9 mostram a importância da soja para a economia brasileira, onde pode-se notar a posição da soja como sendo o primeiro lugar nas exportações totais e no setor agropecuário.

<sup>2</sup> O PIB é, contudo, apenas um indicador síntese de uma economia. Ele ajuda a compreender um país, mas não expressa importantes fatores, como distribuição de renda, qualidade de vida, educação e saúde. Um país tanto pode ter um PIB pequeno e ostentar um altíssimo padrão de vida, como registrar um PIB alto e apresentar um padrão de vida relativamente baixo (IBGE, 2021)



Figura 9 – Participação da soja nas exportações brasileiras  
 Fonte: Cepea e CNA (2021)/USP, Secex e ComexVis (2021)

Quanto aos agrosserviços, o CNA (2021) também destaca crescimento de 6,62%, em 2021, reflexo, especialmente do excelente desempenho do campo e seu impacto sobre o uso de serviços de transporte, comércio, armazenagem, entre outros. Segundo a confederação, os resultados podem ser observados na tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – PIB do agronegócio: taxa de variação acumulada no período (%)

|               | Insumos | Primário | Agroindústria | Agrosserviços | Total |
|---------------|---------|----------|---------------|---------------|-------|
| Agronegócio   | 9,91    | 11,16    | 1,29          | 3,15          | 5,35  |
| Ramo agrícola | 6,65    | 14,77    | 2,99          | 6,62          | 7,99  |

Fonte: Cepea e CNA (2021)/USP e CNA (2021)

De acordo com CNA (2021), depois do recorde de 2020, o PIB do agronegócio, calculado pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) teve alta de 5,35%, o que demonstra um avanço do setor. Segundo o CNA (2021), o excelente resultado para o agronegócio refletiu a alta do PIB no ramo agrícola em (7,99%). Acredita-se que a participação do agronegócio no PIB total brasileiro possa ultrapassar a 30% em 2021, segundo a confederação. Vale lembrar que o cenário pandêmico surgido no final de 2019 tem influência nesses números. Como consequência, em 2021, apesar do Brasil ter sofrido impactos em alguns setores do agronegócio, a pandemia não foi o suficiente para comprometer o crescimento do PIB no setor.

Entre os segmentos do agronegócio, a agroindústria teve o desempenho tímido no primeiro trimestre de 2021, com alta de 1,29% no PIB. Como discutido em relatórios anteriores, esse segmento foi o mais influenciado do agronegócio pelos choques de oferta e de demanda gerados pela chegada da pandemia de Covid-19 no Brasil. No ramo agrícola, o crescimento de 2,99% foi favorecido por preços maiores em diversas atividades industriais; por outro lado, o PIB foi pressionado pelo volume de produção ainda estagnado e pelo aumento dos custos industriais (CNA, 2021, p.10).

Em geral, segundo o CNA (2021), os cálculos do PIB do agronegócio resultam em dois indicadores principais, que retratam o comportamento do setor por diferentes vertentes: (i) PIB renda agronegócio, que reflete a renda real do setor contendo cálculo de variações de volume e preços reais; (ii) volume agronegócio, que corresponde ao PIB do agronegócio pelo critério de preços constantes. De acordo com o IBGE (2021) em 2020, o PIB brasileiro foi de R\$ 7,4 trilhões. No último trimestre de 2021, o valor foi de R\$ 2,04 trilhões.

Segundo Esalq (2021), o PIB do agronegócio brasileiro segue em forte ritmo de crescimento. O segmento agricultura obteve um bom resultado do PIB, tendo em vista a elevação dos preços dos produtos agrícolas. Segundo a Confederação da agricultura e pecuária do Brasil (CNA) e Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), com relação à cultura da soja, o aumento esperado no faturamento é de 75,27%, em função da alta de 61,00% nos preços reais, na comparação entre janeiro a junho de 2020 e de 2021.

De acordo a Sefaz-MT (2021), praticamente um terço do PIB brasileiro é do agronegócio, juntamente com as outras *commodities* - petróleo e gás, e mineração, cerca de de 40% a 45% do PIB do Brasil. Acredita-se que as *commodities* agrícolas têm uma difusão mais forte na economia, contribuindo significativamente para impulsionar a renda e o consumo nas regiões produtoras. O PIB do agronegócio tem uma participação da ordem de 30%. Nos estados do Centro-Oeste, o peso do agronegócio no PIB chega a ser superior a 80%. Estima-se que o estado do Mato Grosso deva registrar crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) em 4,1% e liderar a retomada da economia brasileira.

O cálculo do PIB do agronegócio brasileiro é feito a partir de estudo de uma parceria entre o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), da Esalq/USP e a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). De acordo com o Cepea e CNA (2021), o agronegócio é entendido como a soma de quatro segmentos: insumos para a agropecuária, produção agropecuária básica, ou primária, agroindústria (processamento) e agrosserviços. Com efeito, para análise do agronegócio, considera-se o conjunto de todos esses segmentos. Dessa forma, o PIB do agronegócio brasileiro refere-se ao produto gerado de forma sistêmica. Na tabela 2 a seguir, pode-se observar a sustentabilidade dos valores e um aumento de 2019 para 2020 para o PIB do agronegócio, chegando a 1,9 trilhão de reais, o que demonstra uma participação de aproximadamente 25% da economia brasileira.

Tabela 2 – Histórico do PIB do agronegócio brasileiro

PIB-renda do Agronegócio Brasileiro, 1996 a 2020, em R\$ Milhões de dez/2020

| Data | Agronegócio |                  |               |              | Agronegócio Total (A+B+C+D) |
|------|-------------|------------------|---------------|--------------|-----------------------------|
|      | (A) Insumos | (B) Agropecuária | (C) Indústria | (D) Serviços |                             |
| 1996 | 30.262      | 188.280          | 559.461       | 838.870      | 1.616.874                   |
| 1997 | 31.398      | 188.026          | 514.936       | 770.815      | 1.505.175                   |
| 1998 | 30.429      | 188.998          | 483.939       | 732.204      | 1.435.570                   |
| 1999 | 33.309      | 194.588          | 474.249       | 719.799      | 1.421.945                   |
| 2000 | 38.936      | 196.712          | 518.608       | 785.257      | 1.539.513                   |
| 2001 | 40.636      | 226.054          | 497.715       | 774.053      | 1.538.459                   |
| 2002 | 51.734      | 267.974          | 495.204       | 776.394      | 1.591.306                   |
| 2003 | 64.384      | 311.717          | 481.841       | 769.227      | 1.627.168                   |
| 2004 | 72.195      | 285.391          | 470.728       | 718.789      | 1.547.103                   |
| 2005 | 56.444      | 231.087          | 458.928       | 674.047      | 1.420.506                   |
| 2006 | 49.191      | 259.882          | 445.307       | 657.891      | 1.412.271                   |
| 2007 | 58.629      | 276.827          | 441.394       | 679.601      | 1.456.450                   |
| 2008 | 73.326      | 304.212          | 443.202       | 705.388      | 1.526.127                   |
| 2009 | 59.951      | 257.481          | 439.127       | 685.011      | 1.441.569                   |
| 2010 | 60.745      | 313.444          | 452.397       | 729.057      | 1.555.643                   |
| 2011 | 65.518      | 360.079          | 431.319       | 707.707      | 1.564.622                   |
| 2012 | 67.439      | 320.579          | 416.261       | 666.567      | 1.470.846                   |
| 2013 | 69.859      | 333.320          | 413.897       | 674.238      | 1.491.316                   |
| 2014 | 67.823      | 331.283          | 409.420       | 676.907      | 1.485.433                   |
| 2015 | 66.342      | 332.644          | 424.215       | 721.699      | 1.544.899                   |
| 2016 | 67.224      | 373.765          | 442.175       | 771.899      | 1.655.064                   |
| 2017 | 63.020      | 343.994          | 425.067       | 728.744      | 1.560.824                   |
| 2018 | 70.886      | 329.780          | 426.213       | 712.200      | 1.539.078                   |
| 2019 | 75.026      | 331.151          | 440.132       | 745.618      | 1.591.927                   |
| 2020 | 80.210      | 518.534          | 478.500       | 901.650      | 1.978.894                   |

Fonte: Cepea e CNA (2021) e CNA (2021)

Além disso, o CNA (2021) aponta que há forte contribuição do agronegócio no desempenho da economia brasileira com sucessivos *superávits* à balança comercial do país, como visto na Figura 10. Logo, o agronegócio nacional, incluindo o estado do Mato Grosso, tem significativa participação no PIB do país.

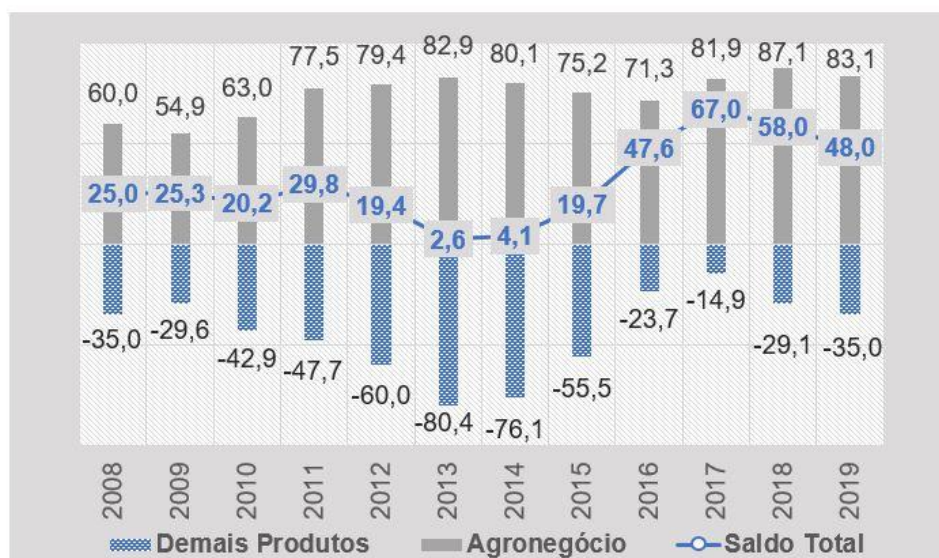


Figura 10 – Saldo da Balança Comercial Brasileira de 2008 a 2019 (em US\$ bilhões)

Fonte: AgroStat/MAPA e CNA (2021)

### 2.3 A Logística da Soja Brasileira

A logística consiste no planejamento e a operação dos sistemas físicos, informacionais e gerenciais necessários para o deslocamento de insumos e produtos. Em linhas gerais, o *Council of Supply Chain Management Professionals*, anteriormente denominado *Council of Logistics Management* até o ano de 2015, define o sistema logístico como parte do processo da cadeia de suprimentos, de modo a considerar: o planejamento, a implementação, o controle de expedição, fluxo, armazenagem de bens e serviços. Na visão de [Castillo \(2004\)](#), a logística compreende processos, procedimentos e ações voltadas para a organização e otimização do movimento de produtos, do fornecimento de insumos à finalização da cadeia, isto é, ao consumo final. Para isso, parte do acompanhamento do movimento do produto, com o gerenciamento de estoques, políticas de *just-in-time*, *just-in-place*, importação e exportação.

Em outros termos, a logística é compreendida também como o planejamento e a operação dos sistemas físicos, informacionais e gerenciais úteis para que insumos e produtos possam vencer condicionantes espaciais e temporais de forma econômica ([Daskin, 1985](#)). Além disso, engloba o fluxo de informações relacionados ao ponto de origem até o destino, com o propósito de atender à demanda do cliente. De certo modo, a agrologística permite que produtos e insumos cheguem ao lugar certo, momento certo e, principalmente, em condições adequadas com menor custo possível ([van der Vorst et al., 2007](#)). Na concepção de [Jesus e Pereira \(2020, p.324\)](#), “a logística surgiu no segmento do agronegócio para impulsionar a produção e reduzir os custos relacionados às operações do complexo agroindustrial de *commodities* agrícolas”.

No que diz respeito ao processo logístico, os meios de transportes permitem que a comercialização do complexo da soja seja realizada, uma vez que é por meio deles que é possível movimentar o fluxo do produto, seja na forma *in natura*, seja na forma de produtos processados, tais como: farelo e óleo de soja. Para [Pereira e Hespagnol \(2015\)](#), a logística traz serviços capazes de estimular transações comerciais entre produtores, vendedores e compradores, auxiliando na dinâmica dos mercados. Na perspectiva dos autores, esse é o papel da logística cujo o maior desafio é promover a redução de custos sem perder a qualidade dos produtos e serviços. [Jesus e Pereira \(2020, p.323\)](#) ressaltam que a expansão das atividades agrícolas para as regiões brasileiras distantes dos pontos de consumo exige “corredores de transportes que sejam responsáveis, principalmente, pela movimentação de mercadorias destinadas às exportações, incluindo as infraestruturas de escoamento, de transbordo e de armazenagens de produtos”.

No que se refere às infraestruturas logísticas das principais rotas de exportação brasileiras, pode-se dizer que as de escoamento de produção são bem limitadas, o que prejudica também o uso de mais de um modal ([Souza et al., 2016](#)). Sobre esse assunto, [Melo et al. \(2018\)](#) reforçam que, no Brasil, há uma certa dependência do modo de transporte rodoviário, o que favorece a ineficiência de rotas de escoamento, comparativamente a países como os Estados Unidos, um grande exportador de soja, que possui rotas bem estruturadas. [Branco et al. \(2020\)](#) também mostram que, no Brasil, o transporte de cargas é altamente dependente de rodovias. Nesse sentido, as estradas correspondem a 61,1% do total de cargas transportadas. Já em outros países de extensão geográfica semelhante, essa participação é menor que 30%. Considerando o transporte interno das principais *commodities*, os autores afirmam que quase 50% são transportados pelo rodoviário, 40% ferroviário e 10% hidroviário.

De acordo com a [Confederação Nacional do Transporte \(2021\)](#), o papel principal do serviço de transporte é promover a mobilidade de pessoas, insumos e bens e permitir o acesso aos mercados. Sendo assim, constitui-se peça essencial para a economia de um país. Dessa forma, quando há problemas de caráter de eficiência em decorrência de limitações e falta de infraestrutura, compromete o desenvolvimento socioeconômico do país. Nesse contexto, faz-se necessária uma rede de transportes eficiente. A [Confederação Nacional do Transporte \(2021\)](#) ainda alega que várias são as vantagens de se ter um sistema de transporte adequado: menores custos operacionais; redução de acidentes; menor tempo de deslocamentos; opções de acesso aos destinos; redução de impactos ambientais e menor gasto com combustível.

[Wanke e Fleury \(2006\)](#) explicam que o setor de transportes brasileiro tem problemas de ordem estrutural, muito pela falta de planejamento de desenvolvimento integrado, o que compromete substancialmente o desenvolvimento econômico e social do país. Isso aponta uma necessidade de investimentos em infraestrutura, seja em expansão, seja imple-

mentação, ou ainda, otimizar operações, visando uma multimodalidade e intermodalidade. A multimodalidade consiste em um caminho possível para a redução dos custos logísticos (Martins, 2012).

Segundo a [Confederação Nacional do Transporte \(2021\)](#), é notável a queda do número de investimentos público federal em infraestrutura de transporte, como visto na Figura 11. O direcionamento do orçamento para investimentos é instável e acaba prejudicando o sistema de transporte, sobretudo para planejamentos de longo prazo.

### Transporte e Desenvolvimento

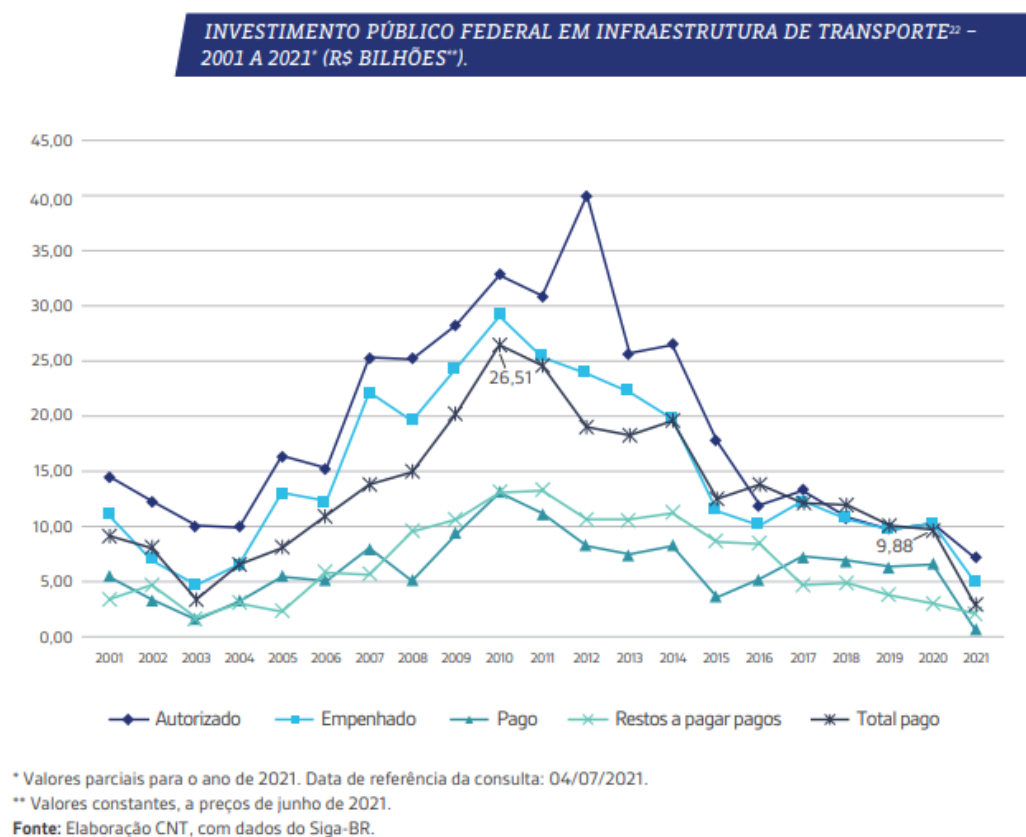


Figura 11 – Histórico do investimento público federal em infraestrutura de transportes (em R\$ bilhões)

Fonte: [Confederação Nacional do Transporte \(2021\)](#)

Além disso, [Jesus e Pereira \(2020, p.324\)](#) sustentam que “pelo fato de os produtos agroindustriais terem baixo valor agregado, os preços dos fretes têm impactos diretos no preço final dos produtos agroalimentares”

[Vidotte Plaza et al. \(2020, p.750\)](#) lembram que se faz necessário implementar centros de integração logística (CIL), “tanto para equilibrar a matriz de transporte



(reduzindo os custos logísticos envolvidos), quanto para aumentar sua eficiência econômica de longo prazo”. Branco et al. (2020) destacam que os gargalos de infraestrutura e a baixa produtividade do transporte têm aumentado os custos de frete, bem como as emissões de CO<sub>2</sub>. Nesse sentido, é essencial implementar centros de integração logísticas, a fim de equilibrar a matriz de transporte e aumentar a eficiência econômica. Segundo Guimarães et al. (2017), para que as estruturas de integração possibilitem uma otimização dos custos logísticos, é preciso localizá-las em pontos estratégicos do território nacional.

Pereira e Ferreira (2013) argumentam que cada modalidade que forma a sua rede tem sua especificidade particular. Contudo, a união delas forma uma rede de transporte intermodal complexa, que precisa ser interconectada pelos terminais de transportes. Essa rede de transportes compreende um conjunto que faz parte da infraestrutura viária, composta por vias rodoviárias, ferroviárias, marítimas e aéreas.

Segundo Coradi et al. (2020, p.2), o Brasil tem enfrentado problemas no setor agrícola, no que diz respeito à soja. “A produção no país é maior do que a capacidade de armazenamento estático”. Chen et al. (2010) já afirmavam que a falta de unidades de armazenamento agrava o problema. Nessa condição, os produtores se viram obrigados a diminuir o preço dos seus produtos após a colheita.

De acordo com as recomendações da FAO, a capacidade de armazenamento estático deve ser pelo menos 1,2 vezes a produção anual. No entanto, a capacidade brasileira é de armazenamento de 162.317,5 milhões de toneladas, com déficit de aproximadamente 70 milhões de toneladas em relação à produção (Coradi et al., 2020, p.2).

As unidades responsáveis por receber e armazenar a matéria-prima desempenham papel importante no agronegócio, sobretudo no que se trata do escoamento de grãos e política de abastecimento (USDA, 2019). Caixeta Filho (2010) defende que, no setor de *commodities*, o armazenamento é crucial para não só reduzir perdas, conservar os produtos, como também é um recurso estratégico para momentos de entressafra, período em que ocorre flutuações de preços dos produtos.

Segundo a USDA (2021), o preço médio de exportação da soja brasileira aumentou cerca de 14%, de \$ 347,69 por tonelada para \$ 396,30 por tonelada. Nesse caso, os agricultores se beneficiaram em decorrência da desvalorização monetária do real em comparação ao dólar americano, pois a soja é valorada em dólar, mas paga em reais. Contudo, o agronegócio também apresenta problemas. Jesus e Pereira (2020) apontam que os *players* do agronegócio denunciam que as deficiências da infraestrutura de transporte e da rede de armazenagem, no decorrer da cadeia produtiva, afetam a competitividade dos custos operacionais de produção e distribuição de *commodities*. Os autores reforçam que, em relação à competitividade brasileira no segmento agroexportador, isso se deve a decorrência da falta de modernização do setor.

Vidotte Plaza et al. (2020) afirmam que a eficiência brasileira no setor de transportes é baixa, o que gera impactos nas relações comerciais. O custo logístico equivale de 10,6 a 15,4% do valor do produto, enquanto os Estados Unidos são de 8,5%. Sob esse aspecto, confirma-se a hipótese de que a gestão ineficiente de transporte é um dos empecilhos que prejudica o desenvolvimento do agronegócio brasileiro (Guimarães, 2019; Rebelo, 2019).

Contudo, o Ministério da Infraestrutura (2021, p.n) ressalta que “o estado do Mato Grosso merece uma logística de primeira qualidade para atender as necessidades do agronegócio e dar conta do potencial de produção da região”. Fajardo (2006) atesta que a região Centro-Oeste é promissora em termos de possibilidades de expansão da área de plantação e produtividade por hectare. A autora relata a necessidade de melhoria da estrutura logística de escoamento tendo em vista a expectativa de crescimento do setor de produção de soja, desde aquela época. Além disso, há também um destaque de crescimento voltado para o interior do país, o que dificulta o escoamento até os portos. Cerca de 60% da soja exportada é transportada por rodovias como a BR-163 e a BR-364 (Vieira Filho, 2019), sendo que as principais que rotas de exportação seguem pelo estado do Mato Grosso até o Porto dos Santos, com uma distância de aproximadamente 2.000km.

Após 15 anos da data dos estudos de Fajardo (2006) até a atualidade, percebe-se que o problema ainda persiste. No que tange aos portos brasileiros, Wanke (2013), ao estudar a eficiência dos portos no País, revela que o gargalo brasileiro não está ligado à capacidade dos portos, mas na capacidade de receber embarques de carga, o que leva a crer que é o transporte até o porto que afeta a exportação. A chegada de cargas e a capacidade dos portos são um sistema conjugado, que devem operar em equilíbrio, para se atingir desejados números de exportação.

Pera et al. (2019) afirmam que o sistema de transportes brasileiro tem muitos gargalos, o que aumenta ainda mais os custos de transporte. Normalmente, os caminhões transportam grande parte da soja até os portos, percorrendo uma distância de 2.000 km em rodovias de qualidade comprometida. Nos portos, há muitas filas que também afetam o escoamento. Tais problemas ocasionam elevação nos preços, pois o custo inevitavelmente será maior que o de transporte dos EUA, segundo os autores.

Périco e Silva (2020) também investigaram a eficiência dos portos brasileiros, calculando e analisando as eficiências. Esses autores atestam que alguns portos apresentam bom desempenho, enquanto outros são moderados ou com baixa eficiência. E isso se dá, normalmente, por uma gestão que não produz os resultados esperados. Eles ressaltam que um problema comum a todos os portos brasileiros diz respeito à infraestrutura e dizem que esse problema exige investimento público. Também afirmam que as hidrovias e ferrovias são pouco utilizadas, enquanto que as rodovias são altamente demandadas.

Os portos públicos são responsáveis por 93,8% da exportação da carga total recebida. Dos 19 portos estudados por Périco e Silva (2020), 14 transportam mais cargas

a granel. A maioria das *commodities* brasileiras são movimentadas a granel e o manuseio desse tipo de carga é feita por portos públicos. Sendo assim, investimentos de infraestrutura nesse setor é uma questão de política pública. Os autores constataram que o conjunto dos portos públicos atingiu 53,7% de toda exportação do agronegócio, sendo mais eficiente o porto de Vila do Conde, no estado do Pará. Os três principais portos do Brasil são: Santos, Paranaguá e Rio Grande. Desses, apenas o porto do Rio Grande tem indicador de eficiência razoável.

Os principais pontos de escoamento da soja são os portos de Santos, no estado de São Paulo e Paranaguá, no Paraná. Tratam-se dos principais destinos da soja brasileira. Em geral, essas instalações não conseguem acompanhar o crescimento das exportações. Investimentos são cruciais para melhorar a logística do processo produtivo do grão.

O Ministério de Infraestrutura tem em mente que o agronegócio agrega valor econômico e tem consciência da dimensão produtiva da região Centro Oeste. O governo ressalta a logística como a chave para a expansão do escoamento do agronegócio. O Ministério prevê duplicação da BR 163/364/MT, concessões rodoviárias no estado: da BR-364, de Cuiabá até Vilhena em Rondônia; e do trecho de Rondonópolis até Jataí, em Goiás. Além da previsão para a melhoria logística do modo rodoviário, o governo brasileiro ainda prevê investimentos no modo ferroviário para a mesma finalidade.

No estado do Mato Grosso, soma-se ainda os investimentos no setor ferroviário. O Governo Federal prevê para o mês de setembro o início da construção da Ferrovia de Integração do Centro-Oeste, a partir de Mara Rosa (GO) até Água Boa (MT) – e com potencial de ser estendida até Lucas do Rio Verde – e trabalha para a concessão da implantação da Ferrogrão, projeto com mais de 900 quilômetros de trilhos, a partir do município de Sinop até a cidade de Itaituba (PA) ([Ministério da Infraestrutura, 2021](#), p.n)

De acordo com a [Confederação Nacional do Transporte \(2021\)](#), o modo rodoviário continua sendo o foco dos investimentos, sendo o que mais recebeu recursos nos últimos anos, 71,07% do total (R\$ 198,01 bilhões), seguido do transporte aéreo, com 12,66% do total (R\$ 35,28 bilhões). É possível perceber, pela tabela 3 a seguir, o abandono de investimentos no modo aquaviário ao longo dos últimos 20 anos, sendo que o país possui grande potencial para desenvolvimento desse tipo de modal.

Tabela 3 – Acumulado de investimentos público federal nos modais de transportes (em R\$ bilhões e porcentagem)

**INVESTIMENTOS PÚBLICOS FEDERAIS EM INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE PARA CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO, MELHORIAS E ADEQUAÇÃO, POR MODAL - ACUMULADO ENTRE 2001 E 2021\* (R\$ BILHÕES\*\* E PORCENTAGEM).**

| Modal                  | Construção   |              | Manutenção, melhoria e adequação de infraestrutura existente |              | Outros***    |             | Total geral   |
|------------------------|--------------|--------------|--|--------------|--------------|-------------|---------------|
|                        | R\$ bilhões  | %            | R\$ bilhões  | %            | R\$ bilhões  | %           | R\$ bilhões   |
| Transporte aéreo       | 1,67         | 4,7%         | 33,32  | 94,4%        | 0,29         | 0,9%        | 35,28         |
| Transporte ferroviário | 28,59        | 90,0%        | 2,60   | 8,2%         | 0,57         | 1,8%        | 31,77         |
| Transporte aquaviário  | 5,16         | 38,1%        | 8,35   | 61,5%        | 0,05         | 0,4%        | 13,56         |
| Transporte rodoviário  | 46,46        | 23,5%        | 140,99   | 71,2%        | 10,56        | 5,3%        | 198,01        |
| <b>Total geral</b>     | <b>81,89</b> | <b>29,4%</b> | <b>185,26</b>  | <b>66,5%</b> | <b>11,48</b> | <b>4,1%</b> | <b>278,63</b> |

\* Soma dos valores correntes entre 2001 e 2021. Dados parciais para 2021. Data de referência da consulta: 04/07/2021.

\*\* Valores constantes, a preços de junho de 2021. As diferenças entre a soma das parcelas e respectivos totais são provenientes do critério de arredondamento.

\*\*\*Outros referem-se a recursos destinados a ações que não podem ser classificadas como construção, manutenção, melhoria ou adequação de infraestrutura de transporte.

Fonte: Elaboração CNT, com dados do Siga-BR.

Fonte: [Confederação Nacional do Transporte \(2021\)](#)

Segundo [EPL \(2021\)](#), a falta de um planejamento orientado, proveniente de estudos mais profundos sobre a mobilidade brasileira, tem impactado nas relações comerciais do país. De acordo com [Fajardo \(2006, p.7\)](#), um sistema de transporte ineficiente acarreta problemas de custo e de desenvolvimento. Para a autora, “os problemas ocasionados pela precariedade da infraestrutura de transporte restringem as possibilidades de ganhos através do comércio”. Dessa forma, somando-se o alto custo com o transporte e a baixa qualidade do transporte. Para os exportadores tradicionais de produtos primários, o alto custo e a baixa qualidade do transporte nacional acarretam perdas substanciais para a exportação ao mercado internacional.

Sendo assim, há uma necessidade de compreensão de todo o sistema de transporte brasileiro, com vistas à aplicação de novos modelos de otimização e de simulação, além da avaliação, visão estratégica, intermodalidade e análise de eficiência na rede de transportes.

A segregação do planejamento por modo de transporte e ausência de incorporação de estudos aprofundados acerca da mobilidade das pessoas nos planos anteriormente desenvolvidos, reverbera na rede de transportes brasileira, sendo os principais impactos relacionados: a. Ao desbalanceamento da matriz e à dependência do Brasil ao transporte rodoviário; b. Aos altos custos de transporte, especialmente em comparação a outros

países, devido às grandes distâncias territoriais e às poucas alternativas de transporte; c. À criação de uma cultura de planejamento que prioriza o modo de transporte, e não as características e necessidades da demanda; d. Às dificuldades na intermodalidade para o transporte de bens e de pessoas, como falta de conexões, de terminais de transbordo etc., corroborando para a ausência de complementaridade entre os modos; e, e. Aos investimentos públicos e privados sobrepostos, conflitantes ou desconectados (EPL, 2021, p.20).

Castro (2002) traça um histórico sobre o sistema de transportes no Brasil. O autor afirma que entre 1880 a 1930 aproximadamente, a rede ferroviária recebeu incentivos e se expandiu. Naquela época, o avanço ultrapassou 32 mil quilômetros de extensão, o que já poderia ser um modal competitivo comparado ao rodoviário. Entretanto, a falta de recursos para concretizar os efeitos de escala, típicos desse modal, impedia um desenvolvimento substancial. Enquanto isso, os países concorrentes, Estados Unidos, Canadá e Rússia já avançavam em investimentos.

Em contrapartida, no Brasil, adotou-se uma política rodoviária. Castro (2002) defende que, naquele momento, a questão ferroviária já era vista como um problema. No final da década de 1930, tem-se o início da expansão do transporte rodoviário no Brasil, com a criação do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER). Da década 1950 a 1960, observam-se ligações de média e longa distâncias entre as capitais e após esse período uma extensão maior da malha rodoviária (Castro, 2002).

Com base nos dados da Conab e Secex para o ano de 2020, pode-se observar que, quanto à exportação de soja, as principais saídas são Barcarena e Santarém, que correspondem a 36% das exportações mato-grossenses. O estado do Mato Grosso é o maior produtor de soja e de milho do país. Contudo, a Conab destaca a importância da melhora da infraestrutura e da logística para o avanço da produção brasileira. O escoamento é importante tanto para o mercado interno quanto para o externo. Como o Mato Grosso localiza-se na região centro-oeste e está distante dos portos, a saída dos grãos pelos portos do Nordeste e Norte tem aliviado os custos dos produtores. Os portos do Arco Norte desempenham ainda a função também de bases de importação de insumos para a agricultura. Porém, para se colocar e se manter participante do mercado internacional, segundo o órgão, é importante que o Brasil priorize investimentos neste setor. O problema de rodovias não pavimentadas com grandes congestionamentos na temporada chuvosa não é mais um desafio. Metade da safra exportada segue para o Norte e a outra metade aproximadamente para o Sudeste e Paranaguá.

Garcia et al. (2019) afirmam que a ineficiência do sistema logístico do Brasil, no que diz respeito ao escoamento de produtos agrícolas prejudica o desempenho do setor, as altas taxas de frete afetam a vantagem competitiva do mercado global e o transporte rodoviário reforça ainda mais os problemas ambientais do país. Os autores sugerem que como alternativa a dependência do modo rodoviário, o país deveria investir na rede hídrica,

uma vez que o Brasil possui extensa rede de rios potencialmente navegáveis que podem melhorar o desempenho do setor. Enquanto o país não avança em termos logísticos, os autores ressaltam que os Estados Unidos, maior competidor do agronegócio, conta com a rota de exportação da soja pelo rio Mississípi até o Porto de New Orleans, o que mostra que o modo hidroviário já é bastante utilizado pela concorrência demonstrando certo atraso no uso dessa modalidade no Brasil.

Em contrapartida aos tropeços brasileiros quanto ao desenvolvimento dos modais de transporte, no que diz respeito à China quanto ao consumo de soja, [William et al. \(2019\)](#) afirmam que as importações cresceram de 10 milhões de toneladas em 2001 para 93 milhões em 2016/17, o equivalente a 18% ao ano. Os autores apontam que o congestionamento, tempo de espera e trânsito, assim como a sazonalidade de produção e comercialização e diferenciais de qualidade são características cruciais da concorrência, uma vez que vão afetar o valor agregado do grão. Os custos de frete ainda são elevados no Brasil, embora o desempenho tenha melhorado nos últimos dois anos, seja pelo aprimoramento do sistema logístico, seja pela expansão da capacidade e redução do tempo de espera do navio. Em suma, a melhoria logística reduziu os diferenciais de comercialização, mas ainda assim, o Brasil é muito menos competitivo na matriz de transporte de exportação de soja na região centro oeste, inclusive o estado do Mato Grosso, em relação aos EUA.

Segundo o [CNA \(2021\)](#) e de acordo com o relatório mensal *World Agricultural Supply and Demand Estimates* (WASDE), a demanda global da soja continua forte e alinhada com o crescimento da safra atual (aumento de 11,5 milhões de toneladas). Pode-se observar nas Figuras 12 e 13 a seguir, que o estado do Mato Grosso representa uma parcela significativa no número das exportações brasileiras, assim como a China ocupa posição de destaque sobre os demais países que compram a soja brasileira. Isso demonstra que a China é um dos principais clientes do Brasil no agronegócio.

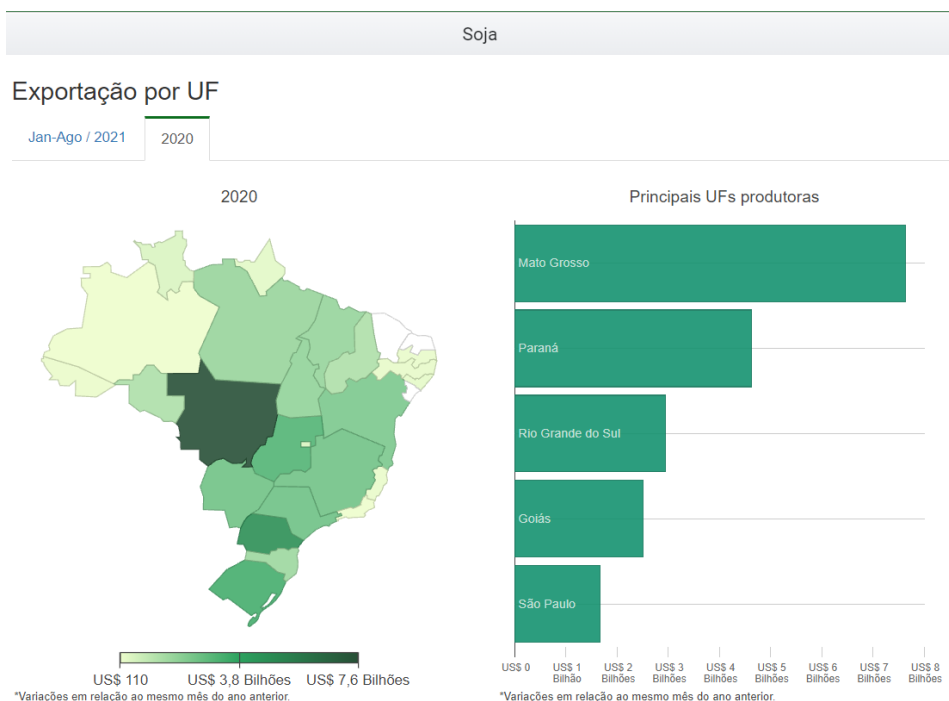


Figura 12 – Participação dos estados brasileiros na exportação da soja em 2020

Fonte: [ComexVis \(2021\)](#) e [CNA \(2021\)](#)

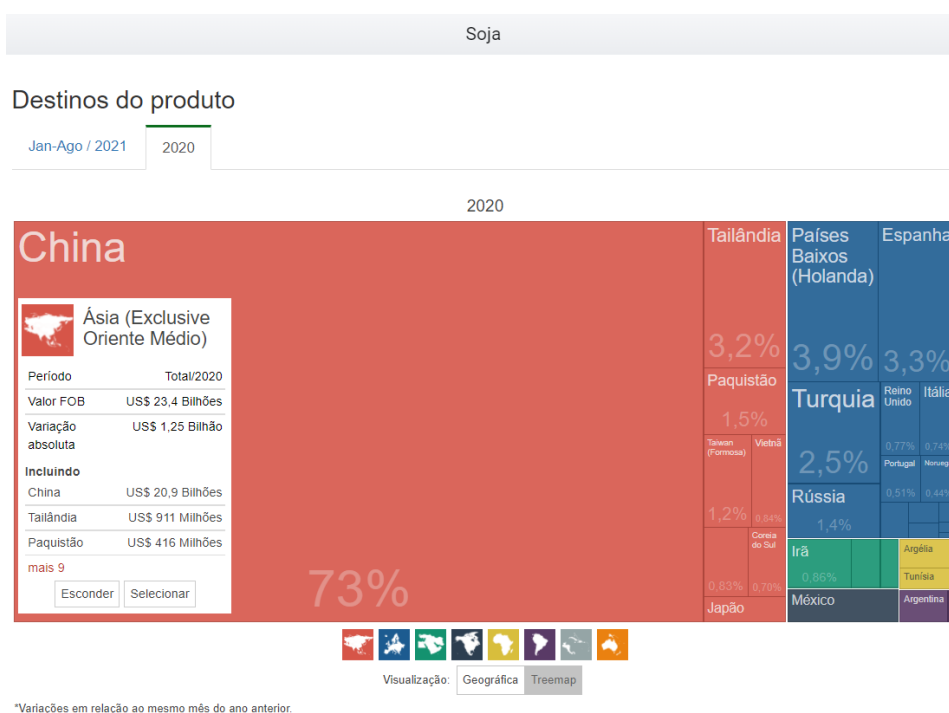


Figura 13 – Principais destinos da soja brasileira em 2020

Fonte: [ComexVis \(2021\)](#) e [CNA \(2021\)](#)

Das relações com a China, [Rosito \(2020\)](#) afirma que o Conselho Empresarial Brasil-China tem sempre insistido no olhar a longo prazo, isto é, o Brasil deve pensar a longo

prazo em estratégias que melhor atendam as relações com a China, o que equivale dizer que para tornar o Brasil mais competitivo deve-se primeiramente resolver os problemas internos: “investir em infraestrutura e capital humano, além de fortalecer e tornar mais ágil o ambiente de negócios”. A China tem se destacado com posição de influência sobre diversos setores da economia brasileira via comércio e investimentos. Além disso, tem assumido um papel ascendente no mercado internacional.

A nação chinesa não se expressa somente como comerciante e investidora, mas também, como participante ativa e engajada. “Lidar com a China envolve dinâmicas de cooperação e competição, com complementaridades e assimetrias que remetem o Brasil à necessidade de repensar seu próprio caminho de desenvolvimento” (Rosito, 2020, p.12). Na visão da autora, o Brasil também tem muito a oferecer à China. As relações comerciais entre Brasil e China indicam que a economia chinesa tem como foco de importação matérias-primas e bens intermediários e o Brasil propicia à China todos os recursos naturais e terra fértil. Por isso, o Brasil está incluído na rede de abastecimento de *commodities* (Pera et al., 2019). Em contrapartida, não apenas com a intenção de exportação, o Brasil também pode se beneficiar na relação, pois importa ou pode importar da China produtos. Portanto, pode construir canais para absorção de novas tecnologias que a China oferece. “É imperativo para o Brasil buscar estabelecer com a China uma cultura de cooperação e de acordos comerciais formais [...]” (Rosito, 2020, p.13).

Considerando o cenário Brasil, estado do Mato Grosso, Morales et al. (2013) chamam a atenção para o potencial de soja no norte do estado do Mato Grosso e destacam a necessidade de investimentos em infraestrutura de transportes a fim de que a produção deste grão possa ser escoada até os portos. Para tanto, há indícios de que a intermodalidade seja uma solução viável. “A intermodalidade é premissa para compor projetos integrados que maximizem o potencial de eficiência para a rede” (EPL, 2021). Os autores acreditam, assim como Fajardo (2006) já sinalizava, que até 2023 haja uma previsão para o deslocamento do fluxo de escoamento da soja para o norte com o uso da intermodalidade. Estima-se que o frete total para o grão escoado por Santarém (PA) seja menor, comparativamente, ao do porto de Santos (SP), que é a principal rota de escoamento de Sorriso (MT).

Morales et al. (2013) também afirmam que a BR-163 que liga o Centro-Norte ao Centro-Oeste e Sul do Brasil é uma rodovia importante para o escoamento da soja. A rodovia foi pavimentada do sul para o norte até Guarantã do Norte (MT) a 702 km de Cuiabá (MT), porém 1.152 km em direção a Santarém (PA) seguia por uma estrada não pavimentada até o ano de 2019 (Folha de São Paulo, 2020). A pavimentação dessa rodovia federal até o porto de Santarém foi muito esperada pelos produtores das regiões do médio-norte e norte de Mato Grosso. Sendo assim, uma vez totalmente pavimentada, o produtor tem maior ganho em competitividade, tendo em vista que o corredor permitirá que o valor do frete seja reduzido. A economia, nesse caso, diz respeito à exportação da



produção local, como também para quem busca insumos importados de outros países para o campo. De acordo com o relatório da [EPL \(2018\)](#), que propõe o planejamento da logística e apoio ao desenvolvimento da infraestrutura de transporte no Brasil, a BR-163 constituía-se em um dos principais gargalos brasileiros, sendo também a rota de escoamento do estado do Mato Grosso. Dessa forma, urge um programa logístico que atenda às necessidades dessa região, como visto na Figura 14.

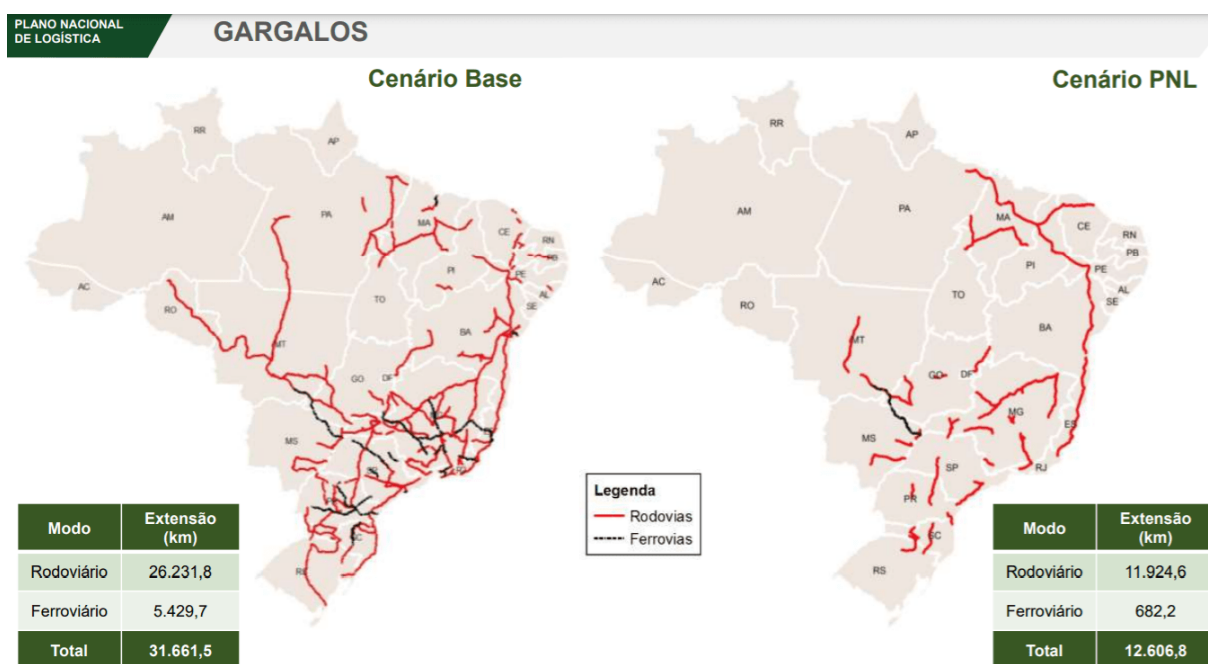


Figura 14 – PNL 2025 - Gargalos Logísticos

Fonte: [EPL \(2018\)](#)

A rede hidroviária também é uma estratégia para a região. A hidrovía Tapajós/Teles-Pires, considerada uma opção de implementação do comércio exterior, favorece o escoamento da produção agrícola de Mato Grosso, uma vez que possibilita a ligação das regiões norte e nordeste de Mato Grosso e centro-sul do Pará ([Morales et al., 2013](#)). Os autores destacam a hidrovía Tapajós/Teles-Pires. “A hidrovía Tapajós/Teles-Pires, pode se tornar um elemento fundamental na consolidação da infraestrutura de transporte para tornar o Mato Grosso e parte da região Centro-Oeste em ‘celeiros mundiais’ da produção de grãos” ([Morales et al., 2013](#), p.39).

Segundo o [DNIT \(2021\)](#), a hidrovía do Tapajós - Teles Pires, com posição geográfica estratégica, interliga grandes centros de produção agrícola ao Rio Amazonas e ao Oceano Atlântico. Possui 843 km de extensão até a confluência com os rios Teles Pires e Juruena, na divisa dos Estados do Pará, Amazonas e Mato Grosso. Em termos de localização, o trecho da hidrovía situa-se entre sua confluência com o rio Juruena e a cidade de Sorriso (MT). Para o [DNIT \(2021\)](#), trata-se de um importante corredor de transporte entre o Centro-Oeste e o Norte do País. Uma vez combinada com outros modais, o eixo Tapajós

promete potencializar o agronegócio brasileiro e a produção de grão no Norte e Centro-leste do estado do Mato Grosso e Sudoeste do Pará.

A hidrovia Tapajós – Teles Pires compreende os estados do Amazonas (AM), Rondônia (RO), Pará (PA) e Mato Grosso (MT). É capaz de suportar o transporte de carga e oferece diversas rotas para o escoamento da produção pelo Centro-sul do país e descongestionar outros modais, uma expectativa para facilitar o comércio exterior da região. O acesso à hidrovia se dá pela BR-230 – Transamazônica - e pela BR-163, a Cuiabá-Santarém.

Uma outra hidrovia importante para o futuro do escoamento da soja é a hidrovia do Tocantins-Araguaia, pois refere-se a uma das principais vias de transporte do corredor Centro-Norte do Brasil. Localizada no Cerrado, próximo a maior região produtora de grãos, essa hidrovia tem potencial para se transformar numa das vias mais importantes de água navegáveis, sendo uma via navegável até a hidrovia do Amazonas, desde Barra do Garças (MT), no rio Araguaia, ou Peixe (TO), no rio Tocantins, até o porto de Vila do Conde, próximo a Belém (PA).

A hidrovia do rio Paraná-Tietê é uma das principais vias hidroviárias em funcionamento no Brasil e que também orienta parte do escoamento da soja do Mato Grosso. Está localizada entre as regiões sudeste, centro-oeste e sul. A navegação ao longo dos rios Paraná e Tietê é viabilizada por um sistema de eclusas, que permite a passagem de embarcações pelos desníveis das represas existentes nos dois rios. A seguir, na Figura 15, observam-se os rios navegáveis no Brasil.



Figura 15 – Potencial das Hidrovias do Brasil

Fonte: Nascimento (2008)

No que concerne à ferrovia, o projeto Ferrogrão promete transformar a logística brasileira. A obra prevê 900 quilômetros de extensão para o escoamento da produção de milho, soja e farelo de soja do Centro-Oeste pelo Arco Norte do país, ligando Sinop (MT) ao porto de Miritituba (PA). Com a Ferrogrão espera-se uma economia de cerca de R\$ 20 bilhões no custo do frete em relação à rodovia. Hoje, a vazão de mais de 70% da safra de Mato Grosso depende disso.

A preocupação com a otimização logística para o escoamento de produções não é algo novo. Segundo a EPL (2021), os primeiros planos de transporte datam da primeira metade do século XIX, momento em que a interiorização não era tão expressiva, pois o transporte era basicamente pela navegação marítima. A busca por outros modais se deu, naquela época, no Brasil Império, a partir de quando as produções foram se interiorizando pelo país. “Em 1838, por exemplo, o Conselheiro José Silvestre Rebelo propõe um conjunto de três estradas reais com a clara intensão de integração nacional das cidades estabelecidas e emergentes à época” (EPL, 2021, p.13). Em 1869, a navegação fluvial já foi explorada

juntamente com as poucas ferrovias já implantadas a fim de facilitar o escoamento com uma redução de custos.

“O potencial da intermodalidade, que é uma das premissas do atual planejamento integrado de transporte, já era também explorado nos planos do século XIX” (EPL, 2021, p.16). Porém, trata-se de uma emergência ainda pouco explorada, muito pela falta de uma metodologia que abordasse não somente a otimização do processo de implementação, mas também identificasse os problemas com propostas de simulações de soluções. Além disso, as mudanças de governo, a situação econômica do país, o tempo das discussões parlamentares e a factibilidade de alguns planos contribuíram para a limitação de avanço de um plano logístico, de um modo geral.

O EPL (2021) também menciona a ausência de estudos aprofundados acerca da mobilidade de pessoas nos planos anteriormente desenvolvidos e destaca a preocupação tanto voltada para o transporte de mercadorias para exportação, quanto para o transporte de pessoas, na disseminação da mobilidade pelo interior do país.

Em termos históricos, nota-se que as rodovias ganharam adesão a partir da Proclamação da República e se mostravam como a infraestrutura que poderia ser construída com agilidade. Por esse motivo ganhou foco nas ações governamentais. Os planos logísticos eram separados por modais, não havendo uma articulação entre eles. Com efeito, perdeu-se a visão sistêmica da rede de transportes nacional e o modo rodoviário atingiu um maior desenvolvimento, dificultando o movimento de outros modais. Conseqüentemente, os gargalos foram surgindo e chamando a atenção para a necessidade de articulação com outros modais.

Para as análises de cenários futuros da rede de transportes brasileira vale observar também os empreendimentos e intervenções que ainda estão em estudo. A perspectiva futura indica uma participação do setor público e privado. Um dos destaques de cenários futuros em termos de empreendimentos é o desenvolvimento previsto do modo ferroviário. Na carteira de projetos, tem-se como principais “Investimentos previstos”, a Ferrogrão – Ferrovia de integração Centro-Oeste/FICO, a Ferrovia de Integração Oeste-Leste/FIOL, Ferrovia Norte-Sul/FNS (trecho de Ouro Verde/GO a Estrela D’Oeste/SP), além das renovações e de novas concessões de trechos. Na Figura 16 a seguir é apresentado o mapa de projetos ferroviários em todo o país. Nota-se que a Ferrogrão e a FICO são únicos projetos em discussão para o estado do Mato Grosso.

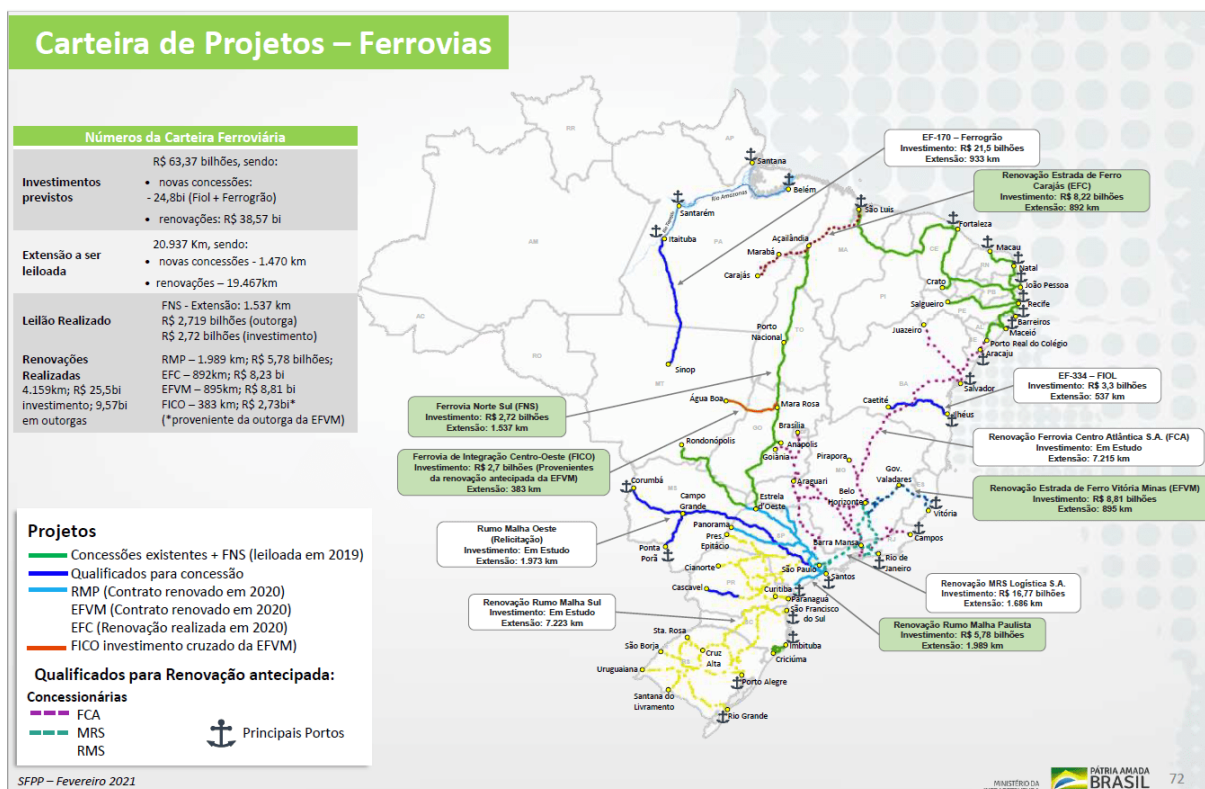


Figura 16 – Projetos Ferroviários

Fonte: Minfra (2021)

Quando se comparam os modais no quesito quantidade transportada, isto é, uma equivalência para se transportar uma mesma quantidade de insumos por diferentes modais, observa-se que o modo hidroviário, conforme indicado na Figura 17, é mais viável. Para transportar uma mesma quantidade de 6.000 toneladas, são necessários 86 vagões no modo ferroviário e 172 carretas, no modo rodoviário, enquanto que, no modo hidroviário, conseguiria realizar o mesmo transporte com apenas uma embarcação (4 chatas e empurrador). Com efeito, nota-se uma forte economia em termos quantitativos de unidades de transportes. No entanto, é sabido que o modo rodoviário é ainda o mais utilizado. Nesse caso, tem-se uma inversão que merece ser melhor analisada.

## Comparação entre modais

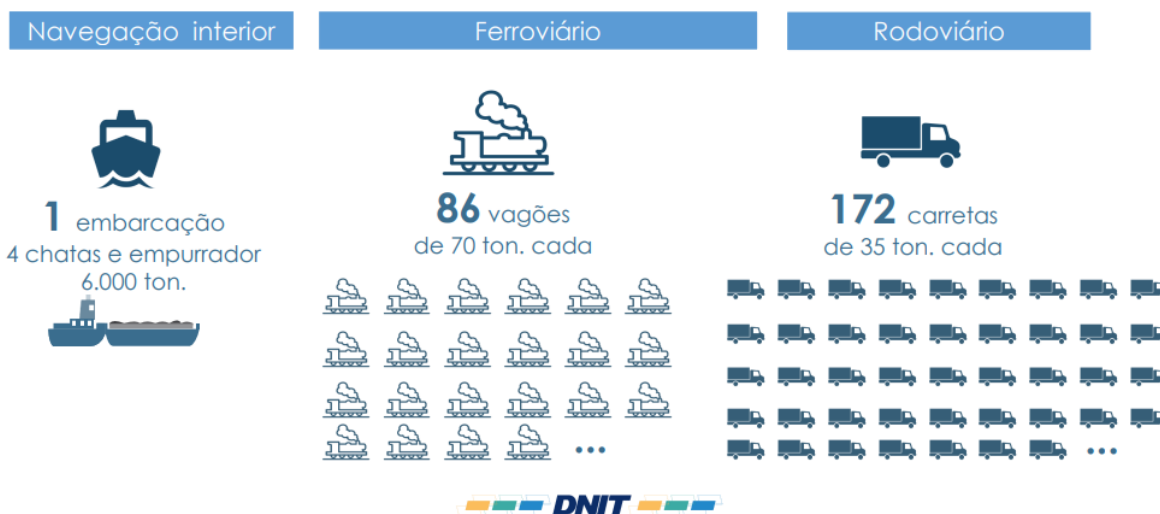


Figura 17 – Comparativo entre modais de transporte

Fonte: Lemos (2020) - DNIT, a partir de Confederação Nacional do Transporte (2019)

Quando se comparam os custos com combustível, nota-se também que o modo hidroviário costuma ser o mais econômico. Segundo Lemos (2020), como consome menos combustível para transportar a mesma quantidade de carga, emite menos CO<sub>2</sub>, sendo, portanto, mais sustentável em termos ambientais. A sustentabilidade econômica é também perceptível. Afinal, o custo para se construir uma infraestrutura do modo hidroviário costuma ser menor que os modos rodoviário e ferroviário, respectivamente. Nesse sentido, o modo ferroviário acaba sendo o mais caro, tendo em vista os recursos necessários para a sua implantação e operacionalização. A Figura 18 ilustra a comparação entre os modais.

## Comparação entre modais



Figura 18 – Comparativo de custos entre modais de transporte

Fonte: Lemos (2020) - DNIT, a partir de Confederação Nacional do Transporte (2019)

Entretanto, conforme apontado por Lemos (2020) e visualizado na Figura 19, o Brasil ainda não possui hidrovias, apenas rios naturalmente navegáveis, o que sugere a necessidade de investimentos para esse modal. Dessa forma, o país possui uma potencialidade natural para o desenvolvimento do transporte hidroviário, tendo em vista a capacidade de navegação e a extensão de seus rios.



Figura 19 – Potencial do transporte hidroviário brasileiro

Fonte: Lemos (2020) - DNIT, a partir de Confederação Nacional do Transporte (2019)

Martins (2012) destaca a importância da cabotagem, transporte realizado entre

dois portos de um mesmo país ou ainda entre um porto costeiro e um fluvial, como uma possibilidade de melhoria dos gargalos logísticos do Brasil. Embora o autor defenda que esse tipo de transporte é subutilizado, a cabotagem pode ser vista como uma estratégia para o recurso multimodal. Por ser econômico e menos poluidor, o transporte por cabotagem entra para o rol dos modais estratégicos para compor a matriz de transportes do país.

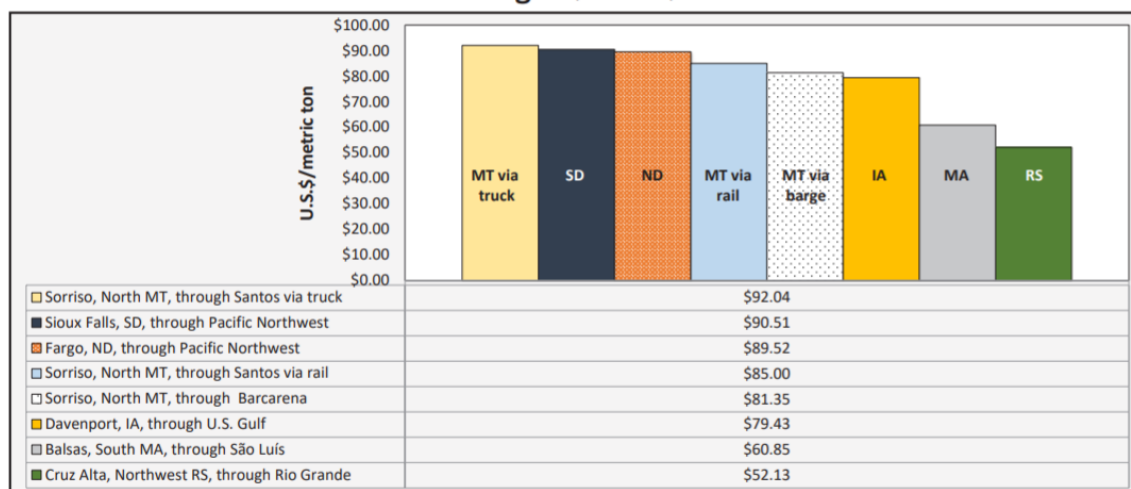
Pera et al. (2019) afirmam que a China mantém uma parceria comercial com o Brasil em contraposição à relação com os EUA. Por isso, os autores chamam a atenção que esse seja um momento oportuno para ampliar o comércio internacional brasileiro, sobretudo para atender à demanda chinesa por soja, que tem se elevado nos últimos anos. Além disso, ressaltam que os padrões ambientais da indústria chinesa estão entre os mais rigorosos do mundo. Nesse contexto, torna-se estratégico para o Brasil adoção de um sistema de transporte mais sustentável, denominado pelos autores, de corredor verde. Na concepção dos autores e em sintonia com Panagakos (2016) e Bektaş et al. (2018), corredores verdes são corredores de transporte com características econômicas, logísticas e ambientais plenamente viáveis. Para Panagakos (2016), os corredores verdes aumentam a competitividade entre os modais mais ecológicos, por exemplo, ferrovias e hidrovias em contraposição ao modo rodoviário.

Seleme et al. (2017) destacam a importância de investimentos para os modos ferroviário e hidroviário no sistema logístico brasileiro pela alta capacidade de transporte do grão e pelo fato de serem ambientalmente melhores em razão de serem menos poluentes. No entanto, é preciso considerar também, que cada modal tem suas particularidades, que o faz mais atrativo que outro com relação à distância percorrida.

Na Figura 20 a seguir, pode-se observar o comparativo entre os custos para se transportar a soja americana e brasileira. Os dados mostram que os EUA possuem o menor custo de transporte independentemente do tipo de modal utilizado para transportar a soja dos pontos de produção até os portos, o que evidencia a substancial desvantagem do Brasil no preço de custo da soja exportada para a China.



### Transportation cost differences between selected Brazil-United States Routes to Shanghai, China, 2020



Note: MT = Mato Grosso, MA = Maranhão, RS= Rio Grande do Sul, SD = South Dakota, IA = Iowa, and ND= North Dakota.

Source: USDA, Agricultural Marketing Service.

Figura 20 – Diferença entre os custos de transportes Brasil - Estados Unidos para a China

Fonte: USDA, elaborado por Salin (2021)

Desse modo, um dos maiores desafios do Brasil é superar essa desvantagem, tendo em vista a existência de problemas de infraestrutura que impedem uma melhora nesse patamar. Enquanto o Brasil, de um lado, mantém dependência do modo rodoviário, por outro lado, os EUA possuem uma malha ferroviária bem estruturada. Durante 2020, a soja embarcada por caminhão de Sorriso, no norte do Mato Grosso, para Xangai, na China, custou cerca de US\$ 1,50 - US\$ 13,00 a mais por tonelada métrica do que os embarques dos EUA para Xangai. No entanto, a vantagem de custo diminuiu para US\$ 6 por tonelada métrica quando a soja do Norte de Mato Grosso foi embarcada por trem para Santos e diminuiu ainda mais para US\$ 2 por tonelada métrica quando embarcado por barcaça para Barcarena, conforme relatório da USDA elaborado por Salin (2021, p.12). Além disso, o mesmo relatório afirma que as tarifas ferroviárias podem ser até 30% mais baixas do que tarifas de caminhões, o que confirmam as análises de Caneppele et al. (2019), quanto à necessidade do Brasil investir em infraestrutura para ganhar competitividade de mercado.

Em 2020, no estado do Mato Grosso, as tarifas de caminhão aumentaram enquanto as tarifas para o porto fluvial diminuíram. Sabe-se que ausência de terminais localizados próximo aos locais de produção, juntamente, com uma prevalência de um único modal em contraposição à multimodalidade resulta num dos maiores problemas do sistema logístico brasileiro (Santos et al., 2018; Monteiro et al., 2021; Pera et al., 2021). Para solucionar a questão, os recursos em planejamento do setor de transporte são a peça-chave para uma melhoria no sistema logístico. O Plano Nacional de Logística – PNL investe recursos a fim de administrar o fluxo logístico por meio de informações de georreferenciamento. Para

Guimarães (2019), o PNL pode ser considerado como um plano governamental de impacto para o planejamento logístico no Brasil.

Em números comparativos, a Figura 21 mostra a diferença dos custos de transporte de soja entre os estados de maior produção de IOWA/EUA e Mato Grosso/BR até os portos, com destino à China.

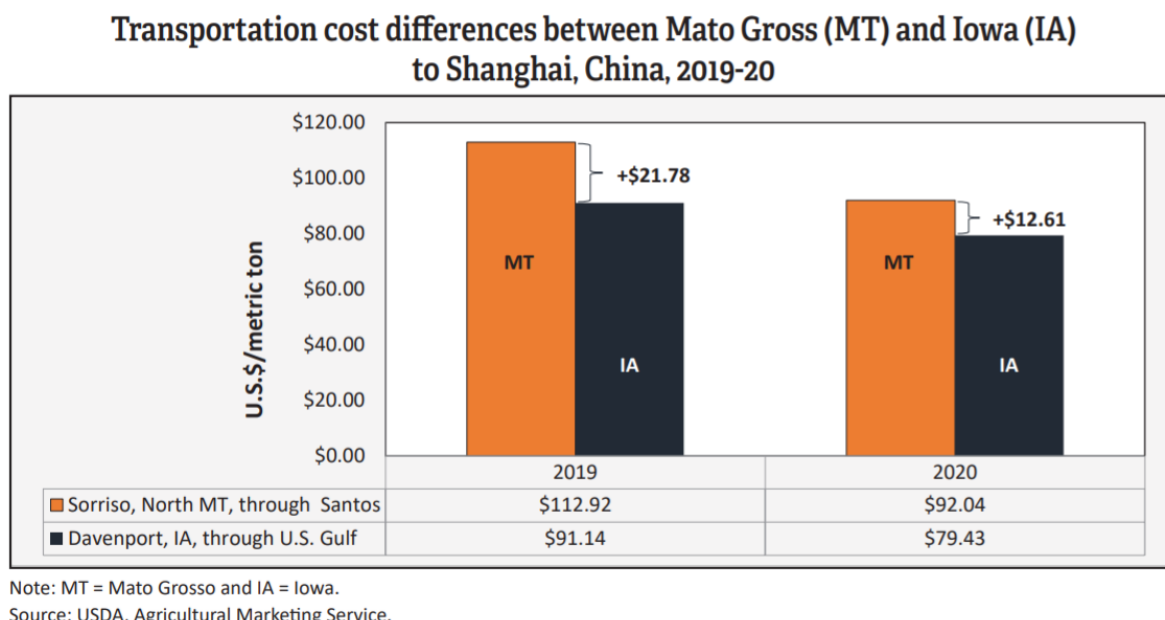


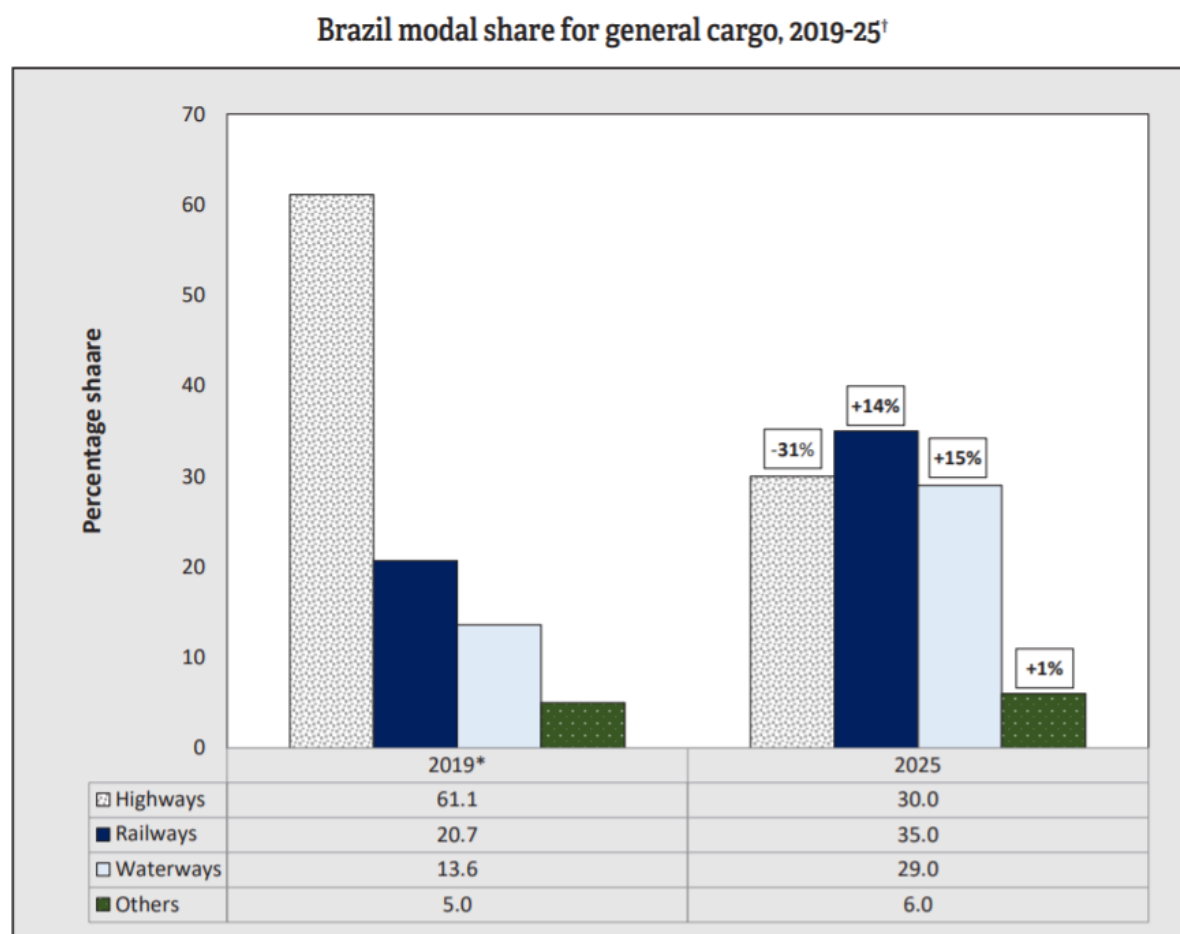
Figura 21 – Diferença entre os custos de transportes do Mato Grosso (BR) - Iowa (EUA) para a China

Fonte: USDA, elaborado por Salin (2021)

De acordo com Salin (2021), espera-se que o governo brasileiro modifique sua matriz de transporte, tipicamente rodoviária, em 2019, para um sistema intermodal integrado, previsto para 2025, sobretudo para exportações, conforme pode-se observar na Figura 22, a seguir. Vale lembrar que há outros problemas que norteiam o sistema logístico brasileiro que precisam ser resolvidos por meio de investimentos para projetos que resolvam: estado de conservação das estradas, hidrovias mal projetadas além de problemas com o sistema de pesagem (Monteiro et al., 2021). Trata-se, pois, de uma necessidade emergente pelo fato de o centro-oeste estar localizado geograficamente distante dos portos, o que dificulta o escoamento. Pera et al. (2021) confirmam que, como grande parte das lavouras encontra-se a longas distâncias dos terminais, o modo rodoviário mantém-se como o modal principal, embora Rodrigue et al. (2020) sustente a ideia de que esse tipo de modal seja vantajoso para pequenas distâncias.

Rodrigue et al. (2020) apontam que cada modal, no entanto, apresenta vantagens de acordo com a distância percorrida. Segundo os autores, o modo rodoviário é considerado vantajoso quando se trata de uma distância de até 700km. Acima de 700Km, o modo ferroviário é indicado. Para longas distâncias, entre 1000-1500km, o modo hidroviário

se apresenta competitivo, considerando todas as variáveis até aqui apresentadas como: combustível, tempo de deslocamento e fatores ambientais.



†Government plans.

\*Because of rounding, 2019 shares do not sum exactly to 100.

Source: Brazil Ministry of Transportation, National Plan of Logistic & Transportation (PNLT) and Confederação Nacional do Transporte (CNT) 2019.

Figura 22 – Percentual de participação dos tipos de modais do Brasil para o transporte de cargas

Fonte: USDA, elaborado por [Salin \(2021\)](#)

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais estudos, presentes na literatura, que norteiam o tema desta pesquisa. São discutidos assuntos que tratam desde rotas de escoamento da soja do Mato Grosso e no Brasil à modelos de otimização aplicados nestes tipos de problemas (modelagem de sistemas). Além disso, são apresentados trabalhos com tema de logística que utilizam redes de Petri e outros com aplicação de técnicas tradicionais de simulação. Ao final, na Seção 3.3, o presente estudo é posicionado em relação aos demais.

#### 3.1 Estudos Sobre Rotas da Soja no Estado do Mato Grosso e Brasil

Nesta seção, apresentar-se-ão os principais trabalhos que tratam das rotas da soja no Mato Grosso e no Brasil. Alguns autores já investigaram formas de estruturar e otimizar o fluxo da soja produzida no estado do Mato Grosso e no Brasil para os portos do Brasil. Esses estudos serão divididos em duas principais categorias: caracterização detalhada da rede de transporte e suas deficiências e os de propostas de modelos de otimização para o sistema.

Nas abordagens de caracterização, os autores buscam obter dados do sistema e apontar os detalhes da logística do transporte da soja com o objetivo de explicitar algum aspecto desse sistema logístico.

Como exemplo, [Pasin \(2007\)](#) trata da evolução histórica da logística da exportação do grão de soja no Mato Grosso para os anos de 1996 a 2006. O autor analisa os dados sobre as exportações de soja do Mato Grosso e as principais rotas de escoamento. Traz também contribuições quanto às mudanças que os investimentos em logística geraram na organização do território de Mato Grosso e nos aspectos sociais do estado nos últimos dez anos.

[Pontes et al. \(2009\)](#) caracterizam os problemas logísticos da exportação brasileira de uma das mais importantes *commodities* nacional, a soja em grão. Os autores realizaram uma ampla pesquisa bibliográfica com levantamento detalhado dos principais problemas, causas, custos e soluções para o escoamento da soja em grão brasileira para exportação. A partir do estudo, percebe-se que os desafios da logística da soja são diversos. Caso seja possível alcançar a resolução dos problemas apontados, o Brasil aumentará sua competitividade internacional, com a confiabilidade nos tempos de entrega e a redução dos custos das ineficiências no processo de exportação.

[Prudêncio da Silva Jr et al. \(2010\)](#) identificam que a produção de soja e sua

cadeia de abastecimento são altamente dependentes de insumos como terra, fertilizantes, combustível, máquinas, pesticidas e eletricidade. Para avaliar esses impactos caracterizaram-se duas cadeias representativas de fornecimento de soja para a Europa: Centro-Oeste e Sul do Brasil. Cada cadeia de suprimentos é analisada usando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida. Como o transporte contribui fortemente para os impactos ambientais, um estudo detalhado é realizado para identificar as rotas usadas para transportar a soja até os portos marítimos. Os resultados gerais mostram que os impactos são maiores para Centro-Oeste do que para Sul para todas as categorias de impacto estudadas.

Kussano e Batalha (2012) propõem e aplicam um modelo de cálculo de custo logístico para a soja em grão produzida no Mato Grosso e exportada pelo porto de Santos. O modelo contempla, além das variáveis de custos, variáveis ligadas à tributação. O estudo demonstra que nem sempre é vantajoso para o produtor de soja do Mato Grosso escoar sua produção por alternativas intermodais. Algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas ao final.

Schalch (2016) traz uma investigação sobre os principais gargalos que prejudicam o escoamento da soja no Mato Grosso. O trabalho baseia-se em pesquisa exploratória qualitativa através de estudo de caso por meio de entrevistas semiestruturadas. Como resultado são apontadas evidências de que a rota hidroviária de Miritituba a Barcarena no Pará consiste em uma importante alternativa para se contornar os problemas logísticos do estado.

Lopes e Lima (2017) contribuem com um estudo de rotas alternativas para o transporte da soja brasileira destinada à exportação a partir da hidrovia dos Rios Tocantins-Araguaia. Para isso, eles consideram as 13 cidades de maior produção no Mato Grosso. O cenário de investigação foi comparado ao de outros pesquisadores do assunto em termos de custo de transporte, no intuito de se verificar a viabilidade da hidrovia em relação a outras alternativas. Os autores apontam que a utilização da hidrovia Tocantins-Araguaia é viável para o transporte de soja com possível impacto na redução dos custos.

Caixeta-Filho e Pera (2018) apontam que as vantagens competitivas e ganhos produtivos do Brasil tendem a se perder à medida que seus produtos agrícolas passam pelas diversas fases da pós-colheita, principalmente por gargalos e deficiências logísticas. A pesquisa proposta pelos autores tem como objetivo adaptar indicadores e estratégias de mitigação derivados de pesquisas nos EUA para reduzir as perdas pós-colheita, principalmente no transporte de grãos, e disponibilizar essas informações no Brasil.

Souza e Uchôa (2019) levantam dados comparativos dentro do custo logístico nos modos hidroviário e ferroviário para verificar a possibilidade de uma ferrovia conectando as cidades de Manaus e Porto Velho, no Norte do Brasil. Nesse contexto, é descrita uma rápida exposição acerca do desenvolvimento dos principais modais no país, a fim de contextualizar a construção histórica e condição atual de cada um, principalmente na região Norte. O

método de estudo de caso trata a via Manaus-Porto Velho. Como resultado, o número de movimentação de carga justifica a construção de uma ferrovia na localidade, apesar de ser necessária a realização de estudos mais técnicos acerca dos impactos socioambientais produzidos com a construção da ferrovia.

Bender e Silva (2020) propõem um estudo de rotas para a exportação de grãos a partir dos portos do Arco Norte através da hidrovia Tapajós-Teles Pires e a ferrovia EF-170 (Ferrogrão). Além disso, determinam a quantidade de berços necessários para o correto funcionamento do porto de Santarém pela tendência de um aumento em sua demanda. Os autores concluem que a escolha das rotas hidroviárias e ferroviárias são boas opções do ponto de vista ambiental e econômico.

Barreto e Ribeiro (2020) fazem uma análise do panorama dos modos rodoviários e ferroviários no cenário nacional. É apresentado um panorama dos modais de transporte no Brasil, comparando as vantagens e desvantagens dos principais tipos em atividade no país: o rodoviário e o ferroviário. Para isso, os autores fazem uso da revisão bibliográfica, que fornece importantes caminhos para o entendimento dos conceitos ligados à logística e aos modais de transporte, e posteriormente, demonstram vantagens e desvantagens de cada modalidade.

Estes trabalhos têm sua relevância no sentido de propiciar o entendimento do sistema de escoamento da soja no estado e no Brasil. Embora não haja uma proposta de melhoria, por parte desses estudos, na rede de transportes, eles podem ser utilizados como base de aproveitamento de dados para a elaboração de modelos de otimização e/ou outros estudos de simulação. Outros tipos de estudos dizem respeito à modelagem e melhoria do sistema. Nestes casos, além de proporem modelos para o sistema logístico, buscam opções para melhoria do escoamento do grão, geralmente utilizando técnicas de otimização. Nessa categoria, tem-se os trabalhos a seguir.

Oliveira e Yamakami (2006) analisam a distribuição logística da soja brasileira aplicando modelo de equilíbrio espacial de programação quadrática. Como a maior parte dos custos da soja exportada é dada pelos custos de transporte, este é um ponto de destaque na cadeia produtiva e de seu estudo. Com a aplicação de um modelo de equilíbrio espacial de programação quadrática, podem-se projetar novos cenários alterando-se os custos de transporte dos diferentes modais, de forma a conduzir políticas para novos investimentos no setor de transportes.

Silva e Marujo (2012) avaliam rotas de exportação a partir da cidade de Sorriso (MT) e assumem como premissa a integração com outro modal de transporte. Os autores desenvolvem um modelo matemático intermodal de minimização do custo de transporte origem-destino e a solução é obtida utilizando o software de otimização GUSEK, que trabalha com modelos de Programação Linear ou Programação Linear Inteira Mista. Como conclusão, apontam que a concentração do escoamento da soja deveria ser nos modos

ferroviários e hidroviários, por serem mais indicados para o deslocamento de longa distância de cargas com grande volume.

Costa (2013) faz uma caracterização do transporte de soja no Brasil e utiliza um modelo espacial para encontrar o caminho de menor custo. Utiliza-se um instrumento para investigação de trajetórias de paisagens e dinâmica de fenômenos espaciais denominada Dinâmica EGO (ambiente para objetos de geoprocessamento), que leva em conta dados geográficos para fazer cálculos de custo. Os resultados sugerem que os investimentos previstos no PNL influenciam positivamente, reduzindo o custo final do transporte da soja com destino aos portos para embarque. Porém, o estudo destaca que os investimentos devem ser efetivados em modos de transporte mais adequados para as necessidades das regiões produtoras.

Silva e D'Agosto (2013) propõem um modelo para estimar a matriz origem-destino (O-D) para o fluxo de exportação da soja brasileira com base em um modelo de gravidade restrita. O desempenho do modelo é melhorado com o estabelecimento de um critério de ajuste para os dados, que aumentou o coeficiente de determinação através da combinação com técnicas de otimização multi-objetivo para garantir um equilíbrio da matriz O-D. O modelo é de fácil aplicação e pode auxiliar no planejamento estratégico de transporte para exportação de produtos de soja do Brasil.

Almeida et al. (2013) relatam que o agronegócio se tornou importante na pauta exportadora e que o Brasil tem enfrentado problemas com altos custos de transporte terrestre e invalidez de seus portos, principalmente Santos, Paranaguá, Vitória e Rio Grande. Assim, a soja brasileira não é competitiva quando comparada aos seus dois principais concorrentes: Argentina e Estados Unidos. Diante dessa situação, eles apresentam a alternativa logística para a exportação do grão com a utilização de portos no Oceano Pacífico e utilização da rodovia Transoceânica. Os autores ainda simulam cenários e fazem análises sobre as necessidades de melhorias logísticas para aumentar a competitividade da soja brasileira.

Morales et al. (2013) propõem uma configuração ótima para uma futura rede de oferta de transporte prevista pelo Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT). O estudo trata especificamente do escoamento da produção de soja do norte do estado do Mato Grosso para o porto de Santarém. A criação do modelo de fluxo a custo mínimo se deu a partir da previsão da demanda em quatro etapas, a saber: 1- Caracterização das rotas para o escoamento da soja; 2- Infraestrutura de transporte a ser considerada; 3- quantidade de soja destinada à exportação; 4- dimensionamento do fluxo da soja na rede. Como limitação dos estudos, os autores relatam não terem considerados os tempos de transbordo e que os custos de transbordo necessitam de um melhor detalhamento.

Reis e Leal (2015) propõem um modelo matemático determinístico para auxiliar as decisões temporais e espaciais da cadeia da soja. A modelagem é proposta como uma

ferramenta de auxílio na tomada de decisão de *traders*, que atuam neste mercado de negociação de alta complexidade. São incorporados os principais componentes espaciais e temporais do complexo da soja, incluindo decisões sobre o modo de transporte. O modelo é testado usando dados de negociações do mercado da soja no Brasil em 2012, alcançando consistentes resultados.

Em Almeida et al. (2016), observa-se a aplicação de um modelo matemático de programação linear para auxiliar nas decisões de fluxo de soja e localização de terminais intermodais. A partir de uma base de dados secundários e considerando os principais estados produtores e movimentadores da soja, eles propuseram três redes de escoamento, com diferentes áreas de abrangência. Nelas, há a possibilidade de utilização de ferrovias ainda em construção ou em projeto. Os resultados dos experimentos computacionais apontam fluxos de escoamento e localização de terminais condizentes com a realidade. Além disso, outros cenários da rede também foram investigados, demonstrando a capacidade de análise da ferramenta de otimização desenvolvida.

Rocha e Filho (2018) analisam o impacto econômico gerado a partir da implantação da ferrovia EF-170 (Ferrogrão) como opção para o transporte de soja e milho. Os autores elaboram um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista com o objetivo de avaliar a minimização dos custos de transportes na presença da ferrovia. Eles estimam que a Ferrogrão propiciaria uma redução superior a R\$ 38,00 por tonelada de grão transportado. Os resultados apontam a necessidade de se melhorar a capacidade de exportação dos portos da região Norte do país, para suprir a demanda direcionada por essa ferrovia.

Guimarães (2019) propõe uma modelagem matemática para localização-alocação de centros de integração logística (CILs) em que considera critérios econômicos e ambientais. Através da técnica de soma ponderada, a autora trata o problema de minimização dos custos logísticos na exportação da soja, farelo de soja, milho e açúcar. Como resultado, afirma que o modelo desenvolvido é útil como ferramenta de apoio ao planejamento estratégico governamental, pois tem a capacidade de indicar os locais ideais para implantação de CILs mitigando custos logísticos e de emissão de CO<sub>2</sub> no processo decisório.

Faretto e Oliveira (2019) desenvolvem um sistema de avaliação de desempenho (DEA) capaz de medir a eficiência das rotas logísticas para exportação da soja brasileira com base nos aspectos econômico, social e ambiental. Os resultados mostram fatores positivos da utilização da intermodalidade no escoamento da produção através da conexão de regiões produtoras aos portos tradicionais de exportação. Além disso, novas rotas se destacam com destino aos portos do Arco Norte, como São Luís-MA e Santarém-PA, porém demandam investimentos logísticos capazes de promover a integração dos modos ferroviário e hidroviário aos terminais de transbordo e, a partir daí, para os portos de exportação.

Oliveira et al. (2020a) desenvolvem um modelo de minimização dos custos de



transporte utilizando programação linear sob a forma de uma matriz origem-destino para avaliar se a utilização da Ferrovia Norte-Sul apresenta potencial como uma rota intermodal alternativa para a exportação da soja da região do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). O estudo contribui com estímulo à viabilidade de novos portos localizados na região Nordeste do país, uma vez que pode ajudar a reduzir a sobrecarga do Porto de Santos (SP). Os resultados mostram que o transporte intermodal rodoferroviário e rodohidroviário promovem uma redução de 30% nos custos relacionados ao transporte.

Lopes et al. (2020) apresentam um estudo baseado em Simulação a Eventos Discretos (SED) que analisa a logística de exportação da soja brasileira das regiões produtoras aos principais clientes internacionais. A modelagem conceitual é pelo método IDEF-SIM (Integrated Definition Methods - Simulation). A análise experimental, através do software Promodel, é por meio da construção de cenários com características específicas que verificam os comportamentos do sistema por meio de mudanças nos parâmetros. Os resultados indicam a necessidade de uma gestão integrada entre os agentes do sistema e o desenvolvimento de uma infraestrutura interna de transporte, especialmente ferrovias e hidroviárias, para aumentar a competitividade da soja brasileira no mercado internacional.

### 3.2 Estudos de Problemas de Logística com o Uso de Redes de Petri

Nesta seção, são apresentados os principais trabalhos que utilizam rede de Petri para a simulação de um SED. Embora estudos com RdP que tratam especificamente o problema do escoamento de soja no Mato Grosso sejam raros ou inexistentes, o uso desse método na logística, em problemas de natureza operacional, é relativamente comum. A seguir, mostrar-se-ão resumidamente estes estudos.

Castelain e Mesghouni (2002) apresentam um modelo de um sistema de transporte público multimodal usando uma rede de Petri de alto nível. A proposta leva em consideração, tanto os meios de transporte (ônibus, bonde, metrô, trem regional) quanto os passageiros. O modelo é composto por 109 lugares e 111 transições e é tratado com o software RENEW. Os resultados permitem analisar o impacto das decisões de regulação sobre os fluxos de passageiros.

Bouyekhf et al. (2003) apresentam um estudo sobre modelagem e simulação de linhas de transporte público e a conexão entre elas. Os autores tratam de duas fases importantes desse sistema: o cálculo das frequências das linhas centrais e dos tempos de partida. Para fornecer conexões da rede de transporte mais confiáveis e a um custo razoável, utilizam redes de Petri estocásticas generalizadas. Como conclusão, mostram que a modelagem em rede de Petri é uma técnica para estudar o desempenho dos sistemas de transporte público (tempo de espera dos passageiros), ao compararem os resultados obtidos com tratamentos determinísticos. Para finalizar, um aplicativo para sistema de

transporte público de dimensão real é fornecido para ilustrar os resultados.

Di Febraro e Sacco (2004) mostram uma classe de redes de Petri híbridas que fornecem um valioso modelo para tratamento de interseções em redes urbanas sinalizadas. O comportamento do fluxo de veículos é representado por meio de um modelo baseado no tempo e a dinâmica do funcionamento do semáforo é representada por um modelo baseado em eventos. A proposta é validada utilizando dados de tráfego real da cidade de Torino, na Itália. Também são discutidos alguns resultados experimentais relevantes e aplicações do modelo direcionado a controle.

Prata et al. (2005) modelam a movimentação de contêineres de cargas agroindustriais em terminais portuários, com foco em caracterizar a operação do sistema e dimensionar as frotas de equipamentos de movimentação e transporte de contêineres. No estudo, é empregado rede de Petri para representar a operação portuária. Utilizam-se tempos fixos, ou seja, o sistema não é tratado na forma estocástica. Porém, os autores indicam que a modificação para o tratamento estocástico é trivial. Os resultados demonstram o potencial da modelagem como forma de contribuir para a tomada de decisão nos ganhos de produtividade de instalações portuárias.

Dotoli et al. (2015) apresentam uma estrutura de modelagem de terminais intermodais de transporte de carga. O modelo permite simular e avaliar o desempenho desses elementos da cadeia de transporte intermodal, podendo ser utilizado por um tomador de decisão para identificar os gargalos, bem como para testar diferentes soluções para a melhoria da dinâmica de funcionamento. A estrutura de modelagem proposta é modular e baseada em Redes de Petri cronometradas. O estudo divide a rede em subsistemas (rodovias, ferrovias, hidrovias, entre outras) e propõe um modelo diferente para cada um desses subsistemas. A rede completa é formada a partir da interconexão desses vários subsistemas. Sua eficácia é testada em um exemplo da literatura e, em seguida, em um estudo no terminal ferroviário interno de uma importante empresa de logística intermodal na Itália. O sistema se mostra eficiente e de fácil aplicação.

Ribeiro (2015) desenvolve dois modelos em rede de Petri para simular o funcionamento de uma mina a céu aberto com abordagens e complexidades diferentes. O autor observa que 60% da produtividade da mina corresponde a operações de carga e descarga e que 40% está relacionado a paradas operacionais e para manutenção. Uma comparação em termos de desempenho computacional é elaborada com o SIMAN (Arena) e o modelo em rede de Petri para tratar os casos. O resultado mostra um desempenho três vezes mais rápido com o uso das rede de Petri. Além disso, as redes apresentam baixas medidas de erro, sendo abaixo de 4% em comparação a um modelo de referência e também baixo de 3% para os processos envolvendo manutenção.

Cavone et al. (2017a) apresentam um procedimento para planejamento e gerenciamento de recursos em terminais intermodais em que integram redes de Petri temporizada e

análise por envoltória de dados (DEA). A aplicação das duas técnicas é feita em três etapas, a saber: modelagem do comportamento do terminal em condições normais utilizando-se rede de Petri; estimativas de um aumento de cargas no terminal para avaliar se a configuração atual do terminal suportaria esse aumento; caso o terminal não suporte o aumento, a análise por envoltória de dados (DEA) fornece uma solução alternativa de planejamento. O procedimento fornece ao tomador de decisão números de capacidade e cronograma de recursos para lidar com o aumento dos fluxos. O resultado mostra que a integração das duas técnicas permite a tomada de decisões de planejamento sob requisitos conflitantes.

Cavone et al. (2017b) apresentam uma revisão sobre aplicações de rede de Petri em problemas logísticos, com abordagens de otimização, simulação, análise e controle. Na resolução de problemas que envolvem decisão de transportes, as redes de Petri apresentam boa eficácia e performance. No decorrer do texto, ao se tratar do tema transporte hidroviário, a maioria dos trabalhos remete ao tratamento da operação em terminais portuários. Quando o assunto é sobre transporte ferroviário, os trabalhos são direcionados ao controle de operação das ferrovias e colisão de trens. Nessa revisão, não se destacam as aplicações de rede de Petri em problemas estratégicos de alocação de terminais de transbordo e fluxo logístico.

Araújo (2018) desenvolve uma ferramenta de análise de desempenho e otimização para linhas de transporte público que atendem algumas áreas da cidade de Recife. O estudo avalia a linha em relação aos principais aspectos de qualidade, do ponto de vista dos usuários: confiabilidade do serviço, conforto e tempo de viagem. Um modelo de simulação em redes de Petri estocásticas generalizadas, através do software timeNET, é aplicado à linha BRT 1976 - Pelópidas, que atende ao principal centro atrator de viagem da Região Metropolitana do Recife. O resultado demonstra que a rede é efetivamente capaz de representar o comportamento do sistema, com elevado poder de explicação.

Lisboa et al. (2019) abordam uma metodologia robusta de modelagem e simulação por meio de redes de Petri estocásticas, incluindo análises que permitem aos desenvolvedores simularem os processos envolvidos na produção de minério. O estudo utiliza uma pesquisa experimental baseada em dados reais de uma operação de mina a céu aberto no Brasil. Os resultados do experimento fornecem uma estrutura de simulação válida para o processo de mineração a céu aberto usando redes de Petri.

Simão (2020) trata sobre problema de transporte direcionado à modelagem e simulação de um fluxo ferroviário na ferrovia Norte Sul. A investigação é delineada no transporte de grãos e celulose. O autor faz uso de uma rede de Petri colorida e T-temporizada, na qual os tempos estão atrelados ao controle das transições. Para isso, desenvolveram-se dois diferentes modelos que caracterizam os processos ferroviários: um modelo básico e um estendido. Por fim, a abordagem se mostra eficiente ao analisar o desempenho da ferrovia

e também importante, no sentido de apoiar decisões de planejamento de longo prazo.

Oliveira (2021) aborda uma metodologia que permite determinar a localização otimizada para a implantação de terminais de transbordo no estado do Mato Grosso a partir de técnicas de otimização e, em continuidade, avalia cenários mais viáveis numa dimensão econômica através de simulação. Para isso, um modelo de otimização é desenvolvido para encontrar o tamanho ideal e os melhores locais para a instalação dos terminais de transbordo. Além disso, desenvolveu-se um simulador de rede de Petri P-temporizada para validar os valores obtidos pela otimização. Os resultados mostram a importância da simulação dos cenários como uma ferramenta para verificar e aperfeiçoar as soluções propostas pela otimização.

Esses estudos aproveitam uma característica fundamental das redes de Petri. Segundo Cassandras e Lafortune (2008), as RdP podem ser modularizadas e decompostas em partes menores e mais fáceis de modelar, que são conectadas entre si. Essa propriedade é uma vantagem que as redes de Petri possuem em relação a outros modelos para tratamento de eventos discretos.

### 3.3 A Localização deste Estudo na Literatura

A partir dos trabalhos elencados nas seções anteriores, verifica-se que existem estudos de mapeamento e otimização sobre rotas de soja no Mato Grosso (e no Brasil) e um número de trabalhos de modelagem de sistemas logísticos que fazem uso das redes de Petri. Não foram identificadas pesquisas que modelem e simulem as rotas de soja usando especificamente redes de Petri P-temporizadas ou que faça uso de técnicas de otimização e simulação em rede de Petri para tratamento de fluxos de transporte. As evidências na literatura destacadas nas seções anteriores demonstram o potencial dessas técnicas direcionadas à resolução de problemas operacionais e estratégicos em diferentes situações. Além disso, há uma carência de estudos que façam uso de ferramentas de otimização aliada à preocupação sustentável (Guimarães et al., 2018; Moraes et al., 2023). Dessa forma, o presente trabalho busca preencher uma lacuna metodológica ao propor uma abordagem sustentável de otimização e simulação como contribuição para a expansão da rede intermodal de exportação de soja do Mato Grosso. O estudo pretende indicar formas de mitigar os custos logísticos aliado à sustentabilidade ambiental, possibilitando o aumento da competitividade do Brasil no mercado internacional do grão. Pera et al. (2021) corroboram com esta ideia, dizendo que a maior parte do transporte da produção de soja se dá por caminhões, com elevado custo de transporte.

A primeira etapa, que contempla o aprimoramento do modelo de otimização de Oliveira et al. (2020b), permite escolhas de prioridades quanto à instalação de terminais integradores segundo critérios definidos. Este estudo se diferencia dos demais pelo fato de

considerar todas as cidades produtoras de soja do Mato Grosso, adotar dados históricos de produção e exportação de soja, além de verificar melhores localizações e tamanhos de terminais integradores que podem ser interligados aos modais de transportes ferroviários e hidroviários (existentes ou em projeto). Permite ainda tratar deslocamentos rodoviários a uma distância cuja mudança de modal seja mais vantajosa, como destacado por [Rodrigue et al. \(2020\)](#), incorporando o aspecto da emissão de CO<sub>2</sub> nos cenários envolvidos.

A segunda etapa, que consiste na criação da rede de Petri P-temporizada, segue as diretrizes de modelagem de sistemas e definições propostas apresentadas na subseção 4.6.2, não tendo sido encontrada nenhuma abordagem semelhante na literatura para simulação de rotas de transporte de soja. Além disso, poucos trabalhos fizeram uso de rede de Petri P-temporizada para temas específicos ([Farges e Gallego, 1999](#); [Gaied et al., 2018](#); [Pang e Le, 2014](#); [Gaied et al., 2019](#); [Oliveira, 2021](#)). Para o caso em questão, os *tokens*, nos lugares, representarão a quantidade de soja alocada em um terminal intermodal, a demanda de cada porto e a capacidade de uma via. A temporização dos lugares será representada conforme as características de cada etapa da rede. As transições denotarão o transporte de uma certa quantidade de soja por um determinado trajeto. As redes de Petri, por serem uma adequada ferramenta para a descrição de SED, se mostram promissoras para o estudo em questão, uma vez que apresentam sólida base matemática e sua utilização é mundialmente difundida e aceita pela comunidade científica. Além disso, uma das principais vantagens da aplicação de rede de Petri está na sua capacidade de previsão de desempenho em diferentes cenários, como no caso em questão.

A Figura 23 a seguir, ilustra, de uma forma geral, as etapas deste estudo, além de indicar um sistema logístico cuja evolução dinâmica depende da ocorrência de eventos.

Modelos orientados a eventos discretos apresentam uma afinidade especial com simulações em computadores, devido à natureza descontínua de seu estado. No problema abordado, que consiste em sistemas de transporte de material (soja), há uma forte conexão de SED e redes de Petri. Esses tipos de modelos, aliados às técnicas de otimização, formam uma ferramenta robusta de auxílio à tomada de decisões, pela permissível complementaridade que uma técnica pode fazer na outra. Dessa forma, espera-se que este estudo auxilie na construção de um novo caminho para o aperfeiçoamento do sistema logístico no estado do Mato Grosso por meio de uma reflexão sustentável.

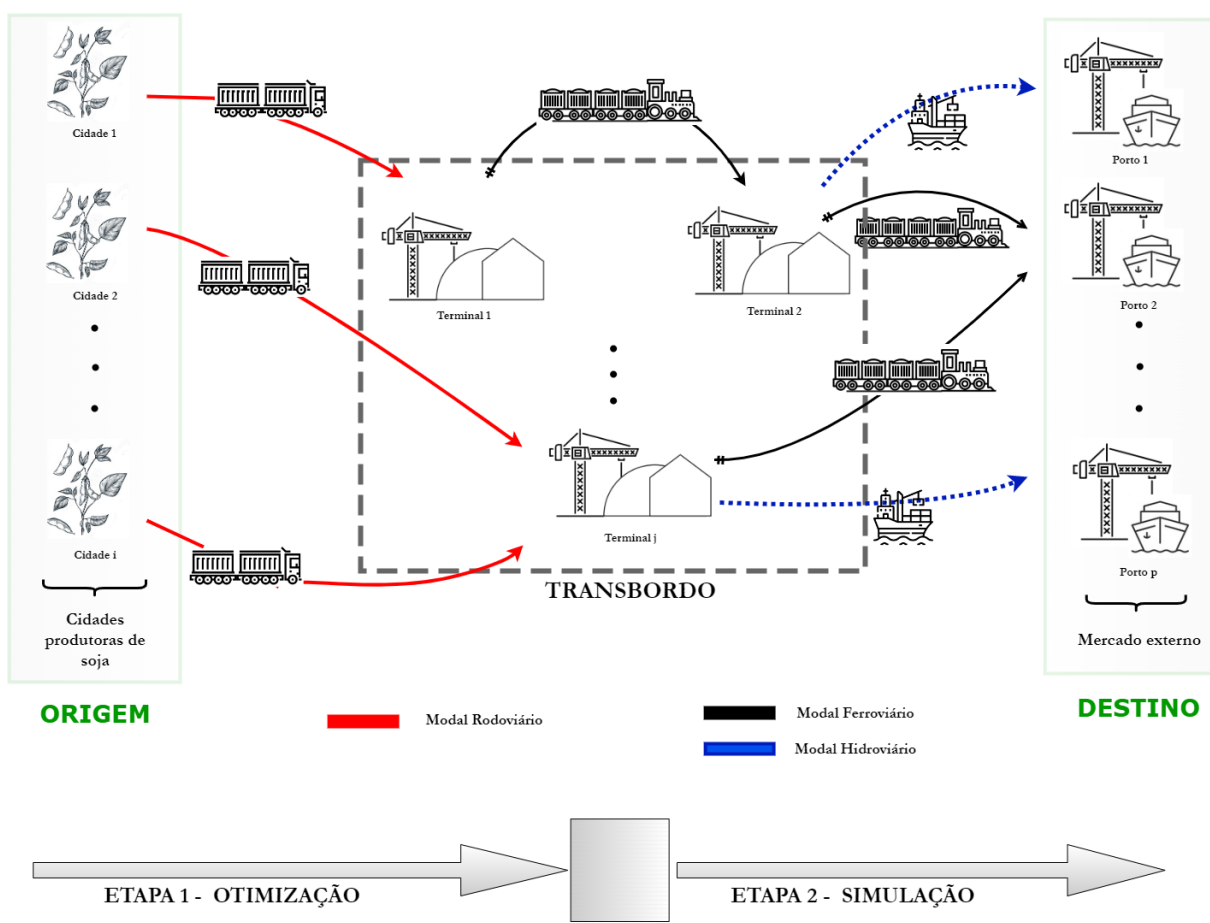


Figura 23 – Modelo ilustrativo do sistema logístico com os possíveis modais que podem ser utilizados como rota de exportação da soja do estado do Mato Grosso

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 REVISÃO DOS CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Esse capítulo apresenta alguns conceitos e propriedades das principais técnicas que serão utilizadas para o estudo em questão. Inicia-se a abordagem descrevendo o tema otimização e suas formas de representação para diferentes tipos de problemas, através do modelo matemático. A seguir, são descritos os conceitos de sistemas a eventos discretos com particular enfoque nas redes de Petri. Logo após, são apresentadas importantes considerações sobre incertezas em problemas estocásticos, análise de saída de um modelo de simulação e detalhes de um simulador em rede de Petri P-temporizada. Todos os temas são direcionados a melhorar o entendimento da proposta que será utilizada neste trabalho.

### 4.1 Otimização

A otimização é o processo que faz uso de métodos computacionais para encontrar uma melhor maneira para projetar e/ou operar um sistema. O resultado (ou solução ótima), quando possível de ser alcançado, é representado pela melhor combinação de valores para as variáveis do problema, considerando seus objetivos e suas restrições de projeto e de operação. O processo de otimização normalmente resulta em um impacto econômico, quer seja na qualidade do produto, custo da produção, na competitividade, entre outros.

Um modelo é definido como uma representação de um sistema real, o que significa que ele deve explicar convenientemente este sistema e a forma como ocorrem suas alterações. O objetivo mais importante de um modelo é permitir o entendimento de um sistema de uma forma mais simplificada, mas que este consiga ser tão preciso quanto o comportamento do sistema no mundo real. Um modelo matemático forma um conjunto de equações que representam as hipóteses usadas na elaboração do modelo, as quais se baseiam no sistema real. Essas equações são resolvidas e testadas através de comparação com as informações conhecidas do mundo real. As equações matemáticas de um modelo não proporcionam a plena explicação científica do comportamento do sistema a ser estudado, mas simplesmente interpretam as hipóteses de um ponto de vista quantitativo, dando condição de deduzir consequências e mostrar onde estão os detalhes que deverão ser aceitos ou recusados. Em [Arenales et al. \(2007\)](#) são apresentados estudos de problemas reais e suas representações em modelos matemáticos. Um modelo matemático é considerado válido quando sua representação e testes conduzem a uma solução coerente com a expectativa dos resultados do mundo real.

Um modelo matemático muito utilizado na resolução de problemas reais em sistemas de logística, transportes, produção de materiais, localização de facilidades, dentre outros é de programação linear inteira ou otimização discreta. Esses tipos de problemas

apresentam limitações em suas variáveis de decisão, que só poderão assumir valores inteiros. Em [Arenales et al. \(2007\)](#), são abordados diversos casos, formas de modelagem e resolução desses tipos de problemas.

A Equação 4.1 representa a formulação geral do modelo matemático de um problema de programação linear inteira.

$$\begin{aligned}
 z &= \max \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
 \text{s.a.} \\
 \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\
 x_j &\geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 x_j &\in \mathbb{Z}^+
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Da Equação 4.1, tem-se que:  $z$  representa o resultado da função objetivo, sendo por exemplo, o lucro alcançado da fabricação de produtos;  $c_j$  são os elementos de um vetor  $c$  de dimensão  $(1 \times n)$ , que podem representar o lucro associado a cada produto fabricado;  $x_j$  os elementos de um vetor de variáveis  $x$  com dimensão  $(n \times 1)$ , que podem representar a quantidade fabricada de determinado produto;  $a_{ij}$  são os elementos de uma matriz  $A$  de dimensão  $(m \times n)$ , que podem representar, por exemplo, parâmetros de fabricação dos produtos;  $b_i$  são elementos de um vetor  $b$  de dimensão  $(m \times 1)$ , que podem representar limites tecnológicos de fabricação e  $\mathbb{Z}^+$  é o conjunto dos números inteiros não negativos.

Um caso particular do modelo de programação linear inteiro ocorre quando todas as variáveis de decisão assumem valores 0 ou 1. Em [Arenales et al. \(2007\)](#), os problemas que apresentam esta particularidade são denominados problemas de programação 0-1 ou problemas binários. A equação 4.2 representa a formulação geral do modelo matemático de um problema binário, na qual, a variável  $x_j$ , só pode assumir valor 0 ou 1.

$$\begin{aligned}
 z &= \max \sum_{j=1}^n c_j x_j \\
 \text{s.a.} \\
 \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &\leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\
 x_j &\geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\
 x_j &\in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$



### 4.1.1 Problema de Localização de Facilidades

Os modelos matemáticos para localização de facilidades abordam questões como quantas instalações devem ser alocadas, onde localizá-las, qual é seu tamanho e como deve ser alocada a demanda por produtos serviços em cada uma destas instalações (Daskin, 2013). Esses problemas são muito comuns na literatura, uma vez que sua abordagem permite aplicações nas mais diversas áreas e setores, em situações de decisões estratégicas. O termo “facilidade” inclui fábricas, centros de distribuição, portos, hospitais, aeroportos, terminais, dentre outros. Como exemplos de aplicações, nos estudos de Araujo Batista Silva (2020), Soares e Dos Santos (2021), Eberhardt (2020) e Plaza et al. (2020) são abordadas alocações de hospitais, centro de saúde, armazéns e fábricas.

O problema de localização de facilidades capacitado consiste em encontrar um conjunto de facilidades que atendam à demanda total de todos os consumidores, de modo a minimizar o custo total (Chopra e Meindl, 2013). A formulação do modelo matemático, segundo Chopra e Meindl (2013), para um problema de localização de facilidades, pode ser vista a seguir:

#### Índices:

$i = 1, \dots, m$  que representam as localidades das facilidades

$j = 1, \dots, n$  que representam os consumidores

#### Parâmetros do modelo:

$c_{ij}$  = custo de transporte da localidade  $i$  para o consumidor  $j$

$f_i$  = custo fixo de manter a localidade  $i$  aberta

$C_{max,i}$  = capacidade máxima da localidade  $i$

$D_j$  = demanda do consumidor  $j$

#### Variáveis de decisão:

$x_{ij}$  = quantidade transportada da localidade  $i$  para o consumidor  $j$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se a localidade } i \text{ for escolhida para se instalar uma facilidade} \\ 0, & \text{se a localidade não for escolhida para se instalar uma facilidade} \end{cases}$$

#### Formulação do modelo matemático:

Função objetivo

$$\min \sum_{i=1}^m f_i y_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (4.3)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq C_{max,i} \cdot y_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = D_j \quad j = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

$$y \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

A função objetivo do modelo de localização de facilidades busca minimizar a soma dos custos fixos de manutenção das localidades e dos custos de transportes das localidades para os consumidores finais. A restrição 4.4 garante que a capacidade máxima de cada localidade  $i$  não seja excedida. (a capacidade da localidade  $i$  só vai ser considerada se a facilidade for instalada). A restrição 4.5 assegura que a demanda de cada consumidor  $j$  seja atendida. Por fim, as variáveis de decisão  $x_{i,j}$ , na restrição 4.6, são não negativas e  $y_i$ , na restrição 4.7, binária. Pelas características da formulação anterior, tem-se um problema de programação binária mista, uma vez que a restrição 4.6 permite obter valores do conjunto dos números reais não negativos.

O presente estudo, como será visto na Seção 5.6, fará uso de um modelo de localização de facilidades capacitado. A função objetivo será tratada como uma função de utilidade, com a associação de pesos por dimensões de preferência. A técnica utilizada será a de soma ponderada, a ser tratada em mais detalhes na Seção 4.2.1.

## 4.2 Otimização Multiobjetivo

Nos problemas com mais de um objetivo, não existe um valor ótimo no sentido habitual como em problemas mono-objetivo, mas sim um conjunto de soluções eficientes ou não-dominadas. Como os objetivos são conflitantes, não existe uma solução que otimize, simultaneamente, todas as funções objetivo (Clímaco et al., 2003). Essas soluções são classificadas como soluções fracamente eficientes e soluções Pareto-ótimas (estritamente eficientes) (Chankong e Haimes, 1983). Assim, nenhum objetivo em uma solução dominada pode ser melhorado sem piorar pelo menos uma das outras funções objetivo, como afirma (Martins, 1984).

Um problema de otimização multiobjetivo pode ser formulado em um modelo matemático, da seguinte forma (Luc, 2015; Martins, 2017):

$$\begin{aligned} & \min (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)) \\ & \text{sujeito a} \quad x \in \mathcal{X}, \end{aligned} \tag{4.8}$$

sendo  $f_i : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ , com  $i = 1, \dots, p$  funções objetivo e  $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$  um conjunto não vazio denominado conjunto das soluções viáveis.

O conjunto das soluções ótimas de um problema linear monobjetivo em cada uma das  $p$  funções objetivo é  $\mathcal{X}_i = \{\hat{x} \in \mathcal{X} : f_i(\hat{x}) \leq f_i(x), x \in \mathcal{X}\}$ ,  $i = 1, \dots, p$ .

A otimização linear multiobjetivo é um caso particular da otimização multiobjetivo, na qual se otimiza simultaneamente múltiplas funções lineares sujeitas a um conjunto de restrições também lineares. Esta classe problemas são designados de forma abreviada por MOLP (*Multicriteria Optimization Linear Problem*) (Luc, 2015; Martins, 2017).

Considerando o conjunto de restrições na forma  $Ax = b$ , as funções objetivo como  $f_k(x) = c_k^T(x)$ ,  $k = 1, \dots, p$ , com  $c_k \in \mathbb{R}^n$  e que o vetor das variáveis seja não negativo em  $\mathbb{R}^n$ , um problema de otimização linear multiobjetivo pode ser escrito da seguinte forma (Luc, 2015; Martins, 2017):

$$\begin{aligned} & \min \quad Cx \\ & \text{sujeito a} \quad Ax = b \\ & \quad \quad \quad x \geq 0, \end{aligned} \tag{4.9}$$

sendo  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  denotada por matriz de critérios e construída com linhas  $c_k^T$ ,  $k = 1, \dots, p$ .

O conjunto admissível no espaço de decisão é dado por

$$\mathcal{X} = \{x \in \mathbb{R}^n : Ax = b, x \geq 0\}, \tag{4.10}$$

que é formado pela matriz das restrições  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$  e pelo vetor  $b \in \mathbb{R}^m$ . O conjunto admissível no espaço de objetivos é  $\mathcal{Y} = C\mathcal{X} = \{Cx : x \in \mathcal{X}\}$ .

Para um MOLP, apenas um dos seguintes casos pode ocorrer (Luc, 2015; Martins, 2017):

- inviável, isto é,  $\mathcal{X} = \emptyset$
- é viável ( $\mathcal{X} \neq \emptyset$ ), mas não tem soluções eficientes ( $\mathcal{X}_E = \emptyset$ ), ou
- é viável e tem soluções eficientes ( $\mathcal{X}_E \neq \emptyset$ ).

### 4.2.1 Método da Soma Ponderada

Uma maneira de se determinar as soluções de um MOLP é através do método da soma ponderada. Esta técnica consiste na transformação de um problema multiobjetivo em um problema monobjetivo através da atribuição de pesos a cada um dos objetivos. Assim, com a atribuição de diferentes pesos para cada um dos objetivos, tem-se uma nova função que representa uma combinação linear entre os objetivos (Luc, 2015; Martins, 2017). Seja  $\lambda \in \mathbb{R}_+$  um vetor de  $p$  posições. O método de programação linear através da soma ponderada, denotado por  $LP(\lambda)$ , é definido por

$$\begin{aligned} \min \quad & \lambda^T Cx \\ \text{sujeito a} \quad & Ax = b \\ & b \geq 0 \\ & x \geq 0. \end{aligned} \tag{4.11}$$

Para o tratamento do problema alvo do estudo, as dimensões de análises das funções objetivo são determinadas (e modeladas) antes da execução do método de otimização. O problema multiobjetivo então é transformado em um problema monobjetivo  $LP(\lambda)$  de tal forma  $\sum \lambda = 1$  e uma única solução é gerada para cada etapa. Alterando a relação de  $\lambda$  entre os objetivos, uma nova solução pode ser gerada, até que os cenários possam ser analisados de forma satisfatória.

### 4.3 Sistemas a Eventos Discretos

Um sistema a eventos discretos (SED), diferentemente de um sistema cuja dinâmica é dirigida pelo tempo, possui um comportamento estritamente condicionado à ocorrência de eventos. Um evento pode representar uma ação tomada, uma ocorrência espontânea ou uma condição atingida. Cada um desses eventos, quando disparado, muda o estado do sistema abruptamente. Como os eventos acontecem num momento definido, causando uma mudança pontual no sistema, eles são denominados discretos. Existem muitas áreas de aplicação de SED com fortes conexões a sistemas complexos conectados em rede. Como exemplo, é possível citar os sistemas de automação, manufatura, transportes, entre outros (Cassandras e Lafortune, 2008).

Os sistemas, cujas regras obedecem às leis da física clássica, são normalmente descritos por variáveis contínuas, de forma que a evolução dinâmica é dirigida ou orientada pelo tempo. Já um SED, apresenta as seguintes características: estado discreto, com evolução dinâmica dirigida pela ocorrência de eventos, seguem leis de operação definidas pelos seres humanos, as entidades e os modelos são descritos pela matemática discreta.

Wang (1998) define um SED como sendo frutos da tecnologia moderna que não podem ser descritos por equações diferenciais e Cassandras e Lafortune (1999) como um sistema com estado discreto e baseado na ocorrência de eventos, isto é, a evolução dos estados depende somente da ocorrência de eventos discretos assíncronos.

Embora o tempo não seja fundamental para a descrição da evolução de estado de um SED, ele é essencial para tratar questões referentes ao desempenho do sistema. Em Cassandras e Lafortune (2008), os conceitos de sistema, estados, espaço de estado e eventos podem ser vistos mais detalhadamente.

SED são divididos em três categorias:

- Sistema a eventos discretos não temporizados ou lógicos, no qual modelos são aplicados no projeto da lei de controle para sistemas de automação por exemplo;
- Sistemas a eventos discretos temporizados determinísticos, cujos modelos se aplicam, por exemplo, na temporização bem estabelecida de eventos um sistema metroviário;
- Sistema a eventos discretos temporizados determinísticos, cujos modelos se aplicam em sistema cujos eventos são gerados de forma estocástica, como no caso de um *call-center*.

Em Cassandras e Lafortune (2008) são apresentadas diversas técnicas utilizadas para a modelagem de SED. Dentre essas técnicas, é possível representar um sistema utilizando autômatos finitos, que detalham os possíveis estados e as transições entre eles. Outra técnica é conhecida como cadeia de Markov, que leva em conta as probabilidades de transições entre estados. Uma terceira opção, que inclusive será utilizada neste trabalho, é a representação e o estudo de um sistema por redes de Petri. Esta técnica será detalhada a seguir.

#### 4.4 Rede de Petri - Conceitos Básicos

O conceito inicial das redes de Petri (RdP) foi apresentado em 1962, na tese de doutorado *Kommunikatin mit Automaten* (Comunicação com Autômatos) defendida por Carl Adam Petri na Faculdade de Matemática e Física da Universidade de Darmstadt, Alemanha (Petri, 1962). As RdP são uma ferramenta gráfica e matemática, invariante e independente de sistema computacional. Possuem uma representação simplificada com poucos elementos descritivos funcionais, além de poder ser representadas matricialmente de forma estruturada, o que facilita seu devido tratamento computacional.

As redes de Petri são uma ferramenta que permite a modelagem de sistemas envolvendo simultaneidade, compartilhamento de recursos, sincronização e conflito e

permite a validação da correção do sistema, analisando as propriedades qualitativas da rede através da modelagem do sistema (Murata, 1989)

Sem perda de generalidade, os principais conceitos sobre RdP mais relevantes para este trabalho são apresentados a seguir. Demais definições podem ser encontradas em Ramamoorthy e Ho (1980), Laftit (1991), David e Alla (1992) e DiCesare et al. (1993).

**Definição 1.** *Uma rede de Petri marcada é uma quintupla com informações da Rede e as marcações dos lugares, sendo representada por  $Q = (P, T, A, w, X)$ . (Cassandras e Lafortune, 2008)*

- $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$ , representa o conjunto finito de lugares;
- $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ , representa o conjunto finito de transições;
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ , representa o conjunto finito de arcos de lugares para transição e de transição para lugares;
- $w(T_n, P_j) = c_1$ ;  $w(P_n, T_j) = c_2$  representa o peso dos arcos, sendo  $c_1$  e  $c_2 \in \mathbb{N}$ ;
- $X = [x(P_1), x(P_2), x(P_3), \dots, x(P_n)]$  é um vetor linha que representa a marcação dos conjuntos de lugares, ou seja, a quantidade de *tokens* em cada um dos lugares da rede.

**Definição 2.** *O conjunto de lugares que estão conectados a uma transição  $T_j$  é denotado por  $I(T_j)$ . Assim, em caso de disparo da transição  $T_j$ , tais lugares perderão um número de tokens igual ao peso do arco  $w(P_i, T_j)$ . (Cassandras e Lafortune, 2008).*

$$I(T_j) = \{P_i \in P : (P_i, T_j) \in A\},$$

**Definição 3.** *O conjunto de lugares de saída para a transição  $T_j$  é denotado por  $O(T_j)$ . Assim, em caso de disparo da transição  $T_j$ , tais lugares receberão um número de tokens igual ao peso do arco  $w(T_j, P_i)$ . (Cassandras e Lafortune, 2008).*

$$O(T_j) = \{P_i \in P : (T_j, P_i) \in A\}.$$

A figura a seguir ilustra uma rede de Petri.

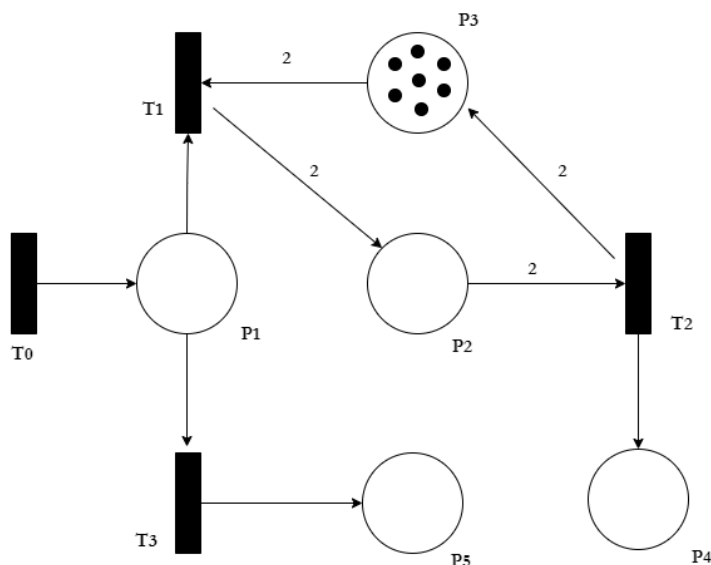


Figura 24 – Representação de uma rede de Petri

Fonte: Elaborado pelo autor

As informações da rede referente a Figura 24 podem ser vistas abaixo:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$$

$$T = \{T_0, T_1, T_2, T_3\}$$

$$A = \{(T_0, P_1), (P_1, T_1), (P_1, T_3), (P_2, T_2), (P_3, T_1), (T_1, P_2), (T_2, P_3), (T_2, P_4), (T_3, P_5)\}$$

$$w(P_1, T_1) = w(T_0, P_1) = w(P_1, T_3) = w(T_2, P_4) = w(T_3, P_5) = 1$$

$$w(T_1, P_2) = w(P_2, T_2) = w(P_3, T_1) = w(T_2, P_3) = 2$$

$$x_0 = [0, 0, 7, 0, 0]$$

O conjunto de lugares de entrada para cada uma das transições da Figura 24 é:

$$I(T_0) = \emptyset, I(T_1) = \{P_1, P_3\}, I(T_2) = \{P_2\}, I(T_3) = \{P_1\}$$

O conjunto de lugares de saída para cada uma das transições da Figura 24 é:

$$O(T_0) = \{P_1\}, O(T_1) = \{P_2\}, O(T_2) = \{P_3, P_4\}, O(T_3) = \{P_5\}$$

A partir dos conjuntos formados por  $I(T_j)$  e  $O(T_j)$ , sendo  $T_j \in T$  e conhecido os pesos dos arcos  $w(T_j, P_i)$  e  $w(P_i, T_j)$  é possível criar as matrizes de incidência denotadas

por  $A^-$  e  $A^+$ . Na ocorrência de disparo de uma transição  $T_j \in T$ , a matriz  $A^-$  representará a quantidade de *tokens* retirados dos lugares da rede ( $P_i \in P$ ) e a matriz  $A^+$  a quantidade de *tokens* que serão adicionados aos lugares da rede ( $P_i \in P$ ).

Para a Figura 24, a representação de  $A^-$  e  $A^+$  é exibida a seguir.

$$A^- = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para as matrizes  $A^-$  e  $A^+$ , cada uma das linhas representam as transições que podem disparar e cada uma das colunas representa os lugares presentes na rede.

A matriz de incidência ( $A$ ) é representada por 4.12.

$$A = A^+ - A^- \quad (4.12)$$

A matriz de incidência  $A$ , para o caso da Figura 24 é:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Segundo [Cassandras e Lafortune \(2008\)](#), a ocorrência de eventos determina a evolução dos estados da RdP. Para isso é necessário saber quais transições estão habilitadas para serem disparadas. A definição a seguir apresenta a condição necessária para tal.

**Definição 4.** *Uma transição  $T_j \in T$  em uma rede de Petri está habilitada se  $x(P_i) \geq w(P_i, T_j)$  para todo  $P_i \in I(T_j)$  ([Cassandras e Lafortune, 2008](#)).*

Se ocorrer um estado no qual nenhuma transição possa ser disparada, é dito que há um *deadlock*. A inequação 4.13, a seguir, permite verificar as transições habilitadas na rede, sendo  $u$  o vetor linha que contém a informação de disparo das transições.

$$x(P_i) \geq uA^- \text{ ou } x(P_i) - uA^- \geq 0 \quad (4.13)$$

Para a inequação 4.13, tem-se:

$$u = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$



sendo 1 a posição  $j$  correspondente a cada  $T_j$ . Para o exemplo da Figura 24, temos  $j = 0, 1, 2, 3$ . Dessa forma, o vetor linha  $u$  possui a informação referente a cada transição da rede que possa estar habilitada para disparo, caso satisfaça a inequação 4.13.

**Definição 5.** *Um novo vetor de marcação do estado da RdP, caso uma transição  $T_j \in T$  seja disparada, é dado por: (Cassandras e Lafortune, 2008)*

$$x' = x + uA \quad (4.14)$$

Nota-se que, a partir da equação 4.14 é possível obter um novo vetor de marcação do estado da rede, uma vez conhecida as informações do vetor de disparo de transição  $u$ , da marcação atual da rede  $x(P_i)$  e da matriz de incidência  $A$ .

Na seção a seguir são apresentados os conceitos de rede de Petri limitada.

#### 4.5 Rede de Petri Limitada

Uma rede de Petri é limitada ou k-limitada se o número de *tokens* em cada lugar não excede o número finito  $k$  para qualquer marcação inalcançável a partir da marcação inicial. A partir disso, são apresentadas as seguintes definições para um lugar a partir do número de *tokens*. (Cassandras e Lafortune, 2008)

**Definição 6.** *Um lugar é 1-seguro ou seguro se o número de tokens é menor ou igual a um.*

**Definição 7.** *Um lugar é k-limitado ou limitado se o número de tokens é limitado e maior do que um.*

**Definição 8.** *Um lugar é ilimitado se seu número de tokens é ilimitado.*

Além das definições elencadas anteriormente, cabe destacar que uma rede de Petri é dita ilimitada se todos os lugares são limitados. A Figura 25 a seguir ilustra uma rede de Petri em que os lugares são ilimitados, ou seja, podem receber uma quantidade maior que  $k$ -tokens.

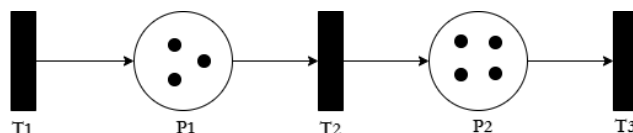


Figura 25 – Exemplo de uma rede de Petri ilimitada.

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da rede de Petri ilimitada da Figura 25, é criada uma limitação no lugar P2. Para isso, um lugar  $P_3$  é inserido entre as transições em que se deseja controlar a

quantidade de *tokens*. Essa inserção de um lugar entre as transições  $T_2$  e  $T_3$  na rede de Petri anterior é exibida na Figura 26.

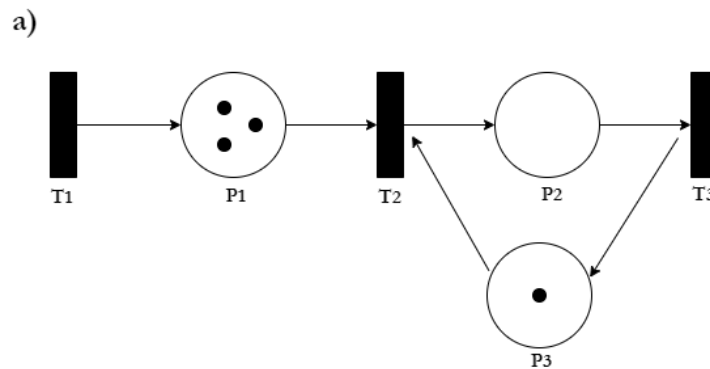


Figura 26 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar P2

Fonte: Elaborado pelo autor

É possível notar que a transição  $T_1$  está pronta para disparar a qualquer momento, uma vez que não há precedentes. Já a transição  $T_2$ , possui uma condição de disparo. Além da necessidade de pelo menos um *token* no lugar  $P_1$  que a precede, há também a necessidade de um *token* no lugar inserido ( $P_3$ ). Atendidas as condições, como observado na Figura 26, a transição  $T_2$  está habilitada a disparar, já que atende a esses requisitos. Na ocorrência do disparo de  $T_2$  é obtida a configuração da Figura 27, ou seja, um *token* foi consumido de  $P_1$  e um *token* (único) foi consumido de  $P_3$ . Pela configuração da Figura 27, não é possível a ocorrência de um novo disparo de  $T_2$ , uma vez que  $P_3$  não possui *tokens* disponíveis.

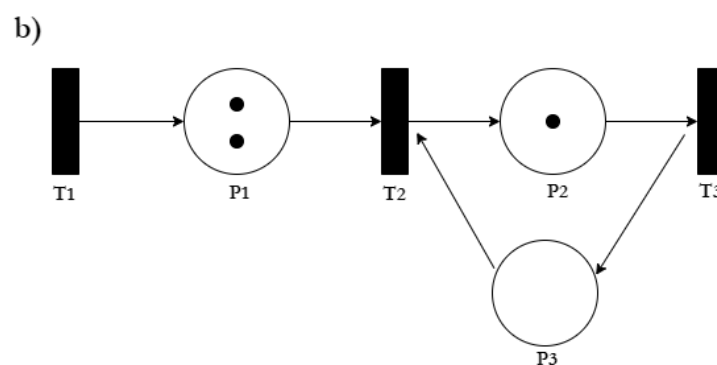


Figura 27 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar P2 - disparo T2

Fonte: Elaborado pelo autor

Por análise da rede de Petri exibida na Figura 27 e apesar da transição  $T_1$  estar habilitada para disparo, será considerado o disparo da transição  $T_3$ , em que há o consumo de um *token* do lugar  $P_2$  e há inserção de um *token* no lugar  $P_3$ , resultando assim na configuração da Figura 28.

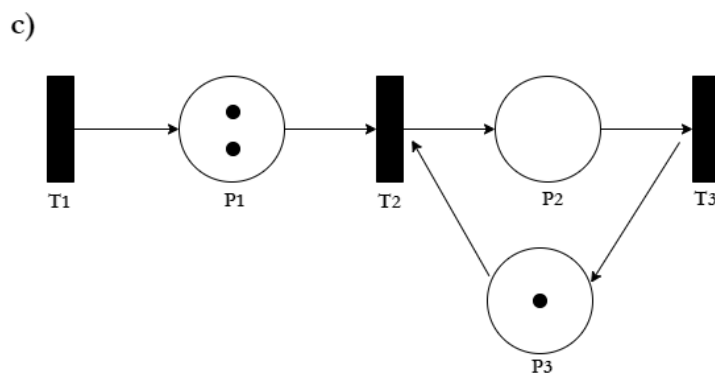


Figura 28 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar  $P_2$  - disparo  $T_3$

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela configuração da rede de Petri na Figura 28, existe a possibilidade de disparo de  $T_1$  e  $T_2$ . Ao se considerar o disparo de  $T_2$ , é obtido o resultado ilustrado na Figura 29. Esse tipo de limitação, ocorrido pela inserção do lugar  $P_3$ , controla a quantidade de *tokens* que o lugar  $P_2$  pode receber e pode ser aplicada em todos os lugares da rede de Petri, tornando-a limitada.

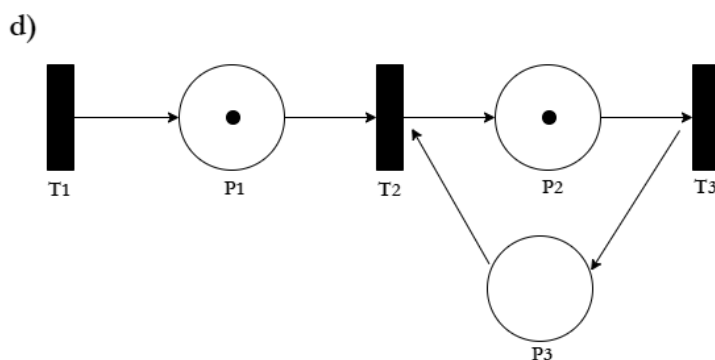


Figura 29 – Exemplo de uma rede de Petri com limitação no lugar  $P_2$  - disparo  $T_2$

Fonte: Elaborado pelo autor

Na seção a seguir são apresentados os conceitos de rede de Petri temporizada.

#### 4.6 Rede de Petri Temporizada

Historicamente, os primeiros modelos que integraram o tempo baseavam-se em uma lógica específica que consistia em descrever o tempo necessário para uma operação. Este tipo de abordagem permitiu representar os mecanismos temporais associados a um processo. Com o avanço do desenvolvimento computacional e teórico, as redes de Petri temporizadas se apresentam como uma poderosa ferramenta para a especificação e validação de sistemas a eventos discretos com tempos mínimos (Wang, 1998). O tempo pode ser associado para as transições (modelo RdP T-temporizada), como visto em Ramchandani

(1974) ou em lugares (modelo RdP P-temporizada), como em Sifakis (1977b), Sifakis (1977a).

Segundo Wang (1998), os modelos de rede de Petri temporizadas podem ser determinísticos ou estocásticos. Os modelos determinísticos são aqueles em que o tempo para disparar uma determinada transição (modelo T-temporizada) ou o tempo de permanência que um *token* deve respeitar até que ele esteja disponível no lugar (modelo P-temporizada) acontecem de forma determinística. Os modelos de rede de Petri temporizadas estocásticos são aqueles cujo o tempo para disparar uma transição (modelo T-temporizada) ou o tempo de permanência que um *token* deve respeitar até que ele esteja disponível no lugar (modelo P-temporizada) é dado a partir de uma distribuição de probabilidade, ou seja, acontecem de forma aleatória seguindo a distribuição escolhida. A escolha da distribuição se dá por aquela que melhor representa o modelo abordado.

Na subseção a seguir apresentar-se-á duas formas de se temporizar uma rede de Petri: RdP T-temporizada e RdP P-temporizada. Mais detalhes podem ser obtidos em Wang (1998).

#### 4.6.1 Rede de Petri T-temporizada

Uma rede de Petri T-temporizada possui a característica de um tempo de atraso associado a cada transição.

**Definição 9.** *Uma rede de Petri T-temporizada é uma sêxtupla  $(P, T, A, w, x, V)$ , no qual  $(P, T, A, w, x)$  é uma rede de Petri marcada e  $V$  a estrutura do relógio que associa as transições com os tempos de atraso. (Cassandras e Lafortune, 2008)*

- $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$  é o conjunto finito de lugares;
- $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$  sendo  $T = T_0 \cup T_D$  o conjunto finito de transições.  $T_0$  é o conjunto de transições sem atraso e  $T_D$  o conjunto de transições com atraso no disparo.
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  é o conjunto finito de arcos de lugares para transição e de transição para lugares.
- $w(T_n, P_j) = c_1$ ;  $w(P_n, T_j) = c_2$  representa o peso dos arcos, sendo  $c_1$  e  $c_2 \in \mathbb{N}$ ;
- $x = [x(P_1), x(P_2), x(P_3), \dots, x(P_n)]$  é um vetor linha que representa a marcação dos conjuntos de lugares, ou seja, a quantidade de *tokens* em cada um dos lugares da rede;
- $V = \{v_j : T_j \in T_D\}, v_j = \{v_{j,1}, v_{j,2}, \dots\}, v_{j,k} \in \mathbb{R}^+$  é a estrutura do relógio.

A imagem 30 a seguir representa um modelo de RdP T-temporizada. Nota-se que, quando uma transição for temporizada, ela será ilustrada por um retângulo sem preenchimento.

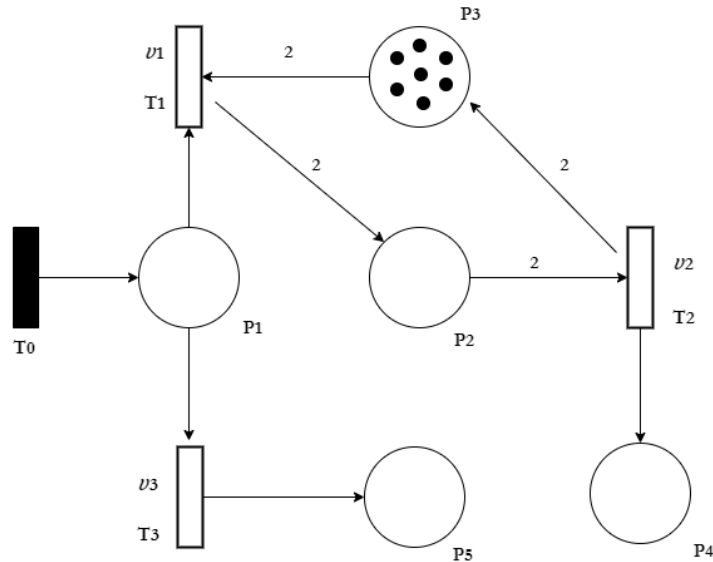


Figura 30 – Representação de uma rede de Petri T-temporizada

Fonte: Elaborado pelo autor

As transições ( $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ ) são temporizadas. Nesse caso, existe um tempo de atraso associado para cada uma delas.

#### 4.6.2 Rede de Petri P-temporizada

Conforme [Cassandras e Lafortune \(2008\)](#), uma rede de Petri é dita P-temporizada quando existem temporizações associadas aos seus lugares. A rede possui a característica de um tempo de permanência para os *tokens* nos lugares, ou seja, desde que se tenha ultrapassado o tempo de atraso associado ao *token*, este pode estar disponível para disparo de suas transições de saída ([Wang, 1998](#)).

**Definição 10.** *Uma rede de Petri P-temporizada é uma sêxtupla  $(P, T, A, w, x, \tau)$ , no qual  $(P, T, A, w, x)$  é uma rede de Petri marcada e  $\tau : P \rightarrow \mathbb{R}^+$  a estrutura do relógio que associa os lugares com os tempos de atraso ([Wang, 1998](#)).*

- $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$ , representa o conjunto finito de lugares;
- $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ , representa o conjunto finito de transições;
- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ , representa o conjunto finito de arcos de lugares para transição e de transição para lugares;

- $w(T_n, P_j) = c_1$ ;  $w(P_n, T_j) = c_2$  representa o peso dos arcos, sendo  $c_1$  e  $c_2 \in \mathbb{N}$ ;
- $X = [x(P_1), x(P_2), x(P_3), \dots, x(P_n)]$  é um vetor linha que representa a marcação dos conjuntos de lugares, ou seja, a quantidade de *tokens* em cada um dos lugares da rede.
- $\tau : P \rightarrow \mathbb{R}^+$  representa uma função que associa tempo aos lugares da rede.

A Figura 31 ilustra uma RdP P-temporizada. Os valores de  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5$  representam respectivamente o tempo de atraso associado aos lugares  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ .

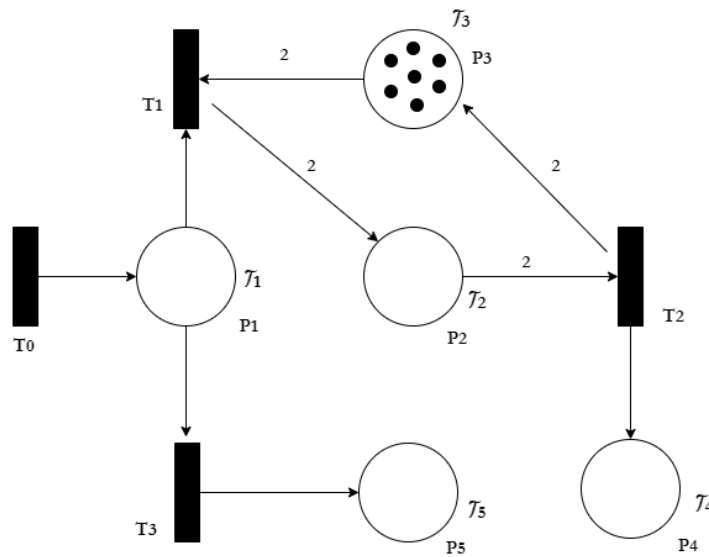


Figura 31 – Representação de uma rede de Petri P-temporizada

Fonte: Elaborado pelo autor

O valor, por exemplo, de  $\tau_3$ , será igual ao tempo de atraso máximo associado aos *tokens* presentes no lugar  $P_3$ . Pela Figura 31, é possível notar que, para a transição  $T_1$  ficar habilitada para disparo, é necessário que os tempos de atraso  $\tau_1$  e  $\tau_3$ , associados aos lugares  $P_1$  e  $P_3$ , sejam respeitados. Portanto,  $T_1$  só poderá disparar após decorrer o maior tempo de atraso associado a esses lugares. Assim, é possível definir uma variável de controle de tempos data, como  $data_{sim} = \max\{\tau_1, \tau_3\}$ .

Na ocorrência do disparo  $T_1$ , os lugares de entrada  $P_1$  e  $P_3$  perderão um número de *tokens* proporcional ao peso dos arcos de entrada a  $T_1$  -  $w(P_1, T_1) = 1$  e  $w(P_3, T_1) = 2$  e o lugar de saída à transição  $P_2$  receberá um número de *tokens* que é proporcional ao peso do arco de saída à transição  $T_1$ , ou seja,  $w(T_1, P_2) = 2$ . Os *tokens* em  $P_2$  ficarão disponíveis até o tempo decorrido de atraso  $\tau_2$ .

Para uma RdP P-temporizada, uma variável  $data_{sim}$  será denotada como sendo o tempo decorrido em um processo de simulação. Inicialmente,  $data_{sim}$  assumirá o valor zero. Com a evolução dinâmica da rede,  $data_{sim}$  receberá o valor do maior tempo de atraso dos

lugares de entrada à transição após a verificação do tempo de atraso atribuído aos lugares associados a uma determinada transição  $T_i$ , para que  $T_i$  dispare.

Um simulador de rede de Petri P-temporizada com prioridade de disparo das transições será tratado na Seção 4.9. A seguir, apresentar-se-ão implicações sobre incertezas em problemas estocásticos e por consequente, os resultados de aplicações de simuladores à SED com fortes evidências de equivalência de resultados em relação aos simuladores tradicionais.

#### 4.7 Considerações Sobre Incertezas em Problemas Estocásticos

De acordo com [Cassandras e Lafortune \(2008\)](#) diversos sistemas são caracterizados por seus comportamentos incertos, pois operam em ambientes constantemente inseridos de incerteza. Os autores afirmam que esta característica é especialmente verdadeira ao se lidar com SED, que, por sua natureza, muitas vezes envolvem ações humanas imprevisíveis e falhas de máquina. Como exemplo, um sistema de fila pode ser composto de eventos aleatórios, que são as chegadas e saídas de soja de um terminal de transbordo com destino a um porto (exportação). Cada evento aleatório segue uma distribuição de probabilidade, a qual descreve seu comportamento.

Em um problema estocástico, normalmente caracterizamos o ambiente pelas incertezas provenientes de suas atividades. Na prática, muitos sistemas têm algum comportamento incerto que se encaixa nesta classe de problema. Para analisar se um problema que está dentro desta classe, é necessário um histórico do banco de dados que retrata a dinâmica de funcionamento desse sistema. Assim, pode-se descrever os processos que envolvem esse sistema em termos de variáveis aleatórias ([Ribeiro, 2018](#)).

Uma vez que estamos lidando com variáveis aleatórias para modelar incertezas, uma forma comum de avaliá-la é por meio do valor esperado. Esse número pode representar a taxa média de produção de um agente específico, tempo médio de operação, atendimento médio em um processo, entre outros. Seja  $J(\theta, \omega_i)$  um índice de desempenho que depende do parâmetro  $\theta$  e da sequência de amostra  $\omega_i$ . O valor esperado  $E[J(\theta)]$  é representado pela equação:

$$E[J(\theta)] = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^k J(\theta, \omega_i)}{k}, \text{ sendo } k \text{ o tamanho da amostra.} \quad (4.15)$$

Para SED, com características estocásticas que se comportam como estados estacionários e ergóticos, existem alternativas analíticas e por simulação para se estimar o valor esperado  $E[J(\theta)]$ . Dentre as opções, tem-se: simulação através da ferramenta em linguagem SIMAN ([Profozich e Sturrock, 1994](#)), álgebra Max-Plus ([Akian et al., 2006](#)), métodos analíticos com estudos de propriedades Markovianas, conceitos de teoria de filas, redes de Petri, entre outros.

Em sistemas controlados pelo tempo, o sincronismo ocorre em função do sinal de "clock". Se nenhum evento ocorrer neste intervalo, considera-se a ocorrência de um "evento nulo", em outras palavras, um evento que não gera nenhuma transição de estados. Sendo assim, é possível notar que as transições de estado são sincronizadas pelo relógio e um evento (ou nenhum evento) é selecionado a cada instante de tempo. O tempo é responsável por toda transição de estado. Em outros sistemas, denominados sistemas de estados discretos, as mudanças de estado só ocorrem em certos pontos por transições instantâneas e, a cada uma dessas transições, pode-se associar um evento.

Cassandras e Lafortune (2008) definem um SED como um sistema de estado discreto, no qual o espaço de estados é um conjunto discreto, cujo mecanismo de transição de estados é baseado em eventos. A evolução dos estados depende unicamente da ocorrência de eventos discretos, que ocorrem de forma pontual no tempo, e assíncronos, que ocorrem em intervalos irregulares, não importando o que ocorre entre eles. Em um problema de SED estocástico, cada processo do sistema pode ser caracterizado por uma distribuição geral. Esta situação dificulta a existência de uma solução analítica a ser aplicada e um método de aproximação é necessário para avaliar uma estimativa de  $E[J(\theta)]$ , ou seja, o valor  $\hat{E}[J(\theta)]$ . Uma alternativa é trabalhar uma aproximação do primeiro momento. Neste método, o tempo de processamento de cada processo é considerado como uma distribuição exponencial, mesmo seguindo um distribuição geral. De acordo com Marie (2011), esta é uma aproximação clássica feita conscientemente e sua consequência geralmente depende do contexto modelado. Outro método de aproximação analítica é por meio da distribuição do tipo de fase. Com este método, cada processo caracterizado por uma distribuição geral é substituído por uma grade de processo fictício com tempos entre eventos distribuídos exponencialmente.

De acordo com Cox (1955), pode-se representar qualquer distribuição geral como uma Transformada de Laplace - Stieltjes, utilizando uma sequência de fases distribuídas exponencialmente. Altiok (1985) aponta que distribuições são importantes na teoria das filas porque sua estrutura pode dar origem a uma descrição do estado. Pelo fato de existir uma solução analítica para processos Markovianos, isso indica a possibilidade de se medir o valor de  $\hat{E}[J(\theta)]$  através da distribuição do tipo de fase. Em simulação de SED, as duas abordagens analíticas conduzem o problema a aproximações (Ribeiro, 2018). No entanto, é possível caracterizar os resultados da simulação por estatísticas medidas como limites de variação e confiança. Em relação à aproximação analítica, esses métodos produzem estimativas exatas. Em outras palavras, é possível prever a precisão dos resultados quando  $\hat{E}[J(\theta)]$  é obtido usando métodos de aproximação analítica (Ribeiro, 2018).

Outra característica importante no estudo de SED estocástico e para o problema abordado nesse estudo está relacionado ao esforço computacional. Esses sistemas, por terem elementos de um problema de SED, apresentam a característica de cada amostra  $J(\theta, \omega_i)$



ser uma variável aleatória (como exemplo, a quantidade de soja movimentada em um ano de uma origem para um destino). Conforme destacado em [Cassandras e Lafortune \(2008\)](#), a terminologia de gerador de número aleatório refere-se a um mecanismo que geração de amostras independentes e identicamente distribuídas de uma distribuição uniforme. Como a base da geração de números é uma função determinística, esse mecanismo acaba sendo um gerador de números pseudoaleatórios. Assim, o resultado produzido tem um comportamento pseudoaleatório. Além disso, [Cassandras e Lafortune \(2008\)](#) destacam que a qualidade de um gerador de pseudonúmeros aleatórios depende da quantidade do esforço computacional ao qual se está disposto a empenhar.

Em [Ribeiro \(2018\)](#), é demonstrado que o uso de uma técnica híbrida que agrega a álgebra Max-Plus e cadeias de Markov apresenta fortes evidências de equivalência de resultados com ferramentas de simulação em linguagem SIMAN, a um tempo computacional bem reduzido. Este estudo é aplicado ao caso de um ciclo de transporte de carga em mina a céu aberto, com a obtenção de  $\hat{E}[J(\theta)]$  por simulação da produção de minério de ferro. Outro trabalho que contribui na análise de SED e convergência entre rede de Petri e SIMAN está em [Ribeiro \(2015\)](#), que trata da modelagem e simulação de mina a céu aberto usando rede de Petri. Este estudo aborda os processos de carga, transporte e descarga de uma mina a céu aberto modelados por uma rede de 28 nós. Os resultados encontrados apresentaram uma boa aderência em relação ao mesmo modelo simulado com a linguagem de simulação SIMAN (do inglês SIMulation ANalysis), com tempo computacional 3 vezes mais rápido. Já no estudo de [de Souza \(2019\)](#), tem-se a comparação de duas heurísticas para o estudo das estratégias de despacho em uma mina simulada usando redes de Petri temporizada estocásticas. Questões como produtividade e de posicionamento são avaliados e discutidos a fim de permitir uma síntese de políticas de despacho subótimo. A estrutura de simulação em rede de Petri demonstrou uma modelagem modular, escalável e transparente, além de fornecer boa eficiência computacional e melhores resultados do que as ferramentas disponíveis na indústria (SIMAN).

Diante dos resultados dos estudo anteriores e das características do problema a ser analisado, este trabalho fará uso de uma rede de Petri P-temporizada para modelar o fluxo logístico de soja dos terminais de transbordo aos principais portos. Para representar a incerteza na qualidade das informações obtidas, utilizar-se-ão variáveis aleatórias, cuja função de distribuição acumulada é conhecida.

#### 4.8 Análise dos Dados de Saída de um Modelo de Simulação

Conforme [Garrido \(2009\)](#), a análise dos dados de saída da execução de um modelo de simulação permite fazer uma inferência estatística válida sobre o comportamento médio inicial e de longo prazo do sistema, baseado na média amostral de  $N$  execuções

da simulação. Esta análise de saída pode ser vista como a verificação dos dados gerados por uma simulação para prever o desempenho do sistema ou comparar o desempenho de dois ou mais projetos de sistemas. Como a simulação é um experimento de amostragem estatística baseada em computadores, faz-se necessário utilizar técnicas estatísticas para entender seus resultados. Em simulações estocásticas, várias replicações são necessárias. A saída de uma única execução é interpretada como uma amostra de tamanho 1. A análise de saída é necessária porque os dados de uma simulação possuem variabilidade aleatória quando da utilização de geradores de números aleatórios, ou seja, dois diferentes fluxos de números aleatórios produzirão dois conjuntos de saída que (provavelmente) serão diferentes. A principal ferramenta estatística utilizada para esta análise é o intervalo de confiança sobre o estimador da esperança (Maia, 2022). Para algumas das simulações, os dados de saída são autocorrelacionados e os processos são não-estacionários. A análise estatística (de saída) determina:

- A estimativa da esperança e variância de variáveis aleatórias, ou;
- O número de observações necessárias para atingir a precisão desejada dessas estimativas.

#### 4.8.1 Medidas de Desempenho

Os dados de saída dos modelos de simulação são usados para avaliar as medidas de desempenho de um sistema. Estes dados contém os valores das variáveis aleatórias, os tempos de ocorrência destes valores (eventos) e todos os outros dados sobre o estado do sistema que está sendo simulado (Garrido, 2009). As medidas de desempenho ou estatísticas resumidas refletem as características do processo estocástico que está sendo modelado. As medidas mais comuns utilizadas para representar os resultados das simulações são:

- A estimativa do valor esperado, que reflete a característica fundamental dos dados;
- O desvio padrão, que é o índice de dispersão mais comum para resumir a variabilidade dos dados;
- Gráfico de frequência, ou histograma, que é a maneira mais simples de representar a distribuição do dados.

A estimativa do valor esperado e o desvio padrão podem ser calculados a partir do armazenamento de valores da variável aleatória enquanto a simulação é executada.

### 4.8.2 Comparando Amostra de Dados

Para se obter estimativas confiáveis das medidas de desempenho de interesse, certas análises estatísticas dos dados coletados devem ser realizadas (Garrido, 2009). Dois desses métodos de análises são:

- Estimativa pontual, que é um valor único dos dados da amostra de interesse;
- Estimativa de intervalo, que é um par de valores,  $[l, u]$ , dos dados da amostra, também chamado de intervalo de confiança.

Com a estimativa do intervalo, o parâmetro desejado a ser estimado encontra-se entre os dois valores,  $l$  e  $u$ , que definem o intervalo com uma determinada probabilidade. A estimativa pontual e do intervalo são necessárias para uma significativa interpretação dos dados. É de suma utilidade a obtenção de um intervalo de confiança estreito com a quantidade dados (contida neste intervalo) com alta probabilidade de ocorrência (Garrido, 2009). Por exemplo, a média da amostra,  $\bar{x}$ , é uma aproximação (estimativa) da média da população  $\mu$ . Se houver um número finito,  $n$ , de amostras, então haverá  $n$  estimativas da média. Uma vez que não é possível obter o valor exato da média da população, uma abordagem seria encontrar a probabilidade de que a média da população esteja dentro um certo intervalo  $[l, u]$ . Esta probabilidade é expressa como:

$$P[l \leq \mu \leq u] = 1 - q \quad (4.16)$$

O intervalo  $[l, u]$  é chamado de intervalo de confiança, e o valor  $1 - q$  é chamado de coeficiente de confiança. Este método consiste em determinar os limites do intervalo e encontrar a probabilidade de que a média da população ( $\mu$ ) esteja dentro desse intervalo (Garrido, 2009).

Como apontado por Garrido (2009), os resultados das simulações dependem de dois tipos de entrada. Primeiro, os parâmetros do sistema, também chamados de parâmetros de configuração, como por exemplo, o número de terminais de transbordo. Em segundo, os parâmetros de carga de trabalho, que são amostras aleatórias de várias distribuições de probabilidades, como por exemplo, tempo entre chegadas de cargas, períodos de descarga de grãos, entre outros.

É importante saber diferenciar os efeitos das variações das amostras aleatórias e os efeitos dos parâmetros de configuração. Caso contrário, a interpretação dos resultados não será correta.

Para se obter uma maior precisão das estimativas de medidas de desempenho, são usados métodos de redução de variância.

### 4.8.3 Inferência Estatística

A inferência estatística é um conjunto de métodos que auxilia um tomador de decisão a tirar conclusões sobre uma população a partir de uma amostra específica (Garrido, 2009).

Existem dois grupos principais de métodos:

- Teste de hipóteses, que é usado na tomada de decisão sobre uma variável de análise;
- Estimativa, que envolve o estabelecimento de um grau de precisão associado a um ponto estimado.

As estimativas pontuais são medidas que representam características de uma população/distribuição, como  $\mu$  e  $\sigma^2$ , e são chamadas de parâmetros. Geralmente, esses parâmetros populacionais são desconhecidos, portanto, eles podem ser estimados a partir de uma amostra. Como isso, estima-se um parâmetro por um único número, no qual esse processo é denominado estimativa pontual. Por exemplo,  $\bar{x}$  é uma estimativa de  $\mu$  e  $S^2$  é uma estimativa de  $\sigma^2$ . Ao se fazer inferências estatísticas sobre a média da população, o objetivo é fazer uma inferência estatística válida sobre o valor da média  $\mu$  com base no valor da estimativa da amostra,  $\bar{x}$ .

### 4.8.4 Intervalo de Confiança

Um intervalo de confiança é uma estimativa de intervalo para um parâmetro que especifica um nível de confiança que fornece uma forma de quantificar a imprecisão (Garrido, 2009). Um procedimento de intervalo de confiança tem por objetivo formar um intervalo, com pontos determinados pela amostra, que irá conter ou "cobrir" o parâmetro de destino com uma pré-especificada (alta) probabilidade, chamada de nível de confiança. O Teorema Central do Limite (TCL) diz que, à medida que aumentamos o número de amostras ( $N \geq 30$ ), a distribuição das médias será, aproximadamente, normalmente distribuída. Para aplicar o TCL, Garrido (2009) diz que:

- Cada execução de um modelo de simulação estocástica pode ser considerada uma única amostra;
- Cada replicação de um modelo é independente, onde as replicações são realizadas usando diferentes fluxos de números aleatórios, produzindo outro ponto de amostra.

### 4.8.5 Cálculo do Intervalo de Confiança

Um intervalo de confiança de  $100(1 - \alpha)$  por cento, para  $0 < \alpha < 1$  da média, é um intervalo de valores que vai de um limite inferior a um limite superior, em que pode-se ser  $100(1 - \alpha)$  por cento confiante de que a verdadeira média da população está nesse intervalo (Garrido, 2009). A quantidade  $\alpha$ , comumente é chamada de nível de significância. Por exemplo, para uma confiança de 95%,  $\alpha = 0,05$ . A equação a seguir é utilizada para calcular o intervalo de confiança:

$$\bar{X} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2}{n}} \quad (4.17)$$

Na equação (4.17), tem-se:

$\bar{X}$  é média da amostra;

$n$  é o número de replicações;

$S$  é o desvio padrão da amostra;

$t_{n-1, 1-\alpha/2}$  é o valor da tabela da distribuição t.

Conforme Garrido (2009), para um intervalo de confiança, o nível de precisão pode ser calculado desde que o número de replicações independentes seja conhecido *a priori*. Para se obter um intervalo de confiança com uma precisão especificada, o número de replicações necessárias deve ser calculado até se obter um nível especificado de precisão. Este procedimento utiliza metade do comprimento de um intervalo de confiança de  $100(1 - \alpha)$  por cento. O número de replicações a serem executadas é calculado com base no quão preciso se deseja que a média da amostra de suas réplicas possa ser. A precisão é uma medida do quão perto a média da amostra está para o verdadeiro desempenho médio de longo prazo do sistema. A fórmula 4.18 a seguir é utilizada para calcular o número de réplicas a serem executadas.

$$N = \left( \frac{t_{n-1, 1-\alpha/2} S_n}{e} \right)^2 \quad (4.18)$$

Na equação (4.18), tem-se que:

$N$  é o número de replicações a serem executadas;

$n$  é o número de replicações já feitas em uma execução piloto;

$S_n$  é o desvio padrão das  $n$  replicações piloto;

$e$  é a precisão desejada na média da amostra;

$t_{n-1, 1-\alpha/2}$  é o valor da tabela da distribuição t.

Quando se trata de simulação, os dados de entrada são variáveis aleatórias provenientes de uma distribuição de probabilidade. Assim, os dados de saída também são aleatórios, ou seja, existe uma variância associada aos dados de saída desses modelos estocásticos. Quanto mais variância, menor é a precisão do resultado. Uma forma de

reduzir a variância é simular por mais tempo e gerar mais replicações segundo [Kelton et al. \(2002\)](#).

Com o aumento do número de simulações, o sistema tende a convergir para o estado estacionário. Assim, pela lei dos grandes números, ocorre o aumento da estimativa da variável convergir para seu valor verdadeiro. Por consequência, o erro da estimativa em um número finito de simulações pode ser obtido pelo teorema central do limite. Ao se utilizar números pseudo-aleatórios, apesar da simplicidade, demandaria muito tempo computacional para se obter a convergência da variável durante a simulação. Assim, recorre-se as técnicas de redução de variância no intuito de aumentar a eficiência do método. Essas abordagens auxiliam na determinação do número mínimo de replicações, de forma a reduzir o intervalo de confiança dos resultados de saída, conforme apontado por [Kelton et al. \(2002\)](#).

#### 4.8.6 Simulação Terminal e não Terminal

Segundo [Law \(2006\)](#), uma simulação, ao ser avaliada sob o ponto de vista da análise de saída, pode ser classificada em simulação terminal ou simulação não terminal. Uma simulação terminal é realizada para estudar o comportamento de um sistema sobre um determinado intervalo de tempo. Por exemplo, o comportamento de um centro logístico de carga durante o período de pico do dia. Uma simulação não terminal é realizada para estudar o comportamento médio estável ou de longo prazo de um sistema.

Em uma simulação terminal, a execução começa em um estado definido e termina quando a simulação atinge algum outro estado ou tempo definido. A maioria dos sistemas de serviços são modelados como sistemas terminais. A análise de simulações terminais envolve a realização de várias execuções de simulação usando diferentes sementes para as gerações de números aleatórios. Os dados são coletados em intervalos de tempo sucessivos durante o período de simulação.

Em uma simulação não terminal, o comportamento médio de longo prazo de um sistema é analisado. Nesta análise, uma duração adequada para o período de simulação precisa ser definido. A simulação é então executada para reunir dados para a análise estatística do comportamento em estado estacionário do sistema. As simulações sem fim começam com um aquecimento ou período transiente e move-se gradualmente para um estado estacionário ([Garrido, 2009](#)).

Como já destacado anteriormente, processos estocásticos reais geralmente não possuem distribuições de estado estacionário, uma vez que as características de estado dos sistemas mudam ao longo do tempo. Assim, para se estudar um sistema, são utilizados modelos de simulação (que são abstrações da realidade) que abordam distribuições de estado estacionário, quando se avalia uma característica de uma operação a longo prazo,

sem que esta varie ao longo do tempo. Dessa forma, a simulação para um sistema particular pode ser tratada, tanto por um sistema terminal, quanto um não terminal. Tal abordagem depende do objetivo do estudo de simulação, como apontado por [Law \(2006\)](#).

#### 4.9 Simulador de Rede de Petri P-temporizada

A simulação é uma das abordagens mais utilizadas como auxílio à tomada de decisão, uma vez que possibilita construir a operação de um processo ou todo um sistema, em um computador. Além disso, consegue tratar dados aleatórios interdependentes e discretos ([Law, 2006](#); [Chwif e Medina, 2014](#)). Com a utilização de simulação, vários experimentos podem ser realizados com um custo operacional muito menor em comparação a testes com materiais e condições reais.

Uma primeira abordagem do simulador RdP P-temporizada pode ser vista em [Oliveira \(2021\)](#). Esta ferramenta, desenvolvida em *Python*, sofreu diversas modificações de forma a permitir a análise de sistemas cujas variáveis possuam características estocásticas. Além disso, foram desenvolvidas várias funções que promovem o cálculo estatístico de todo o comportamento do sistema em estudo. Para configurar a ferramenta, o utilizador tem que fornecer o tempo total da simulação, número de réplicas, o tempo de atraso estocástico associado a cada um dos lugares da rede  $\tau$ , a ordem de prioridade das transições  $T_{pr}$  e a medida do intervalo de confiança desejado. As configurações da rede em estudo, tais como a matriz  $A^+$ , matriz  $A^-$ , marcação inicial da rede  $x_0$  são provenientes do programa Pipe (plataforma gratuita e independente de edição de redes de Petri) ([Bonet et al., 2007](#)). Ao término da simulação, o utilizador terá como resposta a evolução da simulação em função de  $data_{sim}$ . Adicionalmente, são fornecidas: a ordem de disparo das transições, as marcações da rede após cada evento, número de iterações/estados, gráficos das marcações de todos os lugares da rede ao longo da simulação, gráfico de todas as transições da rede, gráfico com o comparativo do total de disparo de cada transição ao longo da simulação e os resultados estatísticos do sistema. O fluxograma da Figura 32, a seguir, resume o funcionamento da ferramenta.

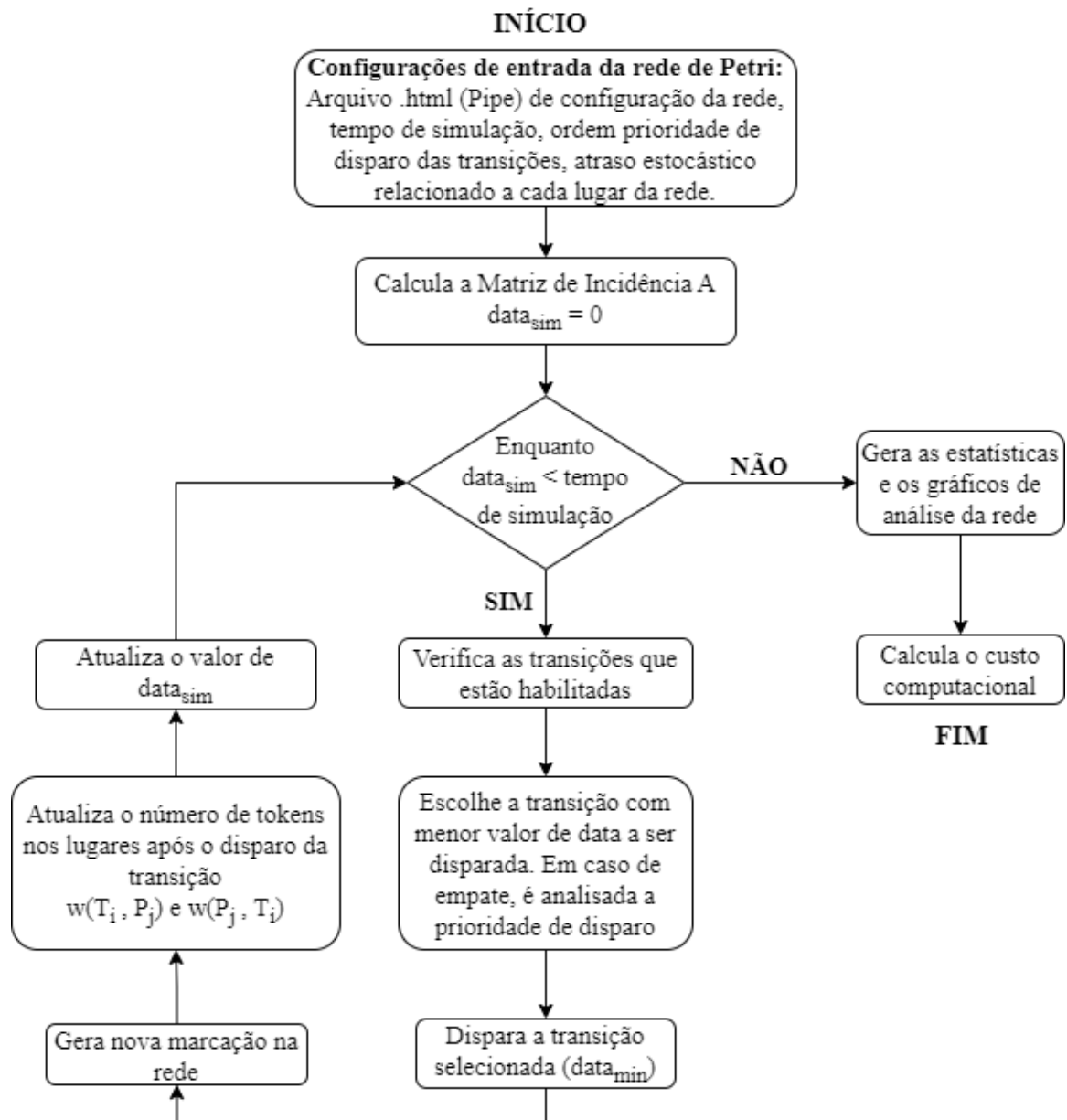


Figura 32 – Fluxograma de funcionamento do simulador de rede de Petri P-temporizada

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Oliveira (2021)

Pode-se notar que, no início da simulação, o valor de  $data_{sim}$  é igual a zero e a partir dos eventos, o valor de  $data_{sim}$  vai aumentando, levando em consideração o tempo de atraso associado a cada lugar  $\tau$ . Além disso, em  $data_{sim} = 0$ , caso haja algum *token* na rede, considera-se que eles foram alocados em  $data_{sim} = -\infty$ , caso contrário, é necessário esperar o tempo de atraso inicial  $\tau$  correspondente aos *tokens* para a simulação de fato iniciar. A simulação ocorre até que o valor de  $data_{sim}$  seja maior ou igual ao tempo de simulação preestabelecido.

Para detalhar melhor a ferramenta, um algoritmo 1, adaptado de Oliveira (2021) é apresentado.



---

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo da estrutura do simulador - adaptado de Oliveira (2021)

---

```

1 # Parâmetros de entrada da configuração da rede
2  $t_{ini} \leftarrow$  Relógio do instante
3  $x_0 \leftarrow$  Marcação inicial da rede - Arquivo .html (Pipe)
4  $A^- \leftarrow$  Matriz de incidência de retirada de tokens - Arquivo .html (Pipe)
5  $A^+ \leftarrow$  Matriz de incidência de adição de tokens - Arquivo .html (Pipe)
6  $u \leftarrow$  Vetor linha para as transições
7  $P_{temp} \leftarrow$  Estrutura do relógio para os lugares
8  $T_{pr} \leftarrow$  Vetor com as prioridades das transições
9  $A \leftarrow A^+ - A^-$  Matriz de incidência
10  $data_{sim} \leftarrow 0$  Data inicial
11 # Repetir enquanto  $data_{sim} < t_{simul}$ 
12 while  $data_{sim} < t_{simul}$  do
13      $Transitions\_enabled \leftarrow$  Retorna as transições habilitadas
14      $Transition \leftarrow$  Retorna a transição a ser disparada
15      $data_{sim} \leftarrow$  Atualiza o valor de data
16      $x \leftarrow$  Nova marcação da rede
17      $Marking \leftarrow$  data dos tokens acrescentados nos lugares após disparo da transição
18 end
19  $t_{simul} \leftarrow$  Tempo total de simulação
20  $C_{comp} \leftarrow t_{simul} - t_{ini}$ 
21 Geração de gráficos e resultados estatísticos

```

---

Considerando a estrutura do fluxograma na Figura 32 e do pseudocódigo 1, após a inserção das configurações da rede, a simulação pode ser iniciada. A partir das informações das matrizes  $A^+$  e  $A^-$ , calcula-se a matriz de incidência  $A$  conforme equação 4.12. O valor inicial de  $data_{sim}$  é igual a 0. Em seguida, inicia-se a estrutura de repetição que permanecerá ativa enquanto o valor de  $data_{sim}$  for menor que o valor do tempo de simulação escolhido para o problema. Para verificar quais transições estão habilitadas, é utilizada a equação 4.13. Se as condições da definição 4 for atendida, significa que a transição está habilitada para disparar. Posteriormente, é escolhida aquela transição que, após estar habilitada para disparo, apresentar o menor  $data_{sim}$ . Caso haja um empate no valor de  $data_{sim}$  entre as transições habilitadas, é analisada a ordem de prioridade escolhida pelo usuário e, caso o usuário opte por não ter nenhuma prioridade ou as transições habilitadas apresentem a mesma prioridade, é feito um sorteio para verificar a transição a ser disparada. Após a transição escolhida ser disparada, a partir da equação 4.14, tem-se a nova marcação da rede. Os *tokens* dos lugares  $w(P_i, T_i)$  são retirados e é atualizado o tempo de atraso  $\tau_i$  dos *tokens* que entram nos lugares  $w(T_j, P_i)$ . Se um lugar  $P_i \in P$  tiver mais de um *token*, é considerada a lógica FIFO - *First In First Out* para a evolução dinâmica. Esse processo se repete até o fim do *loop*, ou seja, até que o valor de  $data_{sim}$  seja maior que o tempo de simulação. Finalmente, são gerados gráficos mostrando a variação dos *tokens* em cada um dos lugares da rede em função dos valores de  $data_{sim}$  alcançados e os resultados

estatísticos. Por fim, é obtido o custo computacional para a simulação. Assim, a partir da Figura 32 e do pseudocódigo 1, pode-se entender a lógica adotada para a implementação do simulador genérico de rede de Petri P-temporizada estocástico.

A utilização de um simulador, no presente estudo, tem como finalidade tratar a dinâmica do fluxo logístico da soja da origem, seguindo pelos terminais de transbordo até os principais portos do Brasil. Para isso, fez-se uso da abordagem de rede de Petri P-temporizada com prioridade de disparo nas transições, no qual a temporização nos lugares segue uma abordagem estocástica.

Na Seção 4.10 a seguir, será apresentado um teste de validação do simulador RdP P-temporizada a partir dos resultados de duas outras abordagens conhecidas de modelagem de SEDs, com o propósito de verificar a efetiva aderência dos resultados da ferramenta desenvolvida.

#### 4.10 Teste Comparativo do Simulador RdP P-temporizada

Nesta seção é apresentado os resultados obtidos do simulador RdP P-temporizada estocástico comparativamente às duas abordagens de modelos de estudo de rede de petri: modelo analítico que utiliza Cadeias de Markov e modelo computacional via álgebra Max-Plus.

O sistema proposto para análise é um serviço do tipo cliente/servidor, que possui um espaço de espera  $F$  com capacidade máxima de dois clientes e um servidor de atendimento  $S$  com capacidade unitária. A disciplina de atendimento é FIFO, no qual o primeiro cliente a entrar é o primeiro a sair.

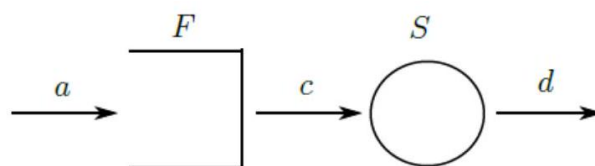


Figura 33 – Representação do sistema de serviço

Fonte: Maia (2021)

Para este sistema, consideramos os seguintes eventos:

- O evento  $a$  indica a chegada de clientes na fila;
- O evento  $c$  indica a admissão de clientes pelo servidor;
- O evento  $d$  indica a saída de clientes do serviço.

A Figura 34 representa a modelagem do sistema por Rede de Petri, tratada como um modelo P-temporizada no qual os tempos  $V_i$  indicam tempos aleatórios mínimos de permanência dos *tokens* nos lugares indicados.

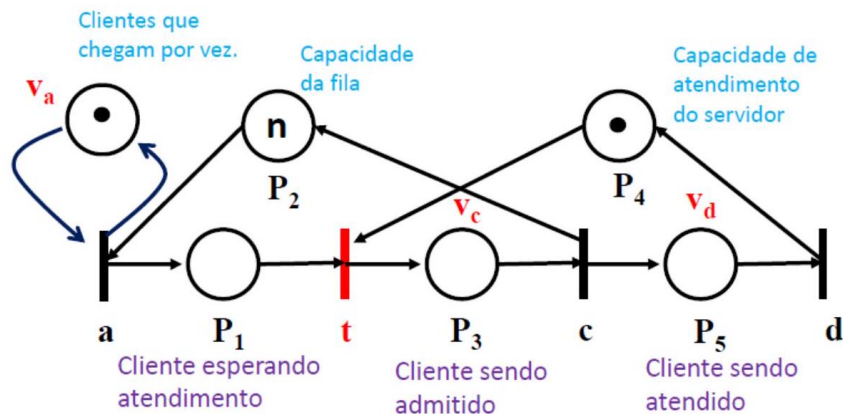


Figura 34 – Sistema de serviço representado por Rede de Petri

Fonte: Maia (2021)

Nesta representação, tem-se:

- A transição  $a$  indica a chegada de clientes na fila, com o lugar associado ao tempo  $V_a$ ,
- A transição  $c$  indica a admissão de cliente pelo servidor, com o lugar associado ao tempo  $V_c$ ,
- A transição  $d$  indica a partida de cliente do sistema, com o lugar associado ao tempo  $V_d$ ,
- A transição  $t$  indica que um cliente será admitido no servidor quando este estiver desocupado.

Para o modelagem do sistema, estabelecem-se que os tempos de vida  $V_a$  e  $V_c$  associados aos eventos de chegada e admissão de clientes obedecem distribuições exponenciais com taxas conhecidas  $\lambda a$  e  $1000\lambda a$ , respectivamente, sendo calculados através da Equação 4.19:

$$F(v_i) = P[V_i \leq v_i] = 1 - e^{-\lambda_i v_i} \quad (4.19)$$

Já o tempo de vida  $V_d$  associado ao evento de saída obedece uma distribuição hypoexponencial, com média  $\mu = 1,1$  e desvio padrão  $\sigma = 1,5$ . Conforme aponta Maia (2021), distribuições diversas para tempos de vida podem ser expressas em termos de

distribuições exponenciais, sendo um tempo de vida  $V$  associado a um evento, decomposto da seguinte forma:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (4.20)$$

Para o caso em questão, tem-se:

$$V_d = V_{d1} + V_{d2}. \quad (4.21)$$

Como o coeficiente de variação é menor que um, ou seja  $\frac{\sigma}{\mu} < 1$ , as taxas  $\lambda_i$  são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_{N-1}} &= \frac{\alpha + \sqrt{2\beta^2 - \alpha^2}}{2}, \\ \frac{1}{\lambda_N} &= \frac{\alpha - \sqrt{2\beta^2 - \alpha^2}}{2}, \end{aligned} \quad (4.22)$$

sendo  $\frac{\mu^2}{\sigma^2} \leq N < 1 + \frac{\mu^2}{\sigma^2}$ ,  $\alpha = \frac{2\mu}{N}$  e  $\beta^2 = \sigma^2 - (N-2)\frac{\mu^2}{N^2}$ .

Assim, a rede de Petri terá uma alteração no lugar  $P5$ , sendo substituído por dois novos lugares, conforme exibido na Figura 35, sendo que  $V_{d1}$  está relacionado ao  $\lambda_{d1}$  e  $V_{d2}$  ao  $\lambda_{d2}$ .

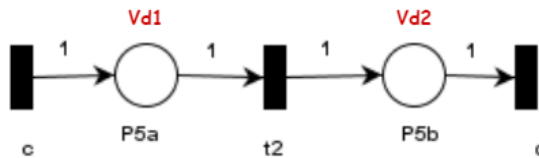


Figura 35 – Alteração realizada no lugar P5

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.10.1 Modelo Analítico

Um autômato estocástico é uma estrutura geral utilizada para representar um Sistema a Eventos Discretos - SED. [Cassandras e Lafortune \(2008\)](#) apresentam uma introdução às técnicas de simulação para SEDs.

Um resultado importante assegura que, se os tempos de vida associados aos eventos obedecem a uma distribuição exponencial, pode-se obter uma Cadeia de Markov equivalente que apresenta o mesmo comportamento dinâmico.

Partindo deste pressuposto, foram obtidos os autômatos modulares do espaço de fila  $F$  e do servidor  $S$  (Figura 36) e realizada a composição paralela  $F||S$  (Figura 37):

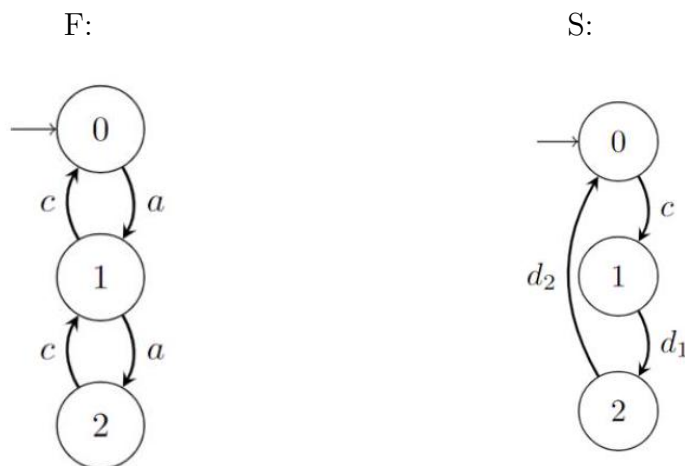


Figura 36 – Autômatos modulares do sistema de serviço

Fonte: Maia (2021)

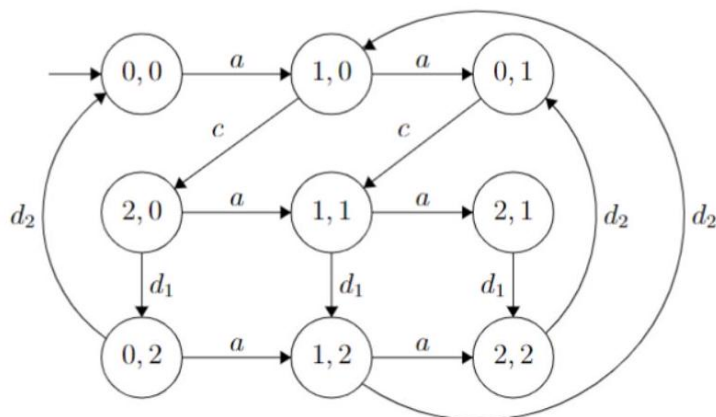


Figura 37 – Composição paralela  $F||S$

Fonte: Maia (2021)

O espaço de estados na data  $t$  é dado por:

$$X_t = \{(0, 0); (1, 0); (2, 0); (0, 1); (1, 1); (1, 2); (0, 2); (1, 2); (2, 2)\}. \quad (4.23)$$

Como o estado do sistema na data  $t$  é incerto, são definidas as probabilidades:

$$\begin{aligned} z_1(t) &= P[X_t = (0, 0)], z_2(t) = P[X_t = (1, 0)], z_3(t) = P[X_t = (2, 0)], \\ z_4(t) &= P[X_t = (0, 1)], z_5(t) = P[X_t = (1, 1)], z_6(t) = P[X_t = (2, 1)], \\ z_7(t) &= P[X_t = (0, 2)], z_8(t) = P[X_t = (1, 2)], z_9(t) = P[X_t = (2, 2)]. \end{aligned}$$

Nesse caso, é mostrado que se pode representar o autômato estocástico  $F||S$  como uma Cadeia de Markov (Figura 38).

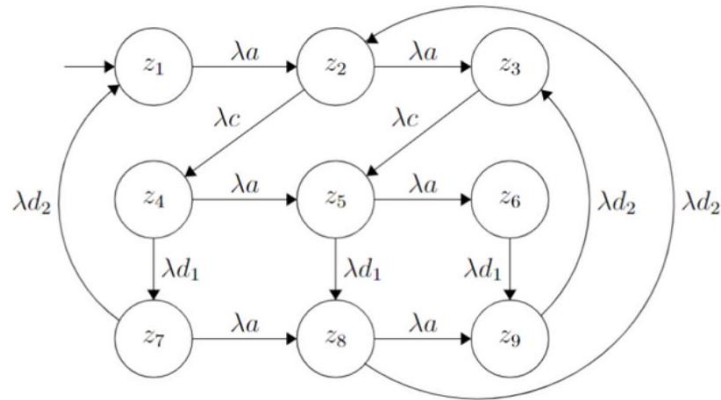


Figura 38 – Cadeia de Markov correspondente

Fonte: Maia (2021)

De posse da cadeia de Markov correspondente, obtém-se o sistema de equações de balanço de fluxo para as probabilidades  $z_i$ :

$$\begin{aligned}
 -\lambda a z_1 + \lambda d_2 z_7 &= 0 \\
 -(\lambda a + \lambda c) z_2 + \lambda a z_1 + \lambda d_2 z_8 &= 0 \\
 -\lambda c z_3 + \lambda a z_2 + \lambda d_2 z_9 &= 0 \\
 -(\lambda a + \lambda d_1) z_4 + \lambda c z_2 &= 0 \\
 -(\lambda a + \lambda d_1) z_5 + \lambda a z_4 + \lambda c z_3 &= 0 \\
 -\lambda d_1 z_6 + \lambda a z_5 &= 0 \\
 -(\lambda a + \lambda d_2) z_7 + \lambda d_1 z_4 &= 0 \\
 -(\lambda a + \lambda d_2) z_8 + \lambda a z_7 + \lambda d_1 z_5 &= 0 \\
 z_1 + \dots + z_9 &= 1
 \end{aligned}$$

O sistema de equações foi construído no modelo matricial  $Qz = b$  e as probabilidades  $z_i$  calculadas através da equação:

$$z = Q^{-1}b.$$

Bolch et al. (2006) apresentam diferentes técnicas para análise de desempenho de SEDs estocásticos utilizando modelos analíticos. Para avaliar o desempenho desejado, foram calculados a taxa de admissão e o número médio de clientes na fila dados pelas Equações 4.24 e 4.25 :

$$\lambda_{adm} = \lambda_c \times (z_2 + z_3), \quad (4.24)$$

$$E[x] = 1 \times (z_2 + z_5 + z_8) + 2 \times (z_3 + z_6 + z_9). \quad (4.25)$$

E, finalmente, o tempo médio de espera de clientes na fila é calculado pela lei de *Little*:

$$E[w] = \frac{E[x]}{\lambda_{adm}},$$

sendo  $E[w]$  o tempo médio de espera na fila,  $E[x]$  o número médio de clientes esperando atendimento e  $\lambda_{adm}$  a taxa de admissão de clientes.

### 4.10.2 Modelo Álgebra Max-Plus

Nesta sessão é apresentada a modelagem do sistema através da Álgebra Max-Plus cujo objetivo é obter as equações que representam a dinâmica do sistema analisado. Modelagem de sistemas via álgebra Max-plus podem ser vistas em [Morais e Maia \(2023\)](#) e [Goverde \(2007\)](#), bem como detalhes dos operadores em [Maia et al. \(2011\)](#). Para o caso em questão, foi necessário realizar uma modificação na rede de Petri apresentada inicialmente, criando-se uma transição temporária  $b$  associada ao tempo de chegada de clientes  $V_a$ , como apresentado na Figura 39, a seguir.

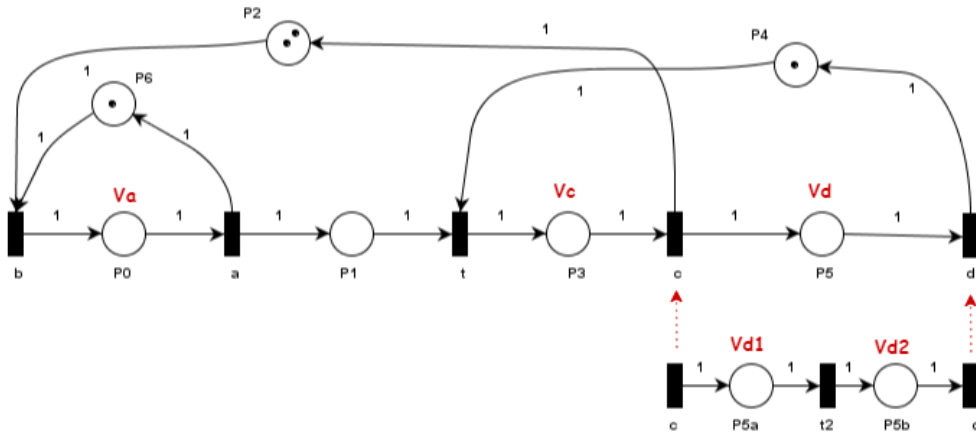


Figura 39 – Rede de Petri modificada e representativa do sistema

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dessa melhor avaliação do sistema, obtiveram-se as equações Max-Plus finais, como descritas a seguir:

$$a(k) = V_a \otimes a(k - 1) \oplus V_a \otimes c(k - 2), \tag{4.26}$$

$$c(k) = V_c \otimes a(k) \oplus d(k - 1), \tag{4.27}$$

$$d(k) = (V_{d1} + V_{d2}) \otimes c(k). \tag{4.28}$$

O tempo de espera do  $k$ -ésimo cliente  $w(k)$  pode ser obtido utilizando-se as Equações 4.26 e 4.27, o que resulta na Equação 4.29 a seguir:

$$w(k) = c(k) - a(k) \quad (4.29)$$

O próximo passo foi calcular o desvio padrão  $\sigma$  (Equação 4.30) e obter um intervalo de confiança em torno do parâmetro de interesse  $\theta_N$  (média do tempo de espera para  $N$  clientes). Assim, é possível saber o quão próximo estamos do valor real de  $\theta$  ao obter sua estimativa.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{r=1}^R \frac{(\theta_N(r) - \theta)^2}{R(R-1)}}, \quad (4.30)$$

com  $R$  sendo o número de rodadas de simulação.

Para encontrar o intervalo de confiança, foi utilizada a Equação 4.31, ao nível de significância  $\alpha = 5\%$  e distribuição  $t$ -student  $t_{(R-1), \frac{\alpha}{2}} = 2,262$ :

$$\theta_N(r) - t_{(R-1), \frac{\alpha}{2}} \sigma(\theta_N(r)) \leq \theta \leq \theta_N(r) + t_{(R-1), \frac{\alpha}{2}} \sigma(\theta_N(r)). \quad (4.31)$$

### 4.10.3 Modelo Simulador RdP P-temporizada Estocástico

Para a representação e obtenção dos resultados do sistema de serviço (Figura 34) com o uso do simulador de RdP P-temporizada estocástico, foram utilizados os seguintes parâmetros de configuração da rede (Tabela 4), de acordo com sua representação na Figura 39.

Tabela 4 – Parâmetros de configuração do simulador RdP P-temporizada estocástico

| Lugar | Descrição                     | Temporização              |
|-------|-------------------------------|---------------------------|
| P0    | Chegada de clientes           | expo( $1/\lambda_a$ )     |
| P1    | Cliente esperando atendimento | 0                         |
| P2    | Capacidade da fila            | 0                         |
| P3    | Cliente sendo admitido        | expo( $1/1000\lambda_a$ ) |
| P4    | Capacidade de atendimento     | 0                         |
| P5a   | Cliente sendo atendido        | expo( $1/\lambda_{d1}$ )  |
| P5b   | Cliente sendo atendido        | expo( $1/\lambda_{d2}$ )  |
| P6    | Chegada de um cliente por vez | 0                         |

Fonte: Elaborado pelo autor

O tempo médio de espera na fila e o intervalo de confiança são obtidos segundo as Equações 4.30 e 4.31 ao término da simulação.



#### 4.10.4 Resultados dos Modelos de RdP

Para todos os modelos em comparação, o parâmetro  $\lambda_a$  foi variado dentro do conjunto:

$$\lambda_a \in \{0, 1; 0, 4; 0, 6; 1, 0; 2, 0\}.$$

Adicionalmente, foram computados os tempos de execução de cada algoritmo. Os resultados do modelo analítico são apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Resultados do modelo analítico

| Parâmetro | Tempo médio de espera na fila | Tempo de execução (s) |
|-----------|-------------------------------|-----------------------|
| 0,1       | 0.2071                        | 0.000105              |
| 0,4       | 0.8876                        | 0.000096              |
| 0,6       | 1.2894                        | 0.000095              |
| 1,0       | 1.8471                        | 0.000113              |
| 2,0       | 2.4325                        | 0.000125              |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de [Maia \(2021\)](#)

Para o modelo utilizando Álgebra Max-Plus, foram realizadas 10 réplicas com o atendimento de 10.000 clientes. Um transitório (*warm-up*) igual a 1.000 clientes também foi considerado no intuito de se encontrar o sistema em regime permanente. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do modelo Álgebra Max-Plus

| Parâmetro<br>$\lambda_a$ | Tempo médio de espera na fila | Intervalo de confiança | Tempo de execução (s) |
|--------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 0,1                      | 0.2092                        | 0.1897 - 0.2287        | 3.8244                |
| 0,4                      | 0.8851                        | 0.8425 - 0.9277        | 3.7772                |
| 0,6                      | 1.2898                        | 1.2662 - 1.3134        | 3.7612                |
| 1,0                      | 1.8398                        | 1.8020 - 1.8775        | 3.7846                |
| 2,0                      | 2.4328                        | 2.3913 - 2.4743        | 3.8016                |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de [Maia \(2021\)](#)

O modelo utilizando o simulador RdP P-temporizada estocástico seguiu as mesmas configurações do modelo Álgebra Max-Plus, de forma a obter o sistema em regime permanente. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do modelo RdP P-temporizada estocástico

| <b>Parâmetro</b><br>$\lambda_a$ | <b>Tempo médio de</b><br><b>espera na fila</b> | <b>Intervalo de confiança</b> | <b>Tempo de</b><br><b>execução (s)</b> |
|---------------------------------|--|-------------------------------|--|
| 0,1                             | 0.2176   | 0.2005 - 0.2348               | 7.9348                                 |
| 0,4                             | 0.8786   | 0.8675 - 0.8896               | 8.6002                                 |
| 0,6                             | 1.2892   | 1.2741 - 1.3043               | 8.1330                                 |
| 1,0                             | 1.8495   | 1.8338 - 1.8652               | 8.3477                                 |
| 2,0                             | 2.4288   | 2.4200 - 2.4375               | 8.8637                                 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, de acordo com os resultados apresentados, o simulador RdP P-temporizada estocástico converge para os mesmos resultados do modelo analítico e de do modelo álgebra Max-Plus para o sistema de teste em questão. Dessa forma, a ferramenta desenvolvida se mostra aderente e confiável para a geração de resultados de SEDs.

## 5 DETALHAMENTO DO ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta a metodologia, o detalhamento do problema, a proposta de um modelo de otimização sustentável para tratar a alocação de terminais no estado do Mato Grosso e uma abordagem em rede de Petri P-temporizada estocástica para o simular o fluxo de grãos dos terminais aos principais portos. Os dados para o estudo baseiam-se na investigação da produção de soja de todas as cidades do Mato Grosso para os anos de 2011 a 2021, segundo [IBGE \(2021\)](#) e projeções para 2025, segundo [IMEA \(2015, 2019\)](#). Além disso, as informações de exportação do grão do estado pelos principais portos do Brasil também são consideradas. Uma primeira etapa do estudo consiste em definir capacidades e posições candidatas para a instalação de terminais de transbordo no estado a partir de um *trade-off* econômico e ambiental, com controle dos seguintes aspectos: redução dos custos de instalação de terminais, localização estratégica nas proximidades de ferrovias e hidrovias somada a redução da distância de deslocamento de caminhões, com a promoção de redução na emissão de CO<sub>2</sub>. De posse das opções mais eficientes do *trade-off* delimitadas pela otimização, como segunda etapa, o simulador em rede de Petri se encarregará de tratar o despacho origem/destino dos terminais aos principais portos.

### 5.1 Metodologia

O estudo proposto fundamenta-se na aplicação de experimentos computacionais orientados a problemas do mundo real e de natureza estocástica. Para o caso em questão, utilizar-se-ão métodos de otimização e simulação para a análise dinâmica do comportamento logístico da exportação de soja do estado do Mato Grosso até a chegada nos principais portos.

Em uma primeira etapa, procedeu-se a revisão de literatura para compreender as pesquisas efetuadas na área e as principais técnicas empregadas, bem como as possíveis lacunas para a realização de avanços. Uma vez entendidos os desafios do tema, providenciou-se uma ampla busca na base de dados oficial do governo sobre a produção e exportação de soja dos municípios do estado do Mato Grosso. A partir desses dados, posicionou-se no mapa cada um dos 141 municípios do Mato Grosso e sua produção, além dos principais portos e modais envolvidos na logística, a fim de facilitar a visualização do problema.

Como segunda etapa, realizou-se um aperfeiçoamento do modelo de otimização proposto inicialmente por [Oliveira et al. \(2020b\)](#), cujo objetivo era encontrar a melhor localização e o dimensionamento dos terminais integradores, capazes de atender as necessidades da região com o menor custo. Essa modificação permite o tratamento do problema através de uma função objetivo de utilidade, com o uso de prioridades ou critérios, a

partir da escolha de pesos para cada dimensão/objetivo de análise. Como exemplo, uma maior prioridade pode ser aplicada no sentido de considerar a localização dos terminais de transbordo nas proximidades de ferrovias e/ou hidrovias do estado, sejam elas já implantadas, previstas ou em estudo. Para isso, é utilizada uma matriz auxiliar com valores atribuídos a cada situação e um peso associado a essa dimensão de análise. Caso o foco seja a sustentabilidade, com a prioridade na redução de emissão de CO<sub>2</sub>, um maior peso é aplicado a essa dimensão de análise.

Em uma terceira etapa, realizou-se a modelagem do sistema de fluxo de exportação em rede de Petri P-temporizada. O modelo buscou representar o envio dos grãos de soja da origem, passando pelos terminais de transbordo alocados pela otimização e seguindo até os principais portos. A representação considerou diferentes rotas que priorizam a intermodalidade para o transporte eficiente dos grãos.

Por fim, foi realizada a validação do modelo proposto de otimização e de simulação em rede de Petri empregando dados já consolidados de exportação de soja para o ano de 2021, segundo [Comex Stat \(2021\)](#) e, na sequência, executou-se a comparação dos resultados encontrados em relação à projeção de exportação para o ano de 2025 ([IMEA, 2015, 2019](#)).

Uma vez que o governo brasileiro, através do Ministério da Infraestrutura e da EPL, analisa e fomenta projetos logísticos para o Brasil, o presente estudo visa contribuir, em nível estratégico, para a designação sustentável das melhores rotas para a exportação de soja e, conseqüentemente, auxiliar a redução dos custos logísticos e emissão de CO<sub>2</sub> no processo de exportação de soja do Mato Grosso.

## 5.2 Recursos Computacionais

Para o desenvolvimento do estudo, utilizou-se um notebook com as seguintes configurações: Windows 11 Home 64 bits, processador Intel(R) Core(TM) i7-1255U, 16 GB de memória RAM e 512Gb SSD. Como linguagem de programação base, fez-se uso da plataforma Anaconda 2.0.3, com implementação em *Python(Open-source)* versão 3.8.8. Complementarmente, os softwares microsoft Excel (licença própria do autor) e SisDEA (licença própria do autor) foram utilizados como suporte para tratamento de base de dados. Cabe destacar que foram elaborados em linguagem *Python* o problema de otimização com a utilização do *solver* Gurobi (licença acadêmica) e o simulador de rede de Petri P-temporizada, seguindo o estado da arte dos conceitos em literatura de [Wang \(1998\)](#) e [Maia \(2021\)](#). Os dados de entrada/saída da otimização e da simulação, como também as informações das cidades (produção de soja, ano, latitude, longitude, outros) e a matriz distância das cidades do Mato Grosso foram manipulados no Excel. Já no SisDEA, as informações foram tratadas de forma a se obter a equação de regressão linear que fundamenta a tabela dos valores dos custos de implantação dos terminais, de acordo

com sua capacidade.

### 5.3 Detalhamento do Problema

O estudo inicia-se com um levantamento de dados reais do cenário da produção de soja envolvendo todas as 141 cidades do estado do Mato Grosso, maior produtor de soja do Brasil. De todos o municípios, 129 localidades produziram soja no ano de 2021, sendo em torno 60% de toda a produção destinada à exportação (IBGE, 2021; Comex Stat, 2021). Sem perda de generalidade, cada uma das 129 cidades do Mato Grosso que produziram soja terá contribuição similar no montante destinado à exportação, ou seja, a quantidade de soja que cada cidade do Mato Grosso destina à exportação será proporcional ao que foi produzido por ela. A Figura 40 a seguir, elaborada a partir do Google Maps, mostra um mapa com a localização geográfica de cada uma das cidades produtoras e não produtoras de soja no estado, para o ano de 2021.

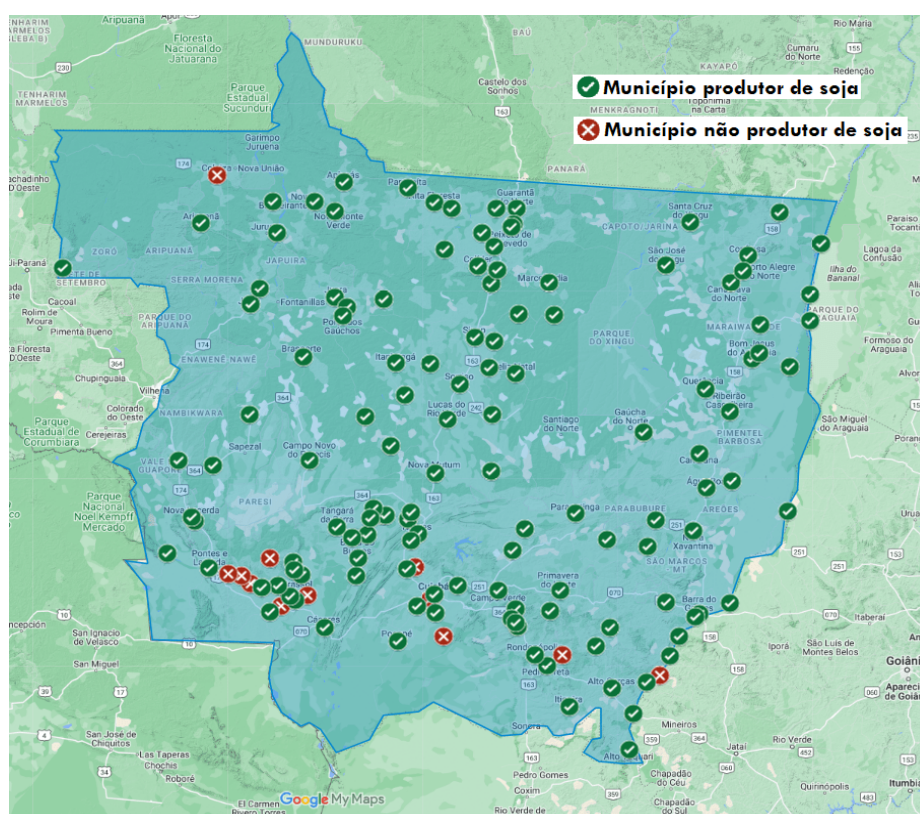


Figura 40 – Localização das 141 cidades do Mato Grosso

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o Google Maps

Para encontrar a distância rodoviária entre cada uma das 141 cidades do estado, fez-se uso de uma API da Microsoft Bing Maps<sup>2</sup>. Essa ferramenta permite encontrar a

<sup>2</sup> O Bing Maps é uma ferramenta da Microsoft que permite buscar distâncias entre cidades de forma automática, limitado a 50.000 buscas diárias gratuitas (Microsoft, 2020).

distância entre duas cidades de forma automática, utilizando as informações posicionais de latitude e longitude de cada um delas. A partir dos resultados da API, é estruturada uma matriz de dimensão  $141 \times 141$  com distâncias rodoviárias entre cada uma das cidades do Mato Grosso. Essas informações são importantes para o modelo de otimização, pois adotar-se-á uma distância máxima  $D_{max}$  a ser percorrida do município origem de produção de soja até o terminal indicado pelo modelo. O modelo de otimização proposto leva em consideração o tamanho do terminal, seu custo de implantação, indicação do melhor local para se instalar ao longo do estado e outros fatores. Assim, essa distância é atribuída ao modelo para a investigação de uma melhor estratégia de rotas rodoviárias que direcione a vazão da produção até os terminais.

A proposta tem, como uma das abordagens, a instalação de terminais intermodais nos municípios de maneira estratégica, de tal forma que possa trazer redução nos custos de transportes. Assim, a capacidade de armazenamento (em toneladas) e os custos dos terminais que podem ser implantados nas 141 localidades candidatas são outros pontos importantes a serem analisados.

Para a construção da tabela de valores dos custos de implantação dos terminais, foi seguida a base metodológica proposta pelo conjunto de normas ABNT NBR 14.653 parte 1 (procedimentos gerais), parte 2 (avaliação de imóveis urbanos) e parte 5 (avaliação de instalações e bens industriais em geral) ([Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019, 2011, 2006](#)). Essa base consiste na aplicação do método comparativo de dados, que é realizado a partir da comparação de dados de mercado que possuem características semelhantes ao bem avaliado. Assim, estruturou-se uma pesquisa com dados de companhias de logística e da mídia brasileira que possuíam informes sobre investimentos de empresas do ramo e capacidade de armazenamento de grãos. A investigação resultou em um *corpus* de 20 *websites*, cujo tema satisfazia os critérios de busca, a partir das palavras: investimento AND terminais integradores AND grãos. Desse conjunto, foram filtradas 15 informações que compuseram a amostra selecionada para a construção do modelo de estudo. Como próxima etapa, extraiu-se uma relação de valores e atributos que foram utilizados em um software específico de estatística inferencial, denominado SisDEA. Os atributos considerados foram: ‘Capacidade’, ‘Ano’, ‘Outro’ e ‘Valor Unitário’. A ‘Capacidade’, considerada variável independente e quantitativa, está relacionada com a capacidade de armazenagem de grão do terminal. O ‘Ano’, variável independente e quantitativa, refere-se ao ano de implantação desse terminal no Brasil. ‘Outro’, variável independente e quantitativa, está relacionada à atribuição do terminal, se somente para grãos ou se inclui fertilizantes, açúcar, outros. ‘Outro’ será considerado com código 0, uma vez que o terminal terá atribuição apenas para armazenamento de soja. Já o ‘Valor Unitário’, variável dependente e quantitativa, está relacionada ao custo unitário por toneladas para a implantação do terminal. O modelo de regressão linear obtido pode ser visto na equação 5.1, a seguir e resultado da significância das variáveis na Figura 41

$$\text{Valor Unitário}_{Unit/Ton} = -857.031,1943 + \frac{274.478,0851}{\sqrt{\text{Capacidade}}} + 112.679,5806 \times \ln(\text{Ano}) + 536,5991 \times \text{Outro} \quad (5.1)$$

| Variáveis  | Transf.            | Elasticid... | t Calculado | Sig.(%) | Coef           | Média      | Mínimo    | Máximo     |
|--|--------------------|--------------|-------------|---------|----------------|------------|-----------|------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Capacidade     | 1/x <sup>1/2</sup> | -10,86%      | 2,19        | 5,32%   | 274478,085110  | 129.785,71 | 40.000,00 | 500.000,00 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Ano            | ln(x)              | 10,20%       | 2,43        | 3,56%   | 112679,580580  | 2.014,07   | 2.003,00  | 2.021,00   |
| <input checked="" type="checkbox"/> Outro          | x                  | 54,36%       | 1,84        | 9,60%   | 536,599061     | 0,36       | 0,00      | 1,00       |
| <input type="checkbox"/> Valor total (Mi)          |                    |              |             |         |                |            |           |            |
| <input checked="" type="checkbox"/> Valor Unit/Ton | y                  |              | -2,43       | 3,55%   | -857031,194259 | 1.357,08   | 364,29    | 2.150,00   |

Figura 41 – Significância das variáveis que compõem o modelo estatístico

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o SisDEA

A Figura 42 mostra a tabela com destaque para os valores observados e os estimados pelo modelo, resíduo absoluto, relativo e as métricas para identificação de *outlier*. Adicionalmente é exibido o gráfico de ajuste do modelo e o histograma da aleatoriedade da distribuição dos resíduos.

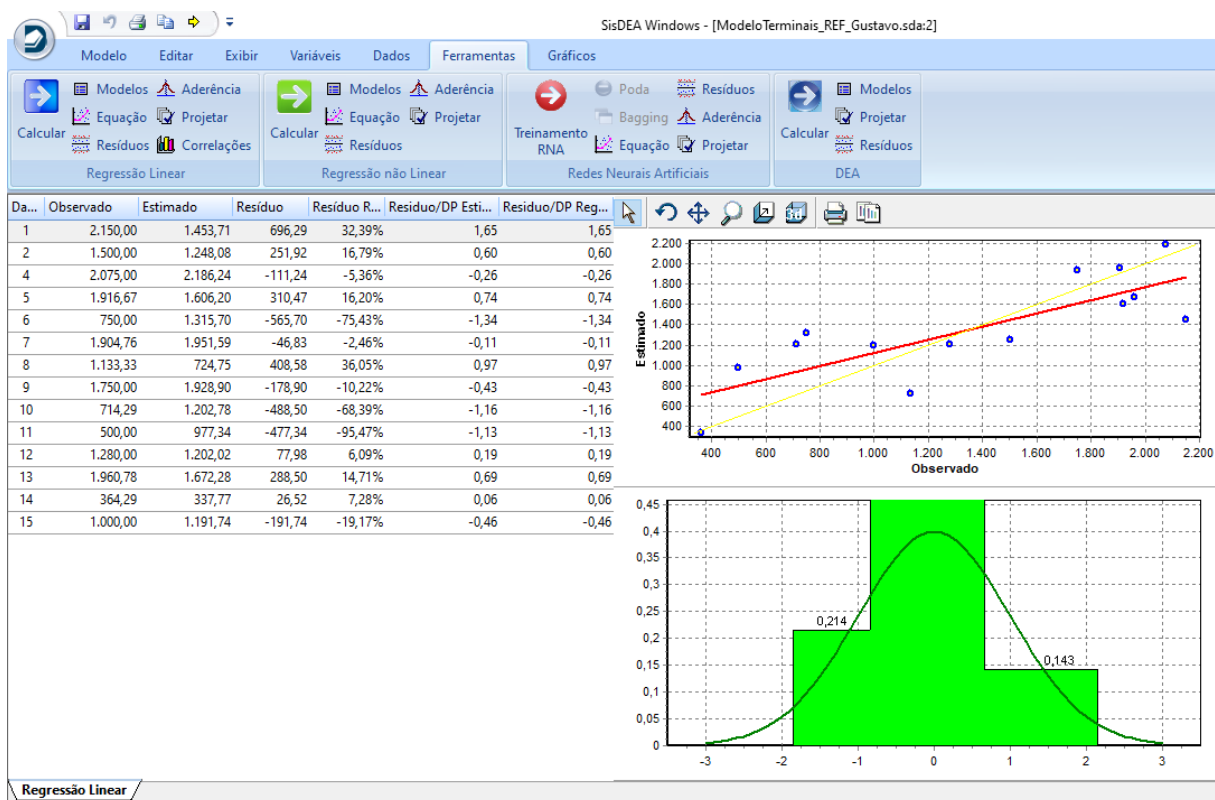


Figura 42 – Resíduos, ajuste do modelo e histograma da distribuição de resíduos do modelo

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o SisDEA

A Figura 43 a seguir mostra a tabela com resultados estatísticos para cada variável, a função estimativa e o gráfico do comportamento da estimativa para variável ‘Capacidade’. Esse gráfico indica uma economia de escala na qual, a medida que se aumenta a capacidade de armazenamento do terminal, o valor unitário de implantação por tonelada é reduzido.



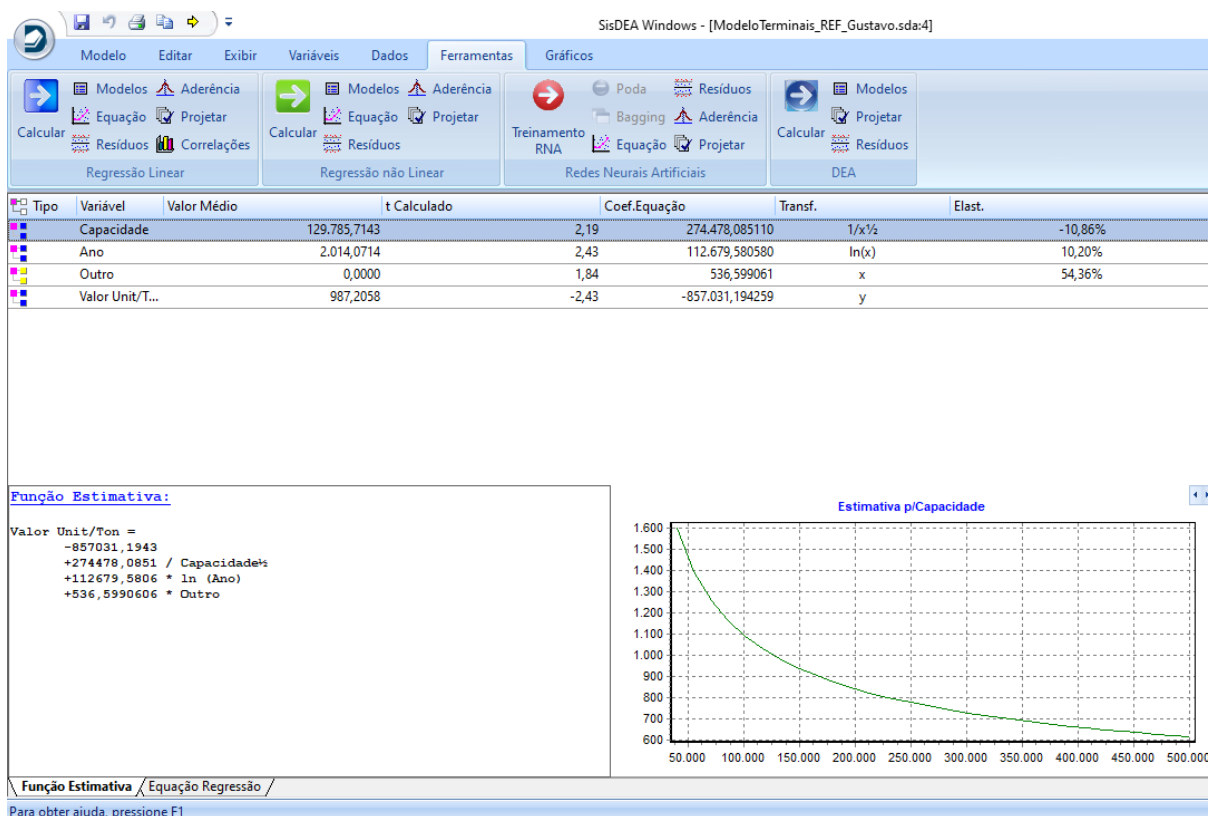


Figura 43 – Economia de escala por tipo de terminal

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o SisDEA

A Figura 44 a seguir mostra a tabela com resultados estatísticos para cada variável, a função estimativa e o gráfico do comportamento da estimativa para variável 'Ano'. Esse gráfico indica um aumento dos custos unitários provenientes de inflação, índices de construção, entre outros a medida que se aproxima da data presente.

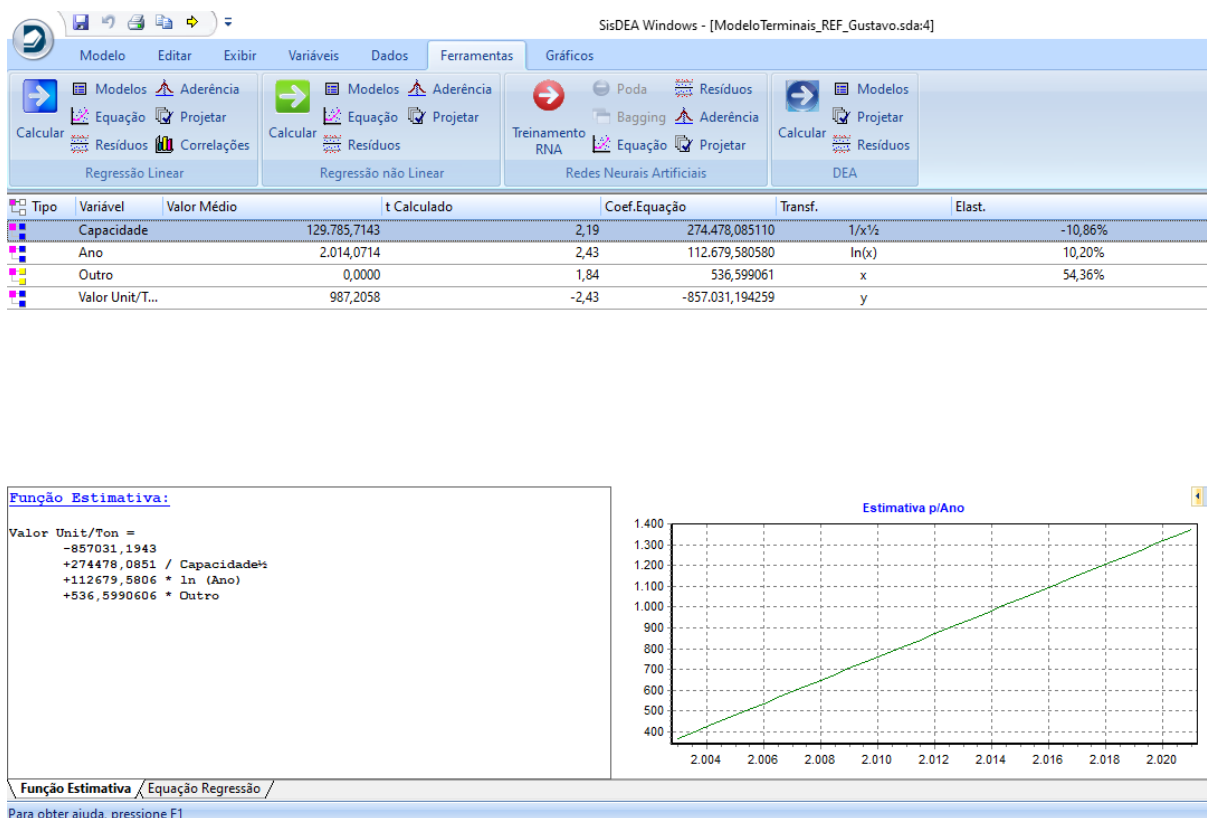


Figura 44 – Variação do valor unitário em função do ‘Ano’

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o SisDEA

A Figura 45 a seguir mostra a tabela com resultados estatísticos para cada variável, a função estimativa e o gráfico do comportamento da estimativa para variável ‘Outro’. Esse gráfico indica um aumento dos custos unitários quando o atributo ‘Outro’ altera de 0 (terminal apenas para grãos) para 1 (terminal para outros tipos de insumos, além de grãos).

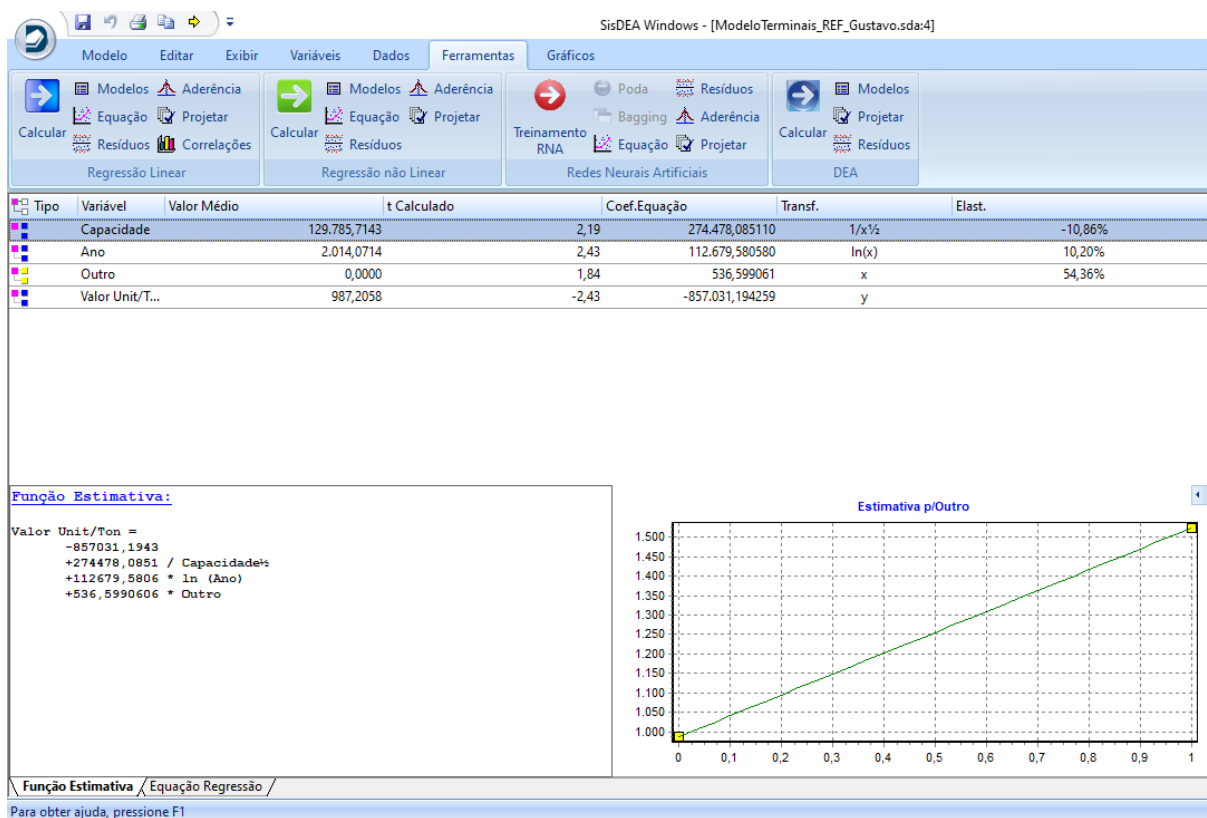


Figura 45 – Variação do valor unitário em função do atributo ‘Outro’

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o SisDEA

A Tabela 8 apresenta os custos de implantação dos terminais de acordo com o seu tamanho, a partir da equação 5.1, de forma que quanto maior o terminal, menor será o custo por tonelada, evidenciando uma economia de escala.

Tabela 8 – Tipos de terminais (com valores aproximados do mundo real para o custo de instalação no ano de 2021 e capacidade de armazenamento).

| <b>Tipo Term.</b> | <b>Cap. arma-<br/>zenamento<br/>(ton)</b> | <b>Valor inst.<br/>unit/ton. (R\$)</b> | <b>Custo Total<br/>(Milhões R\$)</b> |
|-------------------|---|--|--------------------------------------|
| T1                | 50.000                                    | 1839,78                                | 92                                   |
| T2                | 60.000                                    | 1732,83                                | 104                                  |
| T3                | 70.000                                    | 1649,70                                | 116                                  |
| T4                | 80.000                                    | 1582,70                                | 127                                  |
| T5                | 90.000                                    | 1527,20                                | 138                                  |
| T6                | 100.000                                   | 1480,25                                | 148                                  |
| T7                | 125.000                                   | 1388,62                                | 174                                  |
| T8                | 150.000                                   | 1320,97                                | 198                                  |
| T9                | 175.000                                   | 1268,40                                | 222                                  |
| T10               | 200.000                                   | 1226,03                                | 245                                  |
| T11               | 250.000                                   | 1161,23                                | 290                                  |
| T12               | 300.000                                   | 1113,40                                | 334                                  |
| T13               | 350.000                                   | 1076,23                                | 377                                  |
| T14               | 400.000                                   | 1046,26                                | 419                                  |
| T15               | 450.000                                   | 1021,44                                | 460                                  |
| T16               | 500.000                                   | 1000,44                                | 500                                  |
| T17               | 550.000                                   | 982,38                                 | 541                                  |
| T18               | 600.000                                   | 966,62                                 | 580                                  |
| T19               | 650.000                                   | 952,72                                 | 620                                  |
| T20               | 700.000                                   | 940,34                                 | 658                                  |
| T21               | 750.000                                   | 929,21                                 | 697                                  |
| T22               | 800.000                                   | 919,15                                 | 735                                  |

Fonte: Elaborado pelo autor

O Plano Nacional de Logística [EPL \(2021\)](#) documenta cenários estratégicos quanto ao desenvolvimento de ferrovias (em operação, planejadas ou em estudo), bem como sobre possível aumento na exploração da navegabilidade dos rios do Brasil. Particularmente, para o estado do Mato Grosso, foram extraídas as principais informações do [EPL \(2021\)](#) e construído o mapa ilustrativo (Figura 46), que mostra as principais ferrovias e hidrovias que servirão de rotas de escoamento de soja, além dos principais portos que serão analisados nos modelos de otimização e simulação. Os arquivos de *shapefiles* foram obtidos a partir da base do [EPL \(2018\)](#).

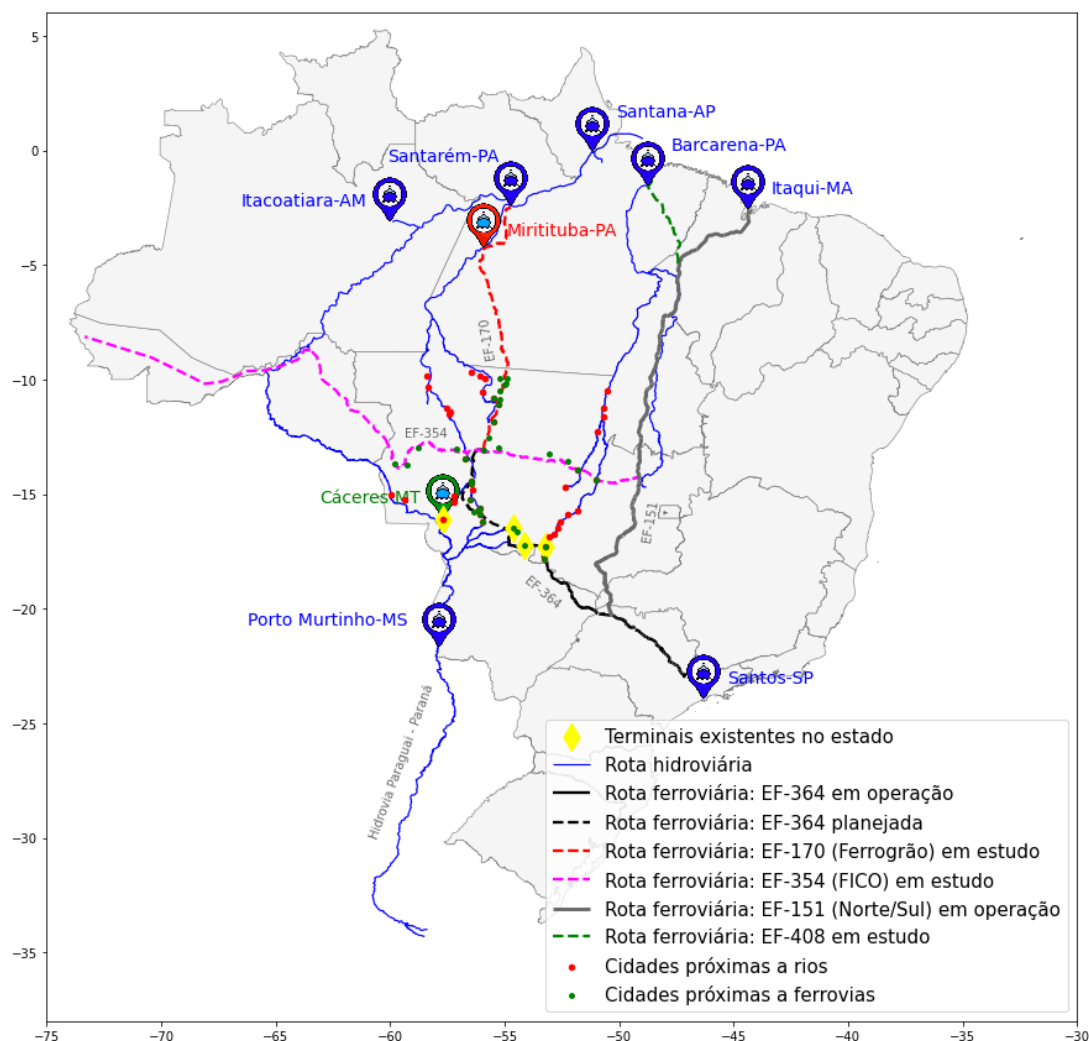


Figura 46 – Mapa representativo para o estudo do escoamento de soja do estado do Mato Grosso com localização de portos, possíveis rotas hidroviárias, ferroviárias e potenciais municípios candidatos à instalação de terminais de transbordo

Fonte: Elaborado pelo autor

Para tratar a questão das cidades com potencial para instalação de terminais intermodais, ou seja, próximas a rios e projetos ferroviários, elaborou-se uma tabela auxiliar para o modelo otimização, cujos valores se enquadram nos seguintes critérios:

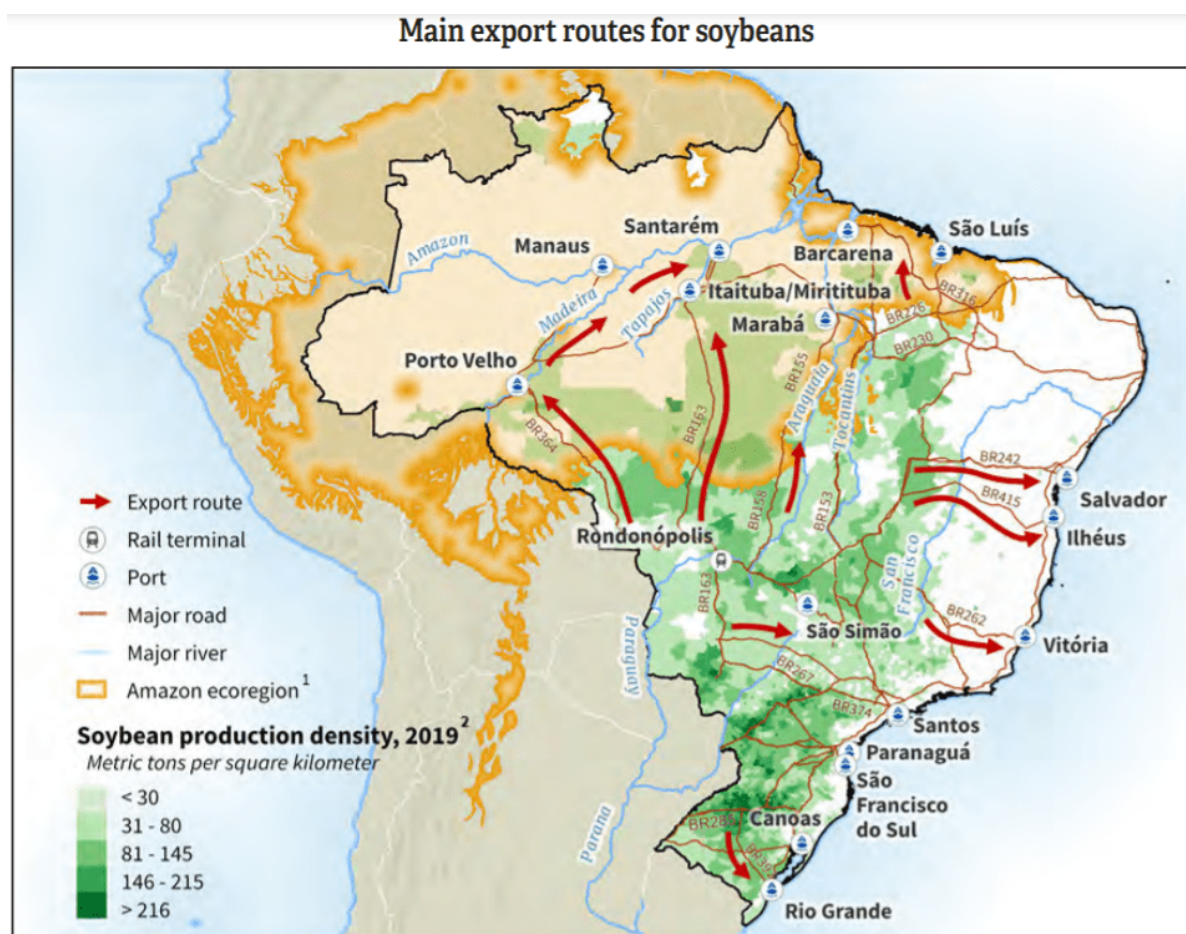
#### Potencial hidroviário

- 1000 - cidades sem potencial para instalação de terminal intermodal, por ausência de rio no município.
- 1 - cidades com potencial para instalação de terminal intermodal, pela presença de rio no município.

#### Potencial ferroviário

- 1000 - cidades sem potencial para instalação de terminal intermodal, por ausência de planejamento ou estudo de trecho ferroviário no município.
- 1 a 3 - cidades com médio potencial para instalação de terminal intermodal, pela presença de estudos de implantação de trecho ferroviário no município.
- 0,3 a 1 - cidades com alto potencial para instalação de terminal intermodal, pela presença do planejamento de implantação de trecho ferroviário no município.
- menor que 0,3 - cidades com extremo potencial para instalação de terminal intermodal, pela presença de trecho ferroviário em operação no município. Essa escala contempla cidades com terminais já implantados.

O problema das rotas da soja a nível nacional pode ser visualizado na Figura 47, que ilustra no mapa os trajetos do grão em todo o território. Nota-se que, para o estado do Mato Grosso, as principais rotas para o norte envolvem o uso de rodovias, com elevado custo de transporte.



<sup>1</sup>World Wildlife Fund.

<sup>2</sup>Brazilian Institute of Geography and Statistics—Produção Agrícola Municipal.

Source: USDA/Agricultural Marketing Service (AMS) and USDA/Foreign Agricultural Service (FAS).

Figura 47 – Principais rotas de exportação da soja brasileira

Fonte: USDA - elaborado por Salin (2021)

Já a Figura 48 a seguir, mostra as principais rotas numeradas utilizadas para a exportação da soja do Brasil no ano de 2020, novamente com destaque para os grandes trajetos rodoviários envolvidos, detalhados na Tabela 9.

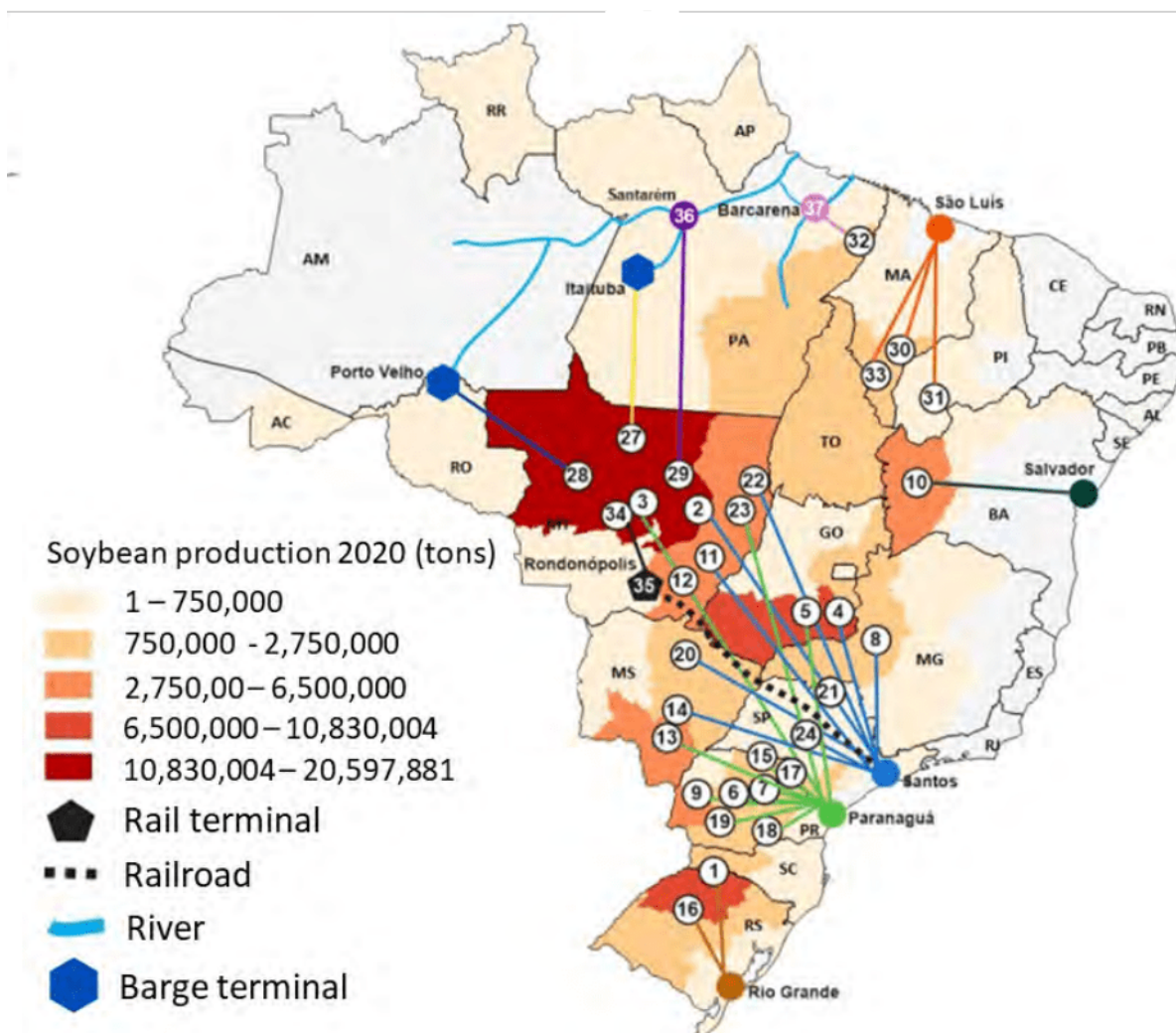


Figura 48 – Rotas numeradas de exportação da soja brasileira

Fonte: USDA - elaborado por Salin (2021)

De forma resumida, a tabela 9 sinaliza os trajetos de exportação da soja do Mato Grosso. A partir de uma breve análise desses dados, com exceção da rota 34, que tem a integração dos modos rodoviário e ferroviário na cidade de Rondonópolis, a distância percorrida por rodovias é sempre superior a 1.000 km, onerando sobremaneira os custos de transporte.

Tabela 9 – Rotas de exportação da soja do Mato Grosso - 2020

| Rota | Origem <sup>1</sup>                       | Destino                                | Distância <sup>2</sup> (km) |
|------|---|--|-----------------------------|
| 2    | Meio-Norte MT (Sorriso)                   | Santos                                 | 1.915                       |
| 3    | Meio-Norte (Sorriso)                      | Paranaguá                              | 2.031                       |
| 11   | Sudeste MT (Primavera do Leste)           | Santos                                 | 1.450                       |
| 12   | Sudeste MT (Primavera do Leste)           | Paranaguá                              | 1.569                       |
| 22   | Nordeste MT (Canarana)                    | Santos                                 | 1.529                       |
| 23   | Nordeste MT (Canarana)                    | Paranaguá                              | 1.730                       |
| 27   | Norte MT (Sorriso)                        | Itaituba                               | 1.081                       |
| 28   | Norte MT (Sorriso)                        | Porto Velho                            | 1.017                       |
| 29   | Norte MT (Sorriso)                        | Santarém                               | 1.410                       |
| 34   | Meio-Norte (Sorriso)                      | Rondonópolis<br>(terminal ferroviário) | 615                         |
| 35   | Rondonópolis MT<br>(terminal Ferroviário) | Santos                                 | 1.640                       |
| 36a  | Itaituba PA<br>(terminal Barcaça)         | Santarém                               | 361                         |
| 36b  | Porto Velho RO<br>(terminal Barcaça)      | Santarém                               | 1.603                       |
| 37   | Itaituba PA<br>(terminal Barcaça)         | Barcarena                              | 1.188                       |

Legenda: <sup>1</sup>Cidade de referência; <sup>2</sup>Da cidade de referência até o porto

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de [Salin \(2021\)](#)

Os percursos, da origem até o porto de destino, em sua grande maioria, são feitos exclusivamente pelo modo rodoviário, como visto na Figura 48 e detalhado na tabela 9. A intermodalidade ocorre: na rota 27 a 36, na qual caminhões percorrem 1.081 km até o terminal portuário em Itaituba e de lá, a carga segue 361 km por barcaça até Santarém; da rota 28 a 36b, na qual caminhões percorrem 1.017 km até o terminal portuário em Porto Velho e de lá, a carga segue 1.603 km por barcaça até Santarém; e da rota 34 a 35, na qual caminhões percorrem 615 km até o terminal ferroviário em Rondonópolis e de lá, a carga segue 1.640 km por trem por até o porto de Santos. As intermodalidades, com exceção da 34 a 35, são onerosas ao custo do transporte. A ausência de terminais intermodais é um dos maiores problemas enfrentados pela infraestrutura logística brasileira ([Monteiro et al., 2021](#); [Pera et al., 2021](#); [Rodrigue et al., 2020](#); [Santos et al., 2018](#)). Dessa forma, o presente estudo se mostra importante no sentido estabelecer a finalidade dos terminais de transbordo quanto a suas localidades e critérios de implantação, de maneira a facilitar o entendimento da sua importância no processo de exportação das *commodities* agrícolas.

Diante das oportunidades para a investigação do tema e suas contribuições, o estudo centra-se na análise dos modais destacados na região azul da Figura 49, sejam eles em operação, sejam em projeto ou em estudo.



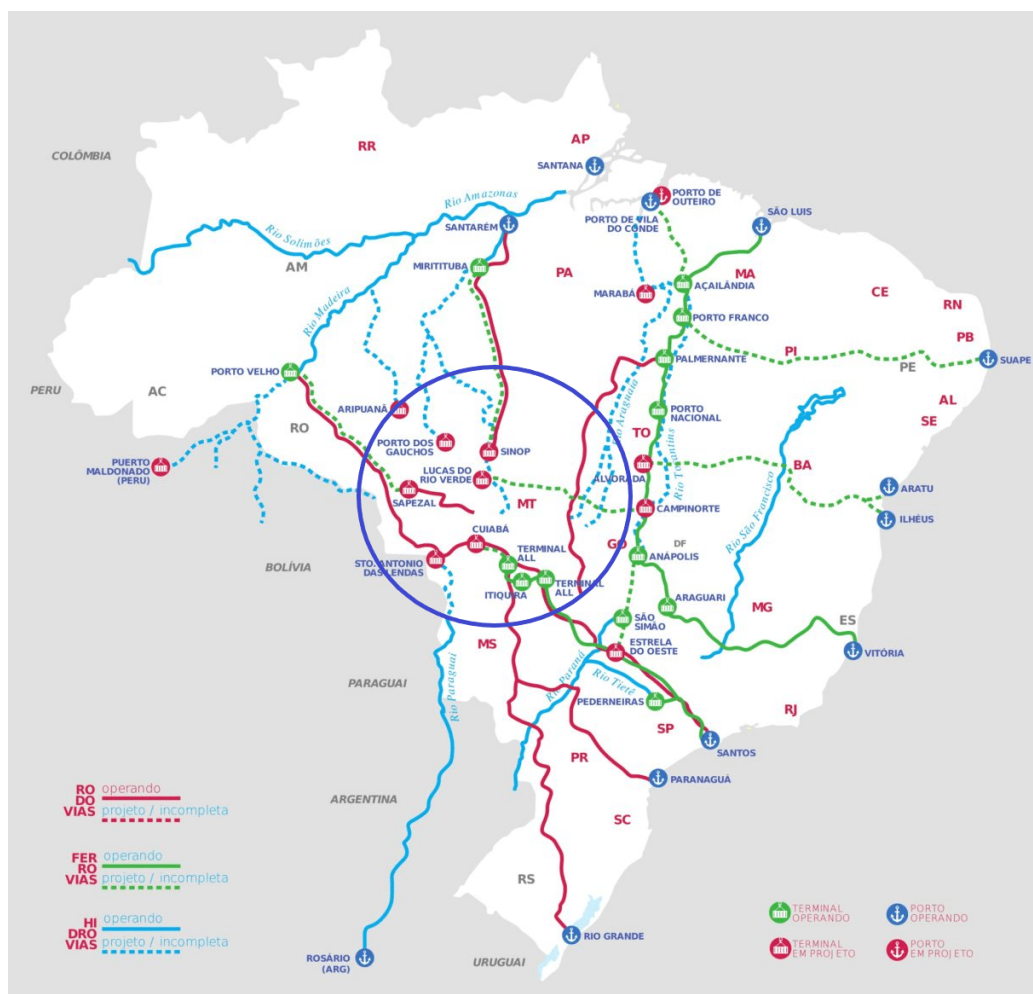


Figura 49 – Modais em operação e planejados no Brasil

Fonte: PlantProject (2018)

Considerando os investimentos previstos na matriz de transporte ferroviário e hidroviário do estado, o presente estudo visa contribuir para a determinação de rotas econômicas e localizações ótimas de terminais de transbordo que possam atender a demanda do estado para a exportação de grãos.

#### 5.4 Definição dos Portos e Rotas dos Terminais Existentes no Estado

Uma etapa importante do estudo consiste em definir os portos exportadores utilizados no modelo de simulação em rede de Petri. Na Tabela 10, observam-se os 8 maiores portos exportadores da soja do estado do Mato Grosso. Esses portos foram responsáveis por mais de 95% da soja destinada ao mercado exterior nos anos destacados.

Tabela 10 – Exportação de grãos de soja do Mato Grosso por porto no ano de 2019 a 2021

| <b>Porto de destino da soja - MT</b> | <b>2019 (ton.)</b> | <b>2020 (ton.)</b> | <b>2021 (ton.)</b> |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Santos (SP)                          | 8.313.585          | 8.971.465          | 10.075.857         |
| Barcarena (PA)                       | 4.200.294          | 5.650.411          | 6.526.630          |
| Santarém (PA)                        | 1.690.962          | 2.478.345          | 2.303.997          |
| Itacoatiara (AM)                     | 1.952.876          | 2.158.910          | 1.714.576          |
| Itaqui/São Luís (MA)                 | 1.740.070          | 1.489.954          | 1.892.595          |
| Paranaguá (PR)                       | 902.493            | 654.889            | 500.763            |
| Vitória (ES)                         | 807.029            | 398.895            | 477.581            |
| Santana (AP)                         | 49.243             | 152.139            | 148.877            |

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de [Comex Stat \(2021\)](#)

Considerando que parte da soja produzida do estado do Mato Grosso é destinada para o porto de Paranaguá (PR), no sul do país, o estudo em questão, adotou como premissa, a utilização de uma rota fixa de exportação através da hidrovia dos rios Paraguai e Paraná. Esta rota visa explorar a potencialidade hidroviária destes rios, uma vez que já existe toda infraestrutura portuária na cidade de Cáceres (MT) e também em Porto Murtinho (MS), como exportadora de grãos, sendo portanto iminentes pontos estratégicos para o escoamento da soja do estado.

Os principais portos de exportação considerados neste estudo estão ilustrados (em azul) na Figura 50. Cabe destacar que os portos de Miritituba (PA) e Cáceres (MS) são tratados como estações de transbordo de carga (ETC), ou seja, nestes locais não ocorrem a remessa direta de soja para o exterior.

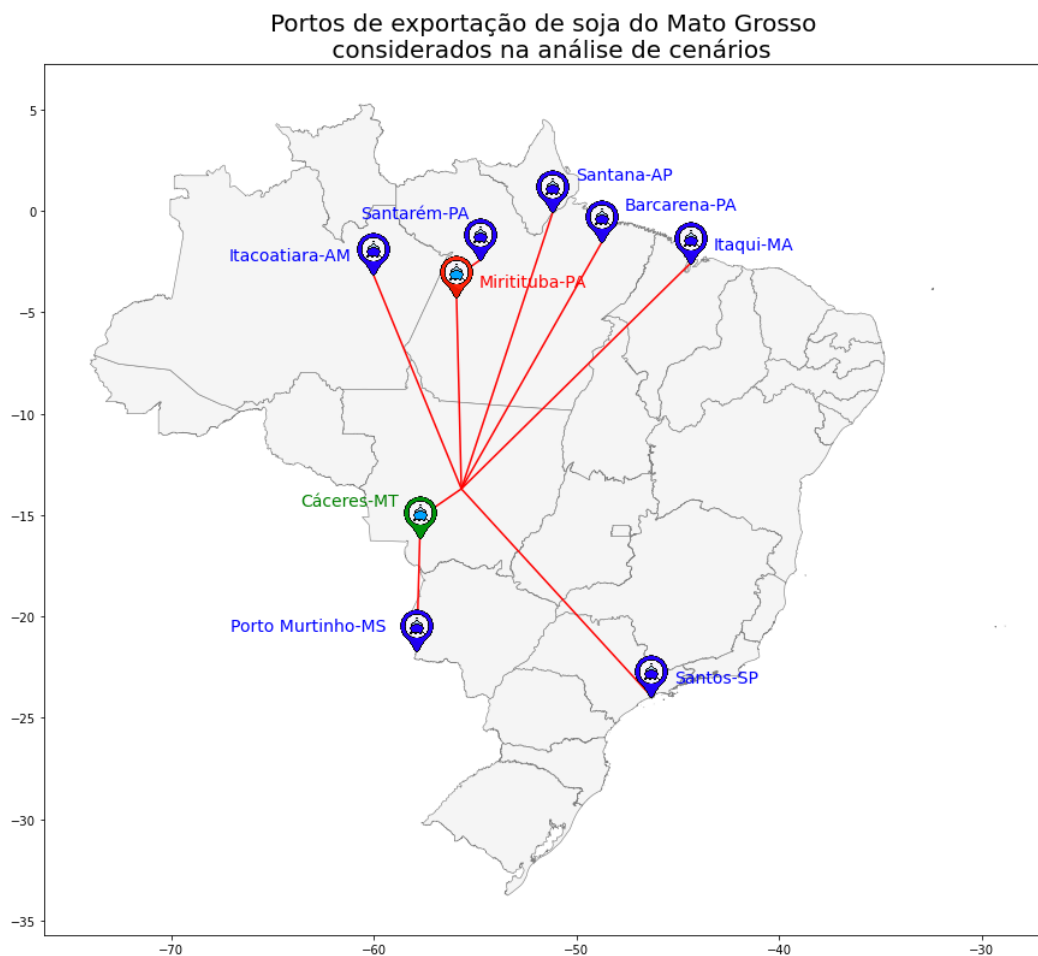


Figura 50 – Principais portos considerados no modelo de simulação

Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma melhor caracterização do problema e sua representação, são definidas rotas dos terminais de transbordo já existentes no estado do Mato Grosso (Tabela 18) e dos novos terminais propostos pelo modelo de otimização até os principais portos de exportação. As rotas fixas consideradas para todos os cenários de simulação são sinalizadas na Tabela 11. Estas rotas fixas são utilizadas dada a existência desses terminais de transbordo no estado, conforme Conab (2021). As demais rotas dos novos terminais de transbordo até os principais portos são indicadas em cada cenário da Seção 7.1.

Tabela 11 – Terminais de transbordo já existentes no estado do Mato Grosso e suas rotas fixas propostas

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota         | Distância estimada (km) | Porto de destino    |
|-------------------------|-----------------|--------------|-------------------------|---------------------|
| Cáceres                 | Hidroviário     | Rio Paraguai | 1.290                   | Porto Murtinho - MS |
| Itiquira                | Ferroviário     | EF-364       | 1.310                   | Santos - SP         |
| Rondonópolis            | Ferroviário     | EF-364       | 1.440                   | Santos - SP         |
| Alto Araguaia           | Ferroviário     | EF-364       | 1.150                   | Santos - SP         |

### 5.5 Definição dos Custos de Operação e Emissão de CO<sub>2</sub> por Tipo de Modal

No que concerne aos custos de operação de modais, este estudo segue a proposta de [Lopes et al. \(2017, 2020\)](#), que dizem que o custo por tonelada de soja transportada é calculado de acordo com a distância percorrida e os modais utilizados. Dessa forma, a Tabela 12 a seguir indica os valores desses custos para os diferentes tipos de modais.

Tabela 12 – Custo por tonelada-quilômetro e modal de transporte utilizado

| Modal       | Custo (US\$/ton*km) |
|-------------|---------------------|
| Rodoviário  | 0,044               |
| Ferroviário | 0,037               |
| Hidroviário | 0,027               |

Fonte: Adaptado de [Lopes et al. \(2017\)](#) e [Lopes et al. \(2020\)](#)

Além do custo da operação de transporte, há também um custo de transbordo associado à troca de modais durante o percurso. Esse custo foi fixado em 0,6349 dólares por tonelada de soja transportada ([Lopes et al., 2020](#)).

Sobre a emissão de CO<sub>2</sub> dos diferentes tipos de modais, alguns estudos apontam que o modo hidroviário emite uma menor quantidade de CO<sub>2</sub> em comparação ao modo ferroviário ([Branco et al., 2020](#); [Garcia et al., 2019](#)) e outras investigações direcionam para uma menor emissão de CO<sub>2</sub> no modo ferroviário ([Pauli, 2016](#); [Mako et al., 2021](#); [Nemethy et al., 2022](#); [EEA, 2021, 2017](#); [Fraunhofer-Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2020](#)). As emissões CO<sub>2</sub> produzidas por cada modal de transporte dependem de muitos fatores, tais como o tipo de tração, sistema de combustão (diesel, híbrido, elétrico), direção, relevo, entre outros. Para o cálculo de emissão de CO<sub>2</sub>, foram utilizados os parâmetros descritos por [Vidotte Plaza et al. \(2020\)](#), em que a quantidade de gás carbônico emitido por modal depende da quantidade de soja transportada e da distância percorrida. A Tabela 13 apresenta a quantidade de gás carbônico emitida pelos modos rodoviários, ferroviários e hidroviários por tonelada por quilômetro.

Tabela 13 – Emissão de CO<sub>2</sub> por modal de transporte utilizado

| Modal       | CO <sub>2</sub> /ton*km |
|-------------|-------------------------|
| Rodoviário  | 77,6g                   |
| Ferrovário  | 21,6g                   |
| Hidroviário | 29,7g                   |

Fonte: Vidotte Plaza et al. (2020)

Assim, definidas as premissas que norteiam o problema, tem-se os elementos suficientes para início da análise da otimização, apresentando um modelo sustentável de alocação de terminais capacitados e na sequência, a abordagem para construção da simulação em rede de Petri. A Seção 5.6 e 5.7 apresentam a proposta dos modelos deste estudo.

## 5.6 Modelagem do Problema de Otimização

Consolidada a investigação dos dados essenciais da temática em estudo, da definição da matriz de distâncias entre as cidades produtoras de soja, dos custos relacionados aos tipos de terminais e dos critérios referentes as cidades com potenciais para implantação de terminais intermodais, tratar-se-á, nesta seção, da modelagem matemática do problema. A partir do aprimoramento do modelo de otimização de Oliveira et al. (2020b), que limitava-se a uma função objetivo para a localização das posições candidatas para a instalação dos terminais somente com viés econômico, a proposta a seguir permite o tratamento do *trade-off* envolvendo custo e sustentabilidade ambiental. A Tabela 14 apresenta os conjuntos e índices usados no modelo. A Tabela 15 apresenta as variáveis de decisão e a Tabela 16 descreve todos os parâmetros utilizados. A representação do modelo matemático é descrita na sequência.

Tabela 14 – Conjuntos e índices do modelo.

| Notação | Descrição   |
|---------|---|
| $I$     | Conjunto de municípios produtores de soja do estado do Mato Grosso, sendo $i \in I$   |
| $J$     | Conjunto de localidades candidatas para a instalação de terminais de transbordo (que poderá ser qualquer município dentro do estado), sendo $j \in J$ |
| $S$     | Conjunto dos tipos de terminais de transbordo (de acordo com sua capacidade de armazenamento), sendo $s \in S$  |

Tabela 15 – Variáveis de decisão.

| Notação  | Descrição  |
|----------|--|
| $x_{ij}$ | 1, se a produção do município $i \in I$ é direcionada para o terminal $j \in J$<br>0, caso contrário   |
| $y_{js}$ | 1, se a localidade $j \in J$ recebe a instalação de um terminal do tipo $s \in S$<br>0, caso contrário |

Tabela 16 – Parâmetros do modelo.

| Notação     | Descrição  |
|-------------|--|
| $c_s$       | Custo de instalação de um terminal do tipo $s \in S$ , de acordo com a sua capacidade de armazenamento   |
| $\rho$      | Taxa de ocupação do terminal   |
| $Dist_{ij}$ | Matriz de distância entre cada um dos municípios $i \in I$ e as localidades candidatas $j \in J$   |
| $Dmax$      | Distância máxima percorrida dos produtores do município $i \in I$ até o terminal na localidade $j \in J$   |
| $Hid_j$     | Vetor de pesos associado à localidades (municípios) preferenciais para a instalação terminais intermodais (rodoviário para hidroviário), sendo $j \in J$ |
| $Fer_j$     | Vetor de pesos associado à localidades (municípios) preferenciais para instalação terminais intermodais (rodoviário para ferroviário), sendo $j \in J$   |
| $PDem_i$    | Produção de soja do município $i \in I$ destinada à exportação   |
| $DemT$      | Quantidade total de soja exportada pelos municípios do estado do Mato Grosso no ano  |
| $Cap_s$     | Capacidade de armazenamento do terminal do tipo $s \in S$  |
| $TMP$       | Tempo médio de permanência da soja no terminal   |
| $Tsaf$      | Tempo (em dias) da duração da safra da soja no ano   |
| $TE_{js}$   | Terminal já existente em uma determinada localidade $j \in J$ , do tipo $s \in S$  |
| $Conj_i$    | Estabelece uma distância máxima que um produtor de soja do município $i$ pode percorrer até um terminal, ou seja, $Conj_i = j \mid Dist_{ij} \leq Dmax$  |
| $\alpha$    | Peso associado a componente do custo de instalação do terminal na função objetivo  |
| $\beta$     | Peso associado a componente preferencial do modo hidroviário na função objetivo  |
| $\gamma$    | Peso associado a componente preferencial do modo ferroviário na função objetivo  |
| $\theta$    | Peso associado a componente ambiental na função objetivo   |

**Função Objetivo:**

**Minimizar**

$$\begin{aligned}
& \alpha \cdot \left[ UT(custo) = \left( \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} y_{js} \cdot c_s - TE_{js} \cdot c_s \right) \right] \\
& + \beta \cdot \left[ UT(hidroviario) = \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} y_{js} \cdot Hid_j \right] \\
& + \gamma \cdot \left[ UT(ferroviario) = \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} y_{js} \cdot Fer_j \right] \\
& + \theta \cdot \left[ UT(ambiental) = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} x_{ij} \cdot Dist_{ij} \right]
\end{aligned} \tag{5.2}$$

**Sujeito a:**

$$\sum_{s \in S} y_{js} \leq 1, \quad \forall j \in J \tag{5.3}$$

$$\sum_{j|j \in Con_j} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in I \tag{5.4}$$

$$x_{ij} \leq \sum_{s \in S} y_{js}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{5.5}$$

$$x_{jj} = \sum_{s \in S} y_{js}, \quad \forall j \in J \tag{5.6}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} \cdot PDem_i \geq DemT \tag{5.7}$$

$$\sum_{s \in S} Cap_s \cdot y_{js} \cdot \rho \geq \sum_{i \in I} \frac{x_{ij} \cdot PDem_i \cdot TMP}{Tsaf}, \quad \forall j \in J \tag{5.8}$$

$$x_{ij}, y_{js} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \tag{5.9}$$

A equação (5.2) representa uma função objetivo de utilidade, que fornece, de acordo com pesos associados a  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , e  $\theta$ , o controle de prioridade da dimensão (critério) a ser minimizada. Assim, a função objetivo representa várias funções a serem minimizadas, cada uma com sua dimensão de análise, como descrita a seguir:

- $UT(custo)$ : Preferência na redução do custo de instalação dos terminais de transbordo;
- $UT(hidroviario)$ : Preferência na instalação de terminais de transbordo em localidades com potencial hidroviário;

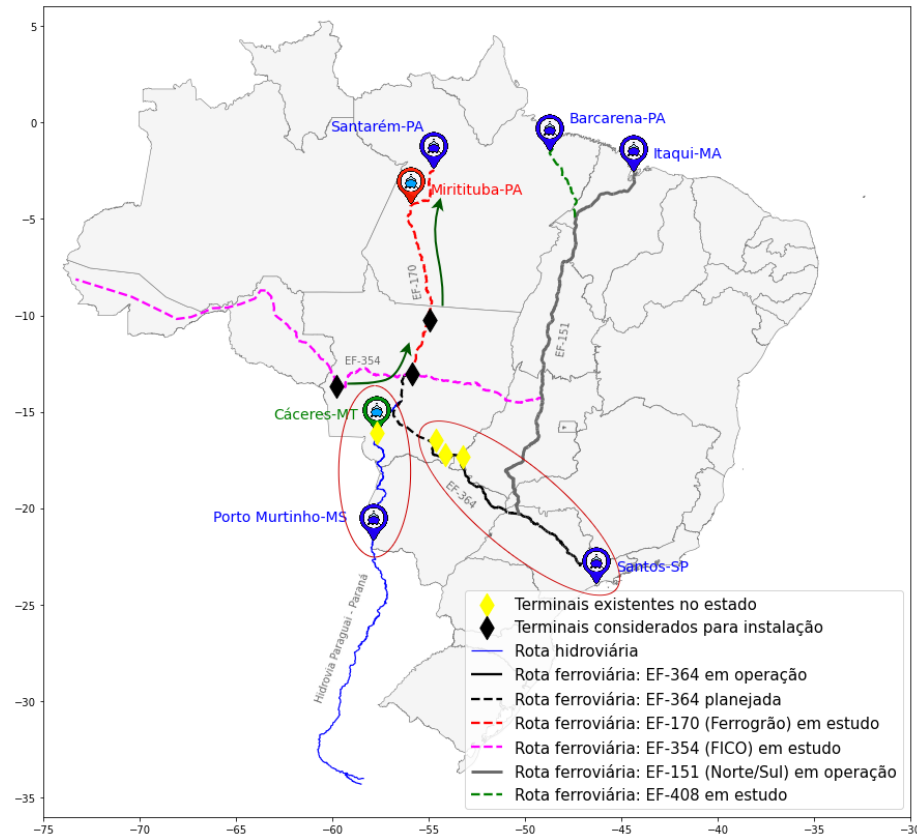
- $UT(\text{ferroviario})$ : Preferência na instalação de terminais de transbordo em localidades com potencial ferroviário;
- $UT(\text{ambiental})$ : Preferência na redução de emissão de  $\text{CO}_2$  devido a redução da distância rodoviária percorrida por caminhões.

A restrição (5.3) representa que, para cada localidade, pode haver no máximo um terminal de um determinado tipo. A restrição (5.4) diz que cada município produtor de soja só pode direcionar a sua produção para um único terminal. Na restrição (5.5), o município  $i$  só envia a sua produção de soja para um terminal no destino  $j$  se nessa localidade existir um terminal instalado. A restrição (5.6) trata a condição de que todo município deverá direcionar sua produção a um terminal instalado na mesma localidade. Na restrição (5.7), tem-se que a somatória das produções (demandas de armazenagem destinada a exportação) dos municípios  $i$  deve ser maior ou igual a demanda total de despacho para exportação. Por fim, a restrição (5.8) diz que cada terminal deve ter capacidade de armazenamento suficiente para atender a demanda de soja direcionada a ele.

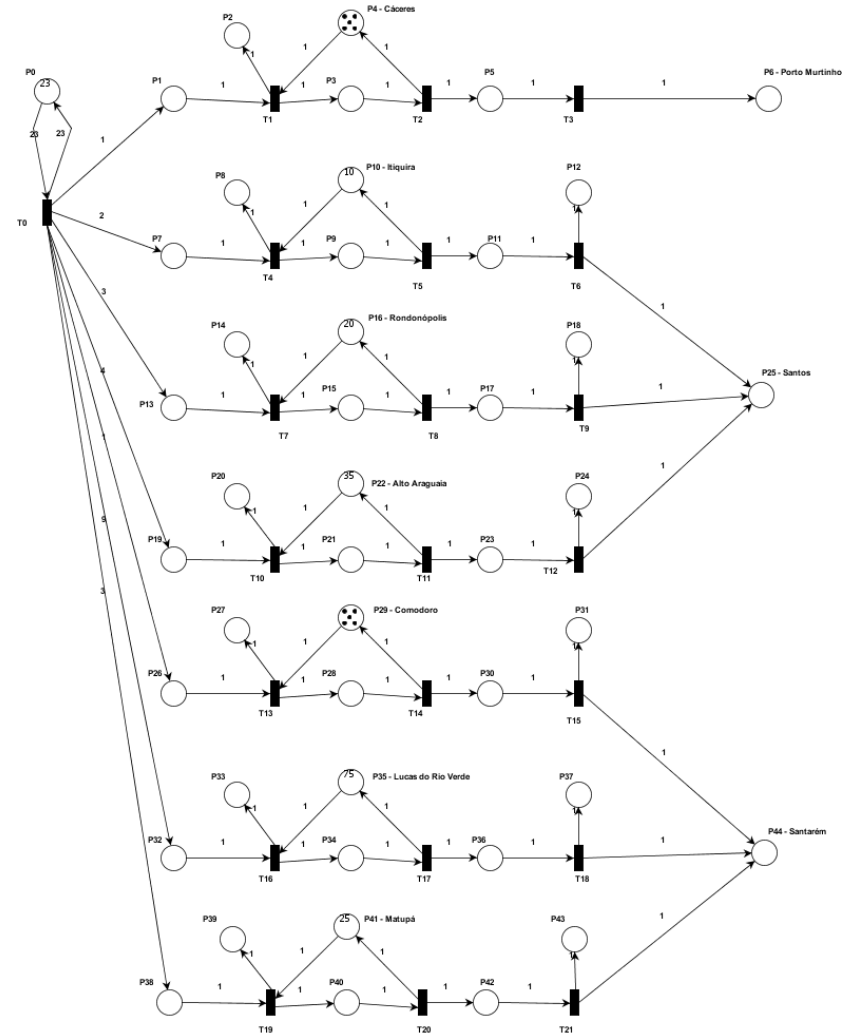
## 5.7 Modelagem do Problema de Simulação

Esta seção apresenta a construção do modelo de simulação em rede de Petri P-temporizada estocástica para problema. A simulação considera a quantidade anual de soja destinada à exportação do estado do Mato Grosso, os fluxos de carga destinados a cada terminal de transbordo definidos pelo modelo de otimização, o tempo médio de permanência da carga nos terminais e a vazão de escoamento máxima de cada rota até os portos de destino. Cada um desses parâmetros é representado por um lugar na rede, que são controlados a partir de um tempo de atraso associado a cada lugar. Além desses, há também lugares cujo propósito é armazenar o quantitativo de soja que trafega por aquele percurso, de forma permitir o cálculo da quantidade de viagens de caminhões, comboios, trens, além de dos custos e estatísticas da rede. A Figura 51 a seguir ilustra, de uma forma geral, um mapa com as rotas para o problema e os possíveis modais que podem ser utilizados como trajeto de exportação da soja no estado do Mato Grosso a partir da alocação de terminais do modelo de otimização. O modelo de rede de Petri representativo do cenário em questão é apresentado na sequência.





Mapa de referência com indicação de rotas de exportação de soja



Rede de Petri representativa das rotas

Figura 51 – Representação em rede de Petri das rotas de exportação de soja a partir de um mapa de referência

Fonte: Elaborado pelo autor

O mapa de referência da Figura 51, possui destacado em vermelho, as rotas fixas (Tabela 11) relacionadas aos terminais de transbordo já existentes no estado, que estão representadas pelas quatro primeiras linhas da rede de Petri indicada. As demais rotas de exportação estão sinalizadas nas linhas 5 a 7 da rede. Cada lugar da rede, bem como a designação do tempo de atraso associado a cada um desses lugares estão descritos na Tabela 17. A dinâmica de evolução do sistema em estudo possui características estocásticas típicas de processos Markovianos, ou seja, a probabilidade de uma variável aleatória assumir um valor futuro depende apenas do estado atual, somado à condição de evolução a estados discretos. Dada a incerteza quanto ao quantitativo de soja que trafega por cada etapa da rota e a cada mudança de estado da rede, os tempos de atrasos associados aos lugares (que representam o controle do fluxo de soja), são considerados como uma representação da distribuição exponencial. Lugares que possuem características de armazenamento de informações não possuem tempo de atraso associados.

A operação de um terminal de transbordo rodo-ferroviário ou rodo-hidroviário consiste em receber caminhões dos centros de produção, descarregá-los em tombadores ou moegas, armazenar a mercadoria, formar lotes e carregá-la em trens ou barcaças com destino para os portos de exportação. Esse processo é muito comum na logística do agronegócio, principalmente no transporte de soja. Diante dessas características, o serviço prestado pelos terminais de transbordo também são essenciais para a sustentabilidade e a redução dos custos logísticos no agronegócio. Para representar o descarregamento, armazenagem e operações de reembarque no terminal de transbordo, foi considerado o tempo médio de permanência ( $TMP$ ) de 6 dias para a soja nos terminais. Esta informação foi obtida a partir do setor de pesquisa operacional de uma grande empresa de logística que atua com terminais de transbordo intermodais. Sem perda de generalidade, a distribuição gaussiana representou o tempo de permanência de soja nos terminais. Este valor foi utilizado como padrão em todos os terminais, sendo representado no modelo de simulação através da distribuição normal com media de 6 dias e desvio padrão de 2 dias.

Para que a rede da Figura 51 possa ser simulada de uma forma terminal, é necessário definir os *tokens* nos lugares P0, P4, P10, P16, P22, P29, P35 e P41 (indicados na coluna marcação inicial da Tabela 17) e estabelecer a prioridade de disparo das transições da rede. A representação 5.10 a seguir, sugere o peso correspondente a cada uma das transições. Nota-se que, as transições T0 a T13, T16 e T19 tem a mesma prioridade e também T14, T15, T17, T18, T20, T21. Logo, caso essas transições de mesmo peso estejam habilitadas em um estado da rede, é realizado um sorteio para definir qual será disparada para a obter o próximo estado da rede.

$$T_{pr} = \left| \begin{array}{cccccccccccc} T0 & \dots & T13 & T14 & T15 & T16 & T17 & T18 & T19 & T20 & T21 \\ 1 & \dots & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \end{array} \right| \quad (5.10)$$

Tabela 17 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica para o mapa de referência

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 23               | expo(0.9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.53)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.53)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6)    |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)    |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/9) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 75               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.84/9) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.3/3)  |
| P39   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P40   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P41   | Capacidade do terminal                             | 25               | 1            |
| P42   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.3/3)  |
| P43   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P44   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

O atual capítulo teve como principais objetivos apresentar a metodologia, o detalhamento do problema, o modelo matemático de otimização e a estruturação do modelo de simulação em rede de Petri P-temporizada, cujas premissas são determinar, segundo critérios econômicos e ambientais, as principais rotas da soja destinada ao comércio exterior do estado do Mato Grosso. O estudo propõe obter localizações estratégicas para a instalação de terminais intermodais e o fluxo do escoamento de produção de soja destinada aos portos por meio dos principais modais em operação, planejados e em estudo, de forma a mitigar o custo de transporte e emissão de CO<sub>2</sub>, podendo assim, auxiliar na tomada de decisões sustentáveis.

## 6 RESULTADOS DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

O presente capítulo apresenta os resultados alcançados do modelo de otimização descrito na Seção 5.6. O objetivo central dessa primeira etapa está em encontrar as melhores localizações para a instalação de terminais de transbordo no estado Mato Grosso a um custo mínimo, aliado à preocupação ambiental no que concerne à redução de emissão de CO<sub>2</sub>, de tal forma a atender a demanda de exportação dos municípios produtores de soja. Além disso, trata as cidades candidatas à instalação de terminais de transbordo de acordo com o seu potencial para a intermodalidade, em localidades próximas a rios e projetos ferroviários.

As abordagens descritas para cada um dos cenários da Seção 6.1 são realizadas considerando os terminais existentes no estado. A partir da investigação na literatura e da base de dados da Conab (2021) com relação a terminais no estado do Mato Grosso, constatou-se a existência de três terminais integradores ferroviários, todos localizados na ferrovia EF-364 (Rumo Malha Norte) e um terminal integrador hidroviário localizado na cidade de Cáceres (MT). Os detalhes em relação as suas capacidades podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18 – Terminais Intermodais no Mato Grosso

| Armazenador                | Município     | Tipo       | Capacidade (ton.) |
|----------------------------|---------------|------------|-------------------|
| Rumo                       | Rondonópolis  | Graneleiro | 200.000           |
| Louis Dreyfus Company/Rumo | Alto Araguaia | Graneleiro | 350.000           |
| Rumo                       | Itiquira      | Graneleiro | 100.000           |
| Metamat                    | Cáceres       | Graneleiro | 50.000            |

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de Conab (2021)

Os custos associados a esses terminais foram desconsiderados na função objetivo do modelo da Seção 5.6, uma vez que essas instalações já existem, estão em operação ou em adequação para operação. Os cenários criados para alcançar os objetivos propostos são apresentados na Seção 6.1. Em cada um deles é ilustrado um ambiente otimizado logístico, onde se encontram os melhores locais para a instalação de terminais para atender o fluxo da produção de soja destinada à exportação. Posteriormente, no Capítulo 7, serão aplicadas redes de Petri P-temporizada estocástica para simular as rotas de exportação de soja desses terminais de transbordo até os principais portos.

## 6.1 Resultados dos Cenários do Modelo de Otimização

Para calcular os resultados referente à localização dos terminais de transbordo no estado do Mato Grosso, de acordo com o modelo matemático da Seção 5.6, foram elaborados cinco cenários. Os cenários prioritariamente analisam situações de tomada de decisão que envolvem custos financeiros relacionados à implantação dos terminais e a redução da distância rodoviária total percorrida, com foco na redução da emissão de CO<sub>2</sub>. Para cada cenário é apresentado o resultado inicial (nenhuma preocupação ambiental, com  $\theta = 0$ ), intermediário (moderada preocupação ambiental, com  $\theta = 0.4$ ) e final (elevada preocupação ambiental, com  $\theta = 0.8$ ). Todas as cidades são representadas por números (o nome e sua correspondência numérica encontra-se na Tabela 105 no Apêndice B). A capacidade de armazenamento dos terminais de transbordo e a demanda anual destinada a este são apresentadas abaixo do mapa, com a indicação das localidades candidatas. As configurações adotadas para os pesos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\theta$  são detalhadas em cada cenário, a seguir.

### 6.1.1 Cenário 1

As Figuras 52 e 53 sintetizam os resultados da preferência pelo modo ferroviário para os anos de 2021 e 2025. Os pesos adotados são: componente de custo  $\alpha$  decrescente, variando entre 0.8 a 0; componente do modo hidroviário  $\beta = 0$ , ou seja, não considera a utilização deste modal; componente do modo ferroviário  $\gamma$  assume o valor fixo de 0.2; componente ambiental  $\theta$  crescente, variando de 0 a 0.8.

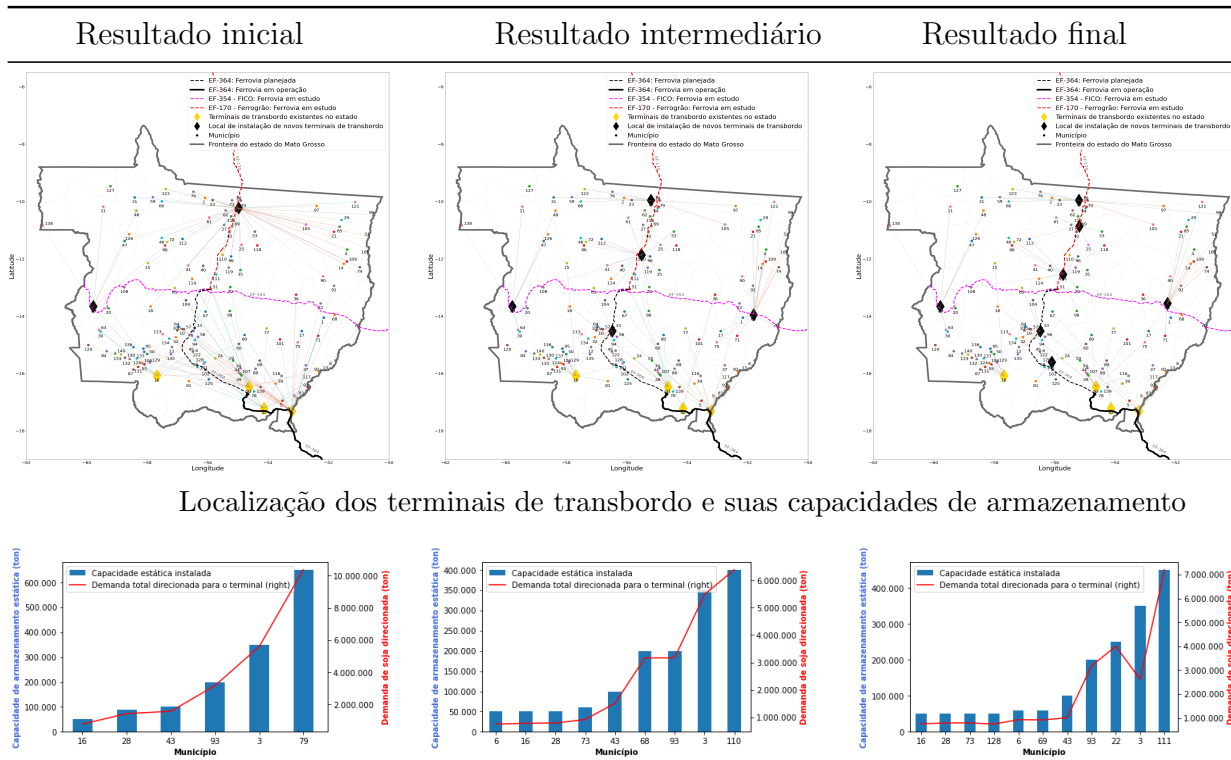


Figura 52 – Resultado do cenário 1 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente municípios com potencial de intermodalidade ferroviária.

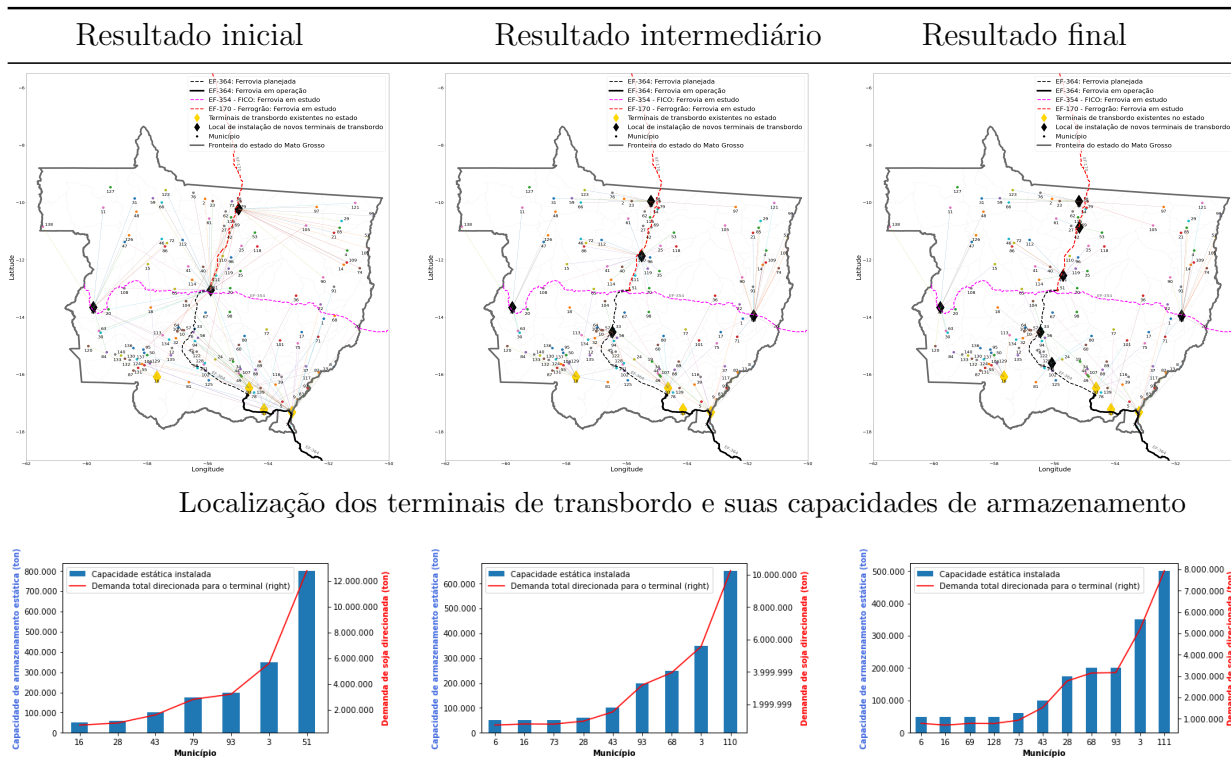


Figura 53 – Resultado do cenário 1 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente municípios com potencial de intermodalidade ferroviária.

6.1.2 Cenário 2

As Figuras 54 e 55 sintetizam os resultados da preferência pelo modo hidroviário para os anos de 2021 e 2025. Os pesos adotados são: componente de custo  $\alpha$  decrescente, variando entre 0.8 a 0; componente do modo hidroviário  $\beta$  assume o valor fixo de 0.2; componente do modo ferroviário  $\gamma = 0$ , ou seja, não considera a utilização deste modal; componente ambiental  $\theta$  crescente, variando de 0 a 0.8.

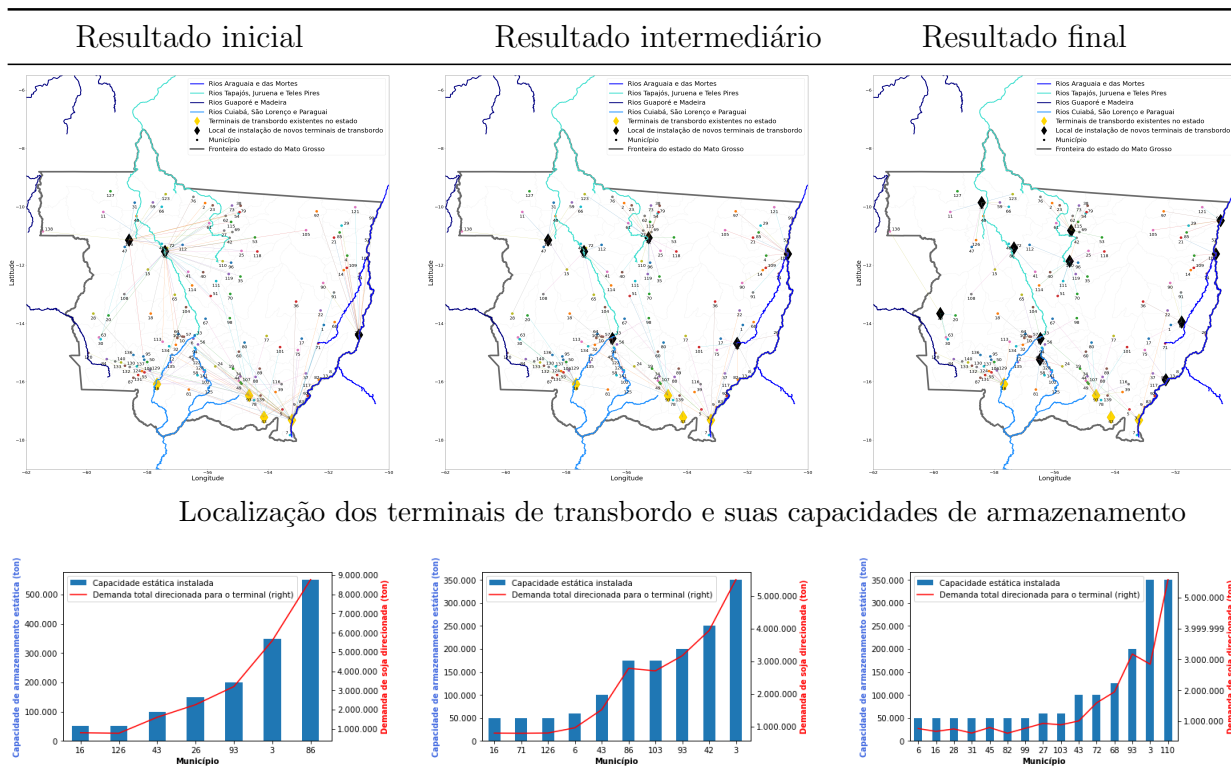


Figura 54 – Resultado do cenário 2 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente municípios com potencial de intermodalidade hidroviária.

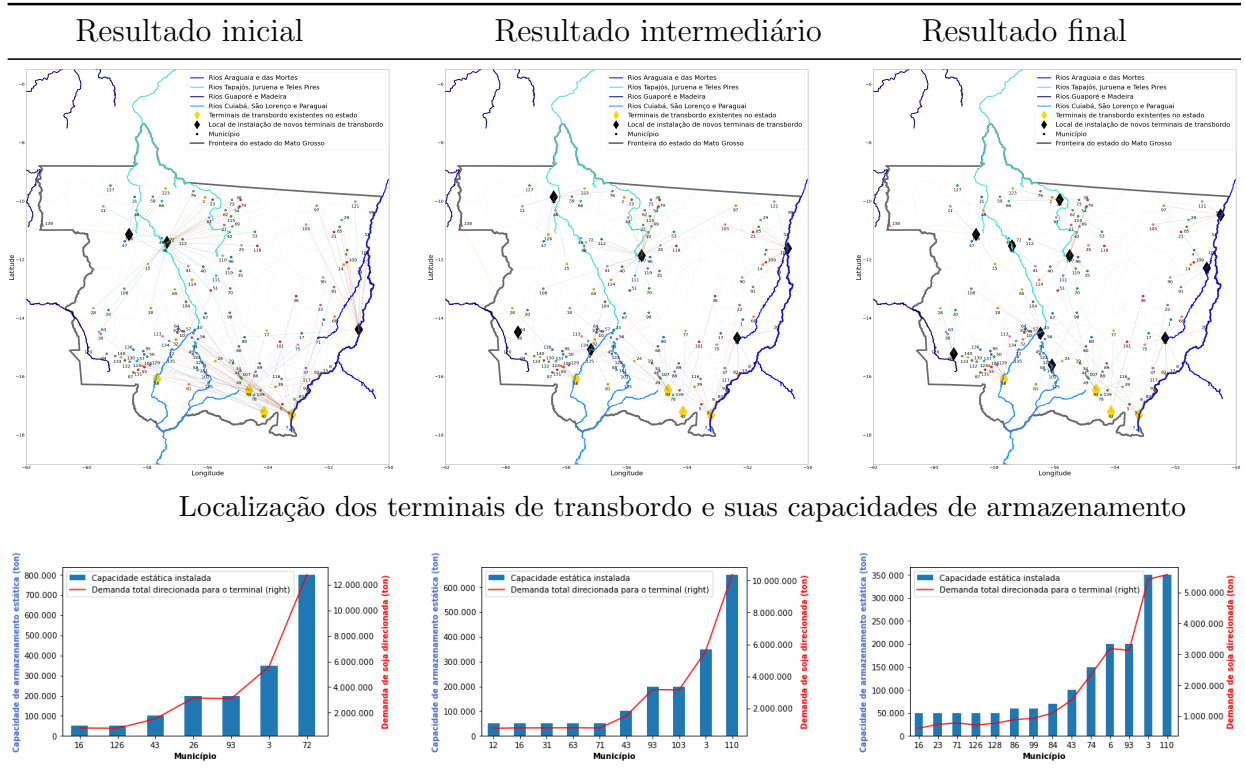


Figura 55 – Resultado do cenário 2 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando somente municípios com potencial de intermodalidade hidroviária.

### 6.1.3 Cenário 3

As Figuras 56 e 57 sintetizam os resultados da preferência de 50% entre os modos ferroviário e hidroviário para os anos de 2021 e 2025. Os pesos adotados são: componente de custo  $\alpha$  decrescente, variando entre 0.8 a 0; componente do modo hidroviário  $\beta = 0.1$ ; componente do modo ferroviário  $\gamma = 0.1$ ; componente ambiental  $\theta$  crescente, variando de 0 a 0.8.



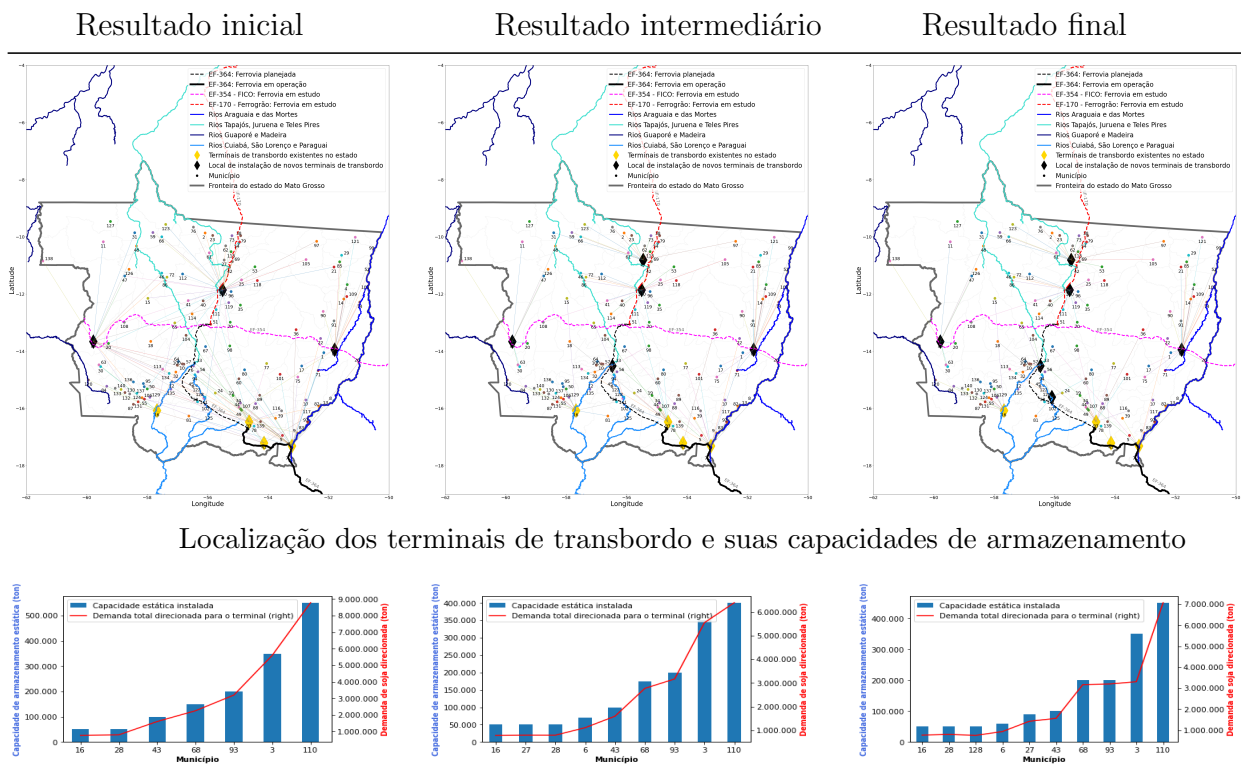


Figura 56 – Resultado do cenário 3 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária e hidroviária em 50%.

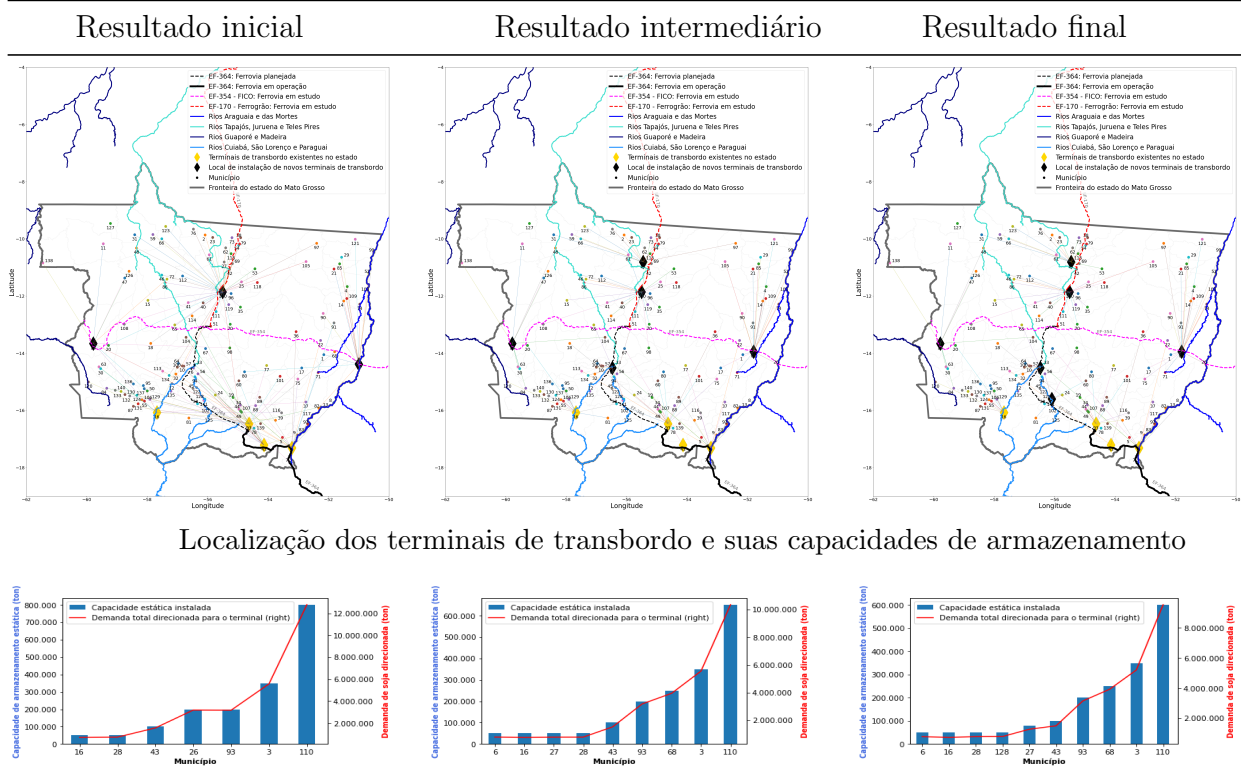


Figura 57 – Resultado do cenário 3 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária e hidroviária em 50%.

6.1.4 Cenário 4

As Figuras 58 e 59 sintetizam os resultados da preferência de 75% do modo ferroviário e 25% do modo hidroviário para os anos de 2021 e 2025. Os pesos adotados são: componente de custo  $\alpha$  decrescente, variando entre 0.8 a 0; componente do modo hidroviário  $\beta = 0.05$ ; componente do modo ferroviário  $\gamma = 0.15$ ; componente ambiental  $\theta$  crescente, variando de 0 a 0.8.

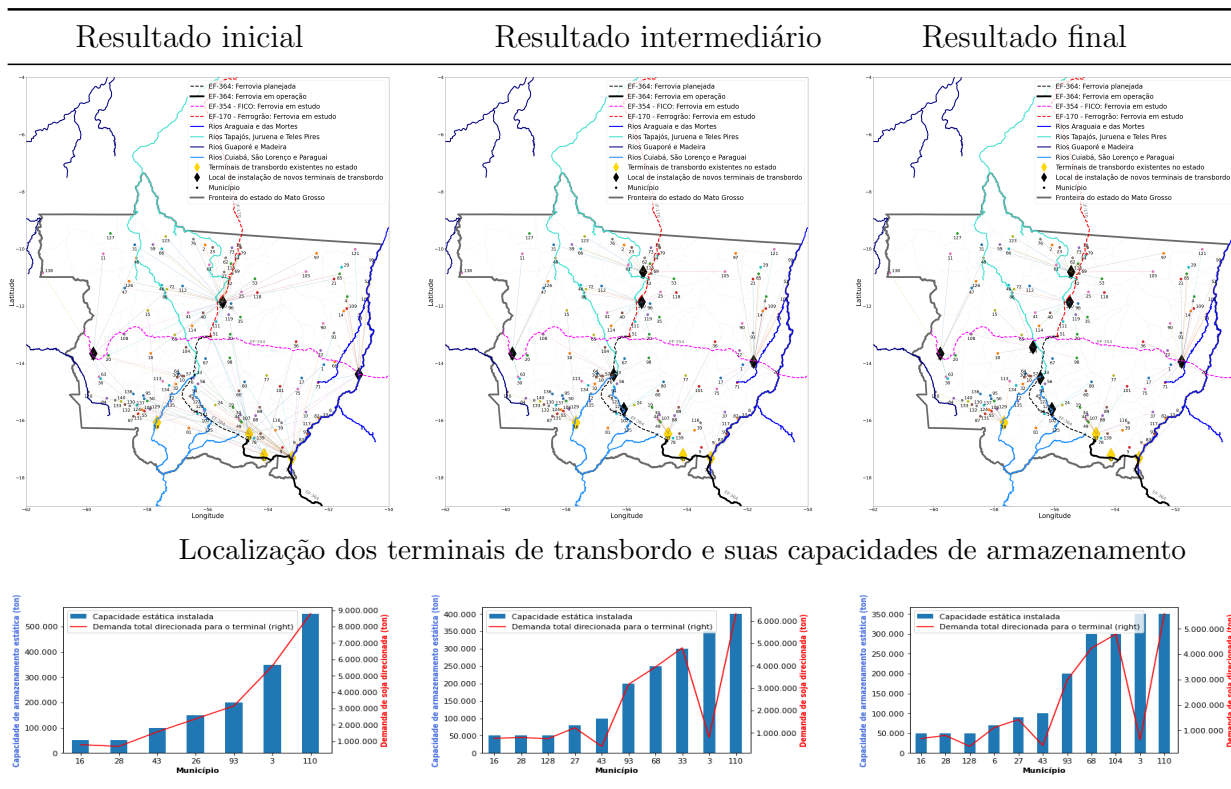


Figura 58 – Resultado do cenário 4 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 75% e hidroviária em 25%.

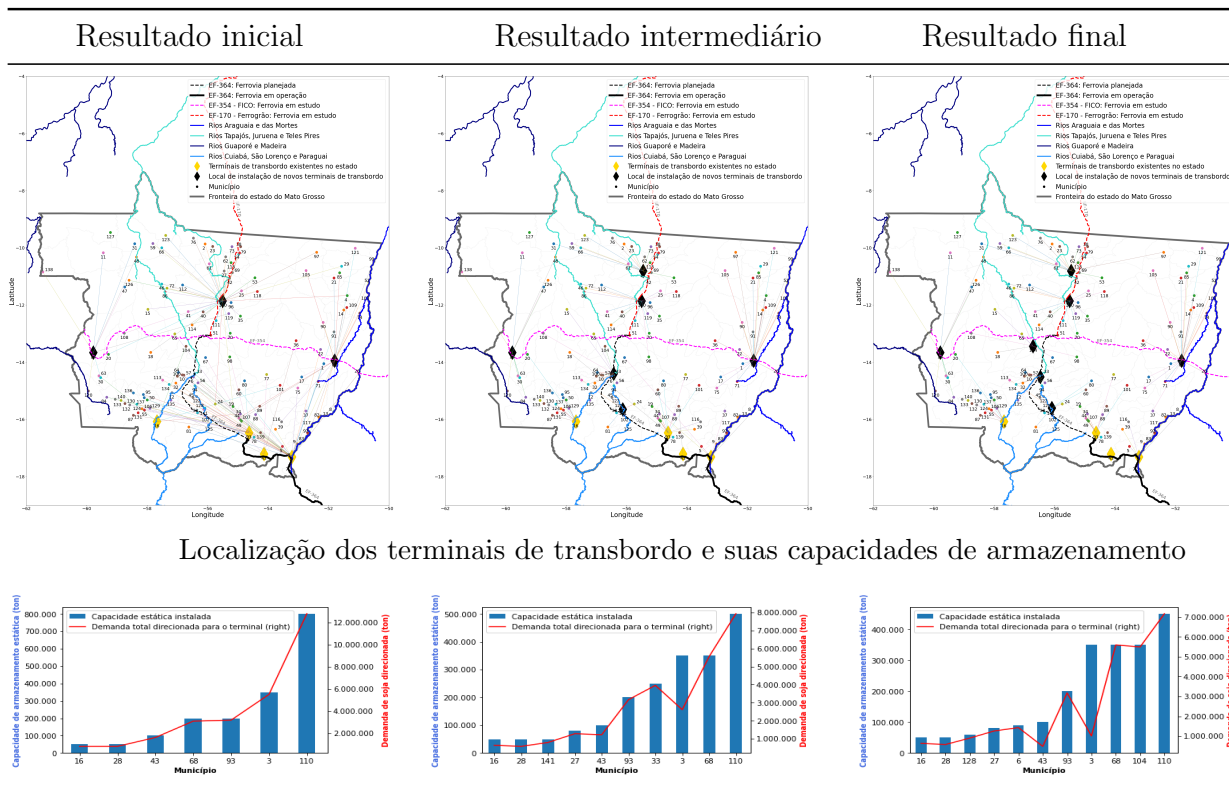


Figura 59 – Resultado do cenário 4 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 75% e hidroviária em 25%.

### 6.1.5 Cenário 5

As Figuras 60 e 61 sintetizam os resultados da preferência de 25% do modo ferroviário e 75% do modo hidroviário para os anos de 2021 e 2025. Os pesos adotados são: componente de custo  $\alpha$  decrescente, variando entre 0.8 a 0; componente do modo hidroviário  $\beta = 0.15$ ; componente do modo ferroviário  $\gamma = 0.05$ ; componente ambiental  $\theta$  crescente, variando de 0 a 0.8.

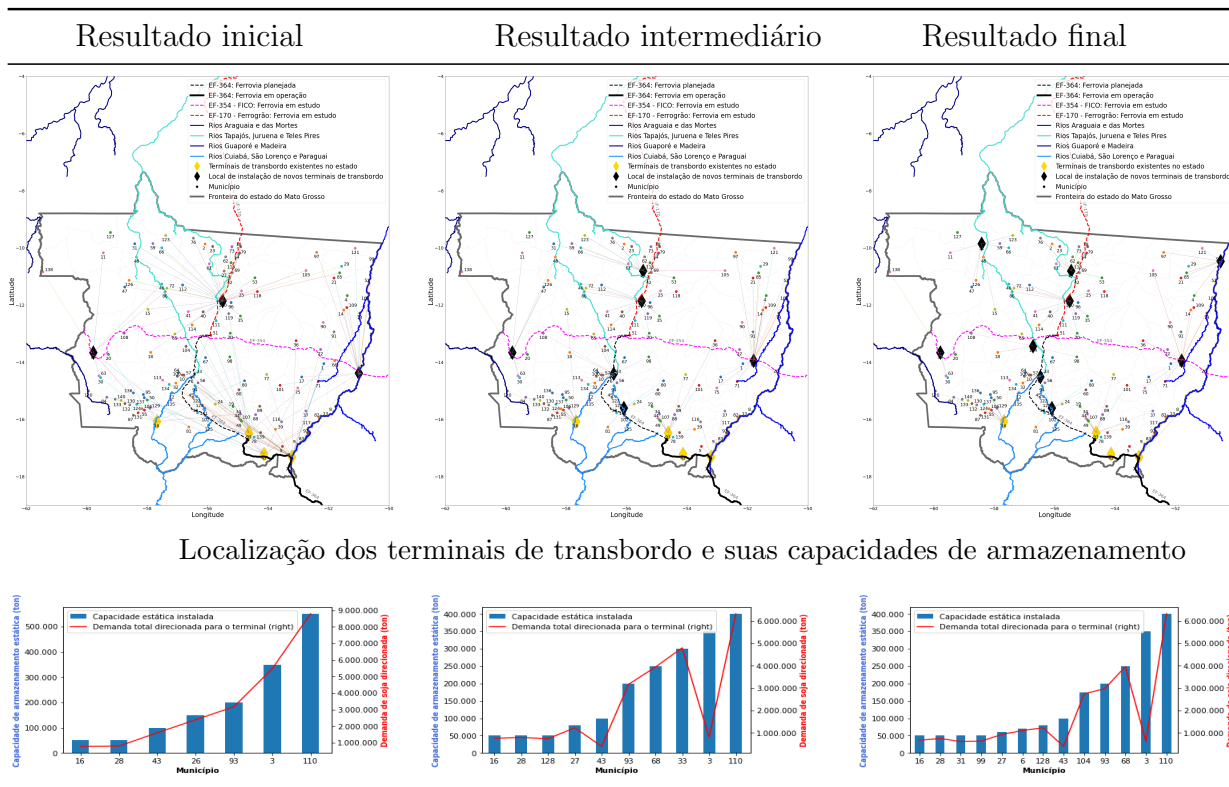


Figura 60 – Resultado do cenário 5 para 2021: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 25% e hidroviária em 75%.

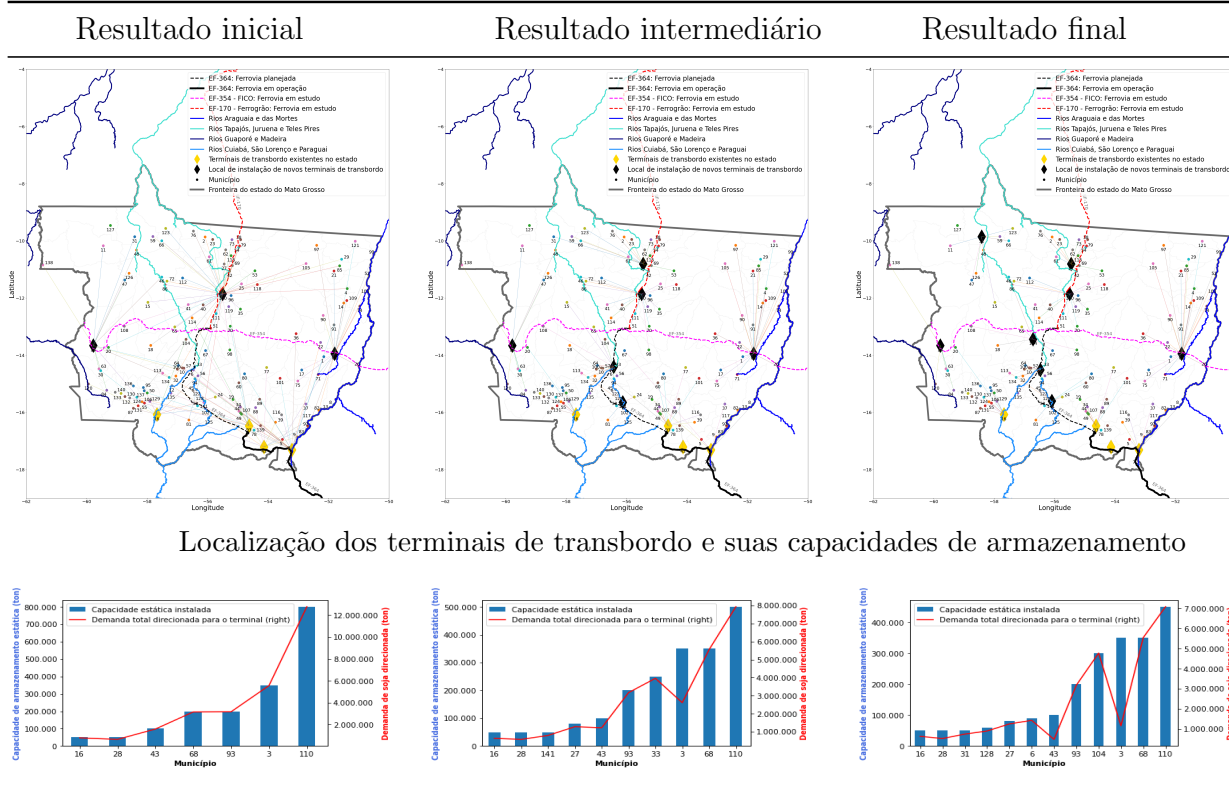


Figura 61 – Resultado do cenário 5 para 2025: localização dos terminais de transbordo e suas capacidades de armazenamento utilizando municípios com potencial de intermodalidade ferroviária em 25% e hidroviária em 75%.

Os resultados indicam que o modelo matemático proposto que trata os aspectos de custos de implantação de terminais de transbordo, cidades com potencial para intermodalidade hidroviária/ferroviária e redução da distância rodoviária percorrida com impacto ambiental, permite a tomadores de decisão elaborar melhores planos estratégicos de transporte de soja para o estado. A utilização do transporte intermodal permite melhorias na operação dos sistemas logísticos de grãos, melhorando sua eficiência tanto no aspecto econômico quanto no ambiental. A Seção 6.2 a seguir, abordará uma análise dos resultados para cada cenário, em relação aos aspectos econômico e ambiental.

## 6.2 Análise dos Resultados dos Cenários do Modelo de Otimização

Nesta seção são analisados os efeitos da variação do peso da componente ambiental  $\theta$  no custo de implantação dos terminais e na distância rodoviária total percorrida para os anos de 2021 e 2025 em cada cenário. Um gráfico de três eixos é apresentado, de tal forma a permitir a comparação entre o compromisso da dimensão econômica (custo de instalação) e o compromisso da dimensão ambiental (redução na emissão de CO<sub>2</sub>).

Nas Figuras 62, 63, 64, 65 e 66 são apresentadas no eixo x a variação do peso da componente ambiental  $\theta$  de 0 a 0.8 para cada caso. No eixo y, do lado esquerdo, tem-se o custo associado à implantação de novos terminais de transbordo. No eixo y, do lado direito, tem-se a distância rodoviária total percorrida até as posições candidatas dos terminais de transbordo do estado do Mato do Grosso. O resultado dessa distância total permite obter a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por ano de toda logística rodoviária da soja até o terminais de transbordo.

Pela análise das Figuras 62, 63, 64, 65 e 66 é possível notar que o aumento do peso da componente ambiental  $\theta$  provoca um aumento no custo total de implantação de terminais de transbordo. Tal efeito está relacionado a um aumento no número de terminais que devem ser instalados, o que resulta na redução da distância rodoviária total percorrida.

Com o objetivo de analisar a situação bi-critério, que alia o compromisso econômico e ambiental, são destacadas nas Figuras 62, 63, 64, 65 e 66 uma região em azul claro. Esta região apresenta soluções que podem ser adotadas com um custo mínimo de instalação de terminais e redução na emissão de CO<sub>2</sub>. Já a linha em amarelo destacada nas figuras, sinaliza o ponto de eficiência conjunta entre os critérios econômicos e ambientais. A seguir são apresentados os resultados para cada cenário analisado.

Na figura 62, que representa o cenário 1, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo no ano de 2021 em um valor mínimo de R\$ 758 mi com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 21,95%, através da redução de aproximadamente 11.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 130 mi acarretaria na redução de mais 15%

de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 19. Já para o ano de 2025, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo em um valor pouco acima do mínimo, de R\$ 1.313 mi, com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 31,5%, através da redução de aproximadamente 17.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 52 mi acarretaria na redução de mais 8% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 20.

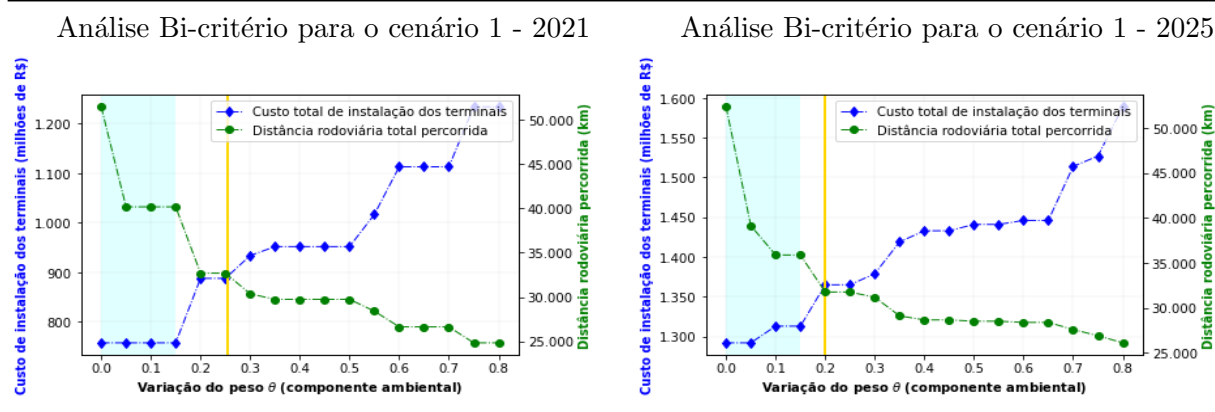


Figura 62 – Análise da variação do peso  $\theta$  para o resultado do cenário 1 com a preferência de utilização de intermodalidade em 100% de ferrovias no ano de 2021 e 2025.

Tabela 19 – Resultado do cenário 1 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenagem estática total para o ano de 2021

| Variação do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                         | 758                  | 51.482,50                 | 91,76                                       | 0                                      | 1.440.000                           |
| 0,05                      | 758                  | 40.182,50                 | 71,62                                       | -21,95%                                | 1.440.000                           |
| 0,10                      | 758                  | 40.182,50                 | 71,62                                       | -21,95%                                | 1.440.000                           |
| 0,15                      | 758                  | 40.182,50                 | 71,62                                       | -21,95%                                | 1.440.000                           |
| 0,20                      | 888                  | 32.693,00                 | 58,27                                       | -36,50%                                | 1.440.000                           |
| 0,25                      | 888                  | 32.693,00                 | 58,27                                       | -36,50%                                | 1.440.000                           |
| 0,30                      | 934                  | 30.355,50                 | 54,10                                       | -41,04%                                | 1.450.000                           |
| 0,35                      | 952                  | 29.736,50                 | 53,00                                       | -42,24%                                | 1.460.000                           |
| 0,40                      | 952                  | 29.736,50                 | 53,00                                       | -42,24%                                | 1.460.000                           |
| 0,45                      | 952                  | 29.736,50                 | 53,00                                       | -42,24%                                | 1.460.000                           |
| 0,50                      | 952                  | 29.736,50                 | 53,00                                       | -42,24%                                | 1.460.000                           |
| 0,55                      | 1.017                | 28.401,50                 | 50,62                                       | -44,83%                                | 1.530.000                           |
| 0,60                      | 1.113                | 26.627,50                 | 47,46                                       | -48,28%                                | 1.600.000                           |
| 0,65                      | 1.113                | 26.627,50                 | 47,46                                       | -48,28%                                | 1.600.000                           |
| 0,70                      | 1.113                | 26.627,50                 | 47,46                                       | -48,28%                                | 1.600.000                           |
| 0,75                      | 1.234                | 24.826,50                 | 44,25                                       | -51,78%                                | 1.670.000                           |
| 0,80                      | 1.234                | 24.826,50                 | 44,25                                       | -51,78%                                | 1.670.000                           |

Tabela 20 – Resultado do cenário 1 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025

| Variação do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                         | 1.292                | 52.384,00                 | 112,68                                      | 0                                      | 1.735.000                           |
| 0,05                      | 1.292                | 39.142,50                 | 84,20                                       | -25,28%                                | 1.735.000                           |
| 0,10                      | 1.313                | 35.880,50                 | 77,18                                       | -31,50%                                | 1.750.000                           |
| 0,15                      | 1.313                | 35.880,50                 | 77,18                                       | -31,50%                                | 1.750.000                           |
| 0,20                      | 1.365                | 31.756,50                 | 68,31                                       | -39,38%                                | 1.740.000                           |
| 0,25                      | 1.365                | 31.756,50                 | 68,31                                       | -39,38%                                | 1.740.000                           |
| 0,30                      | 1.379                | 31.173,00                 | 67,06                                       | -40,49%                                | 1.750.000                           |
| 0,35                      | 1.419                | 29.104,00                 | 62,60                                       | -44,44%                                | 1.740.000                           |
| 0,40                      | 1.433                | 28.651,50                 | 61,63                                       | -45,30%                                | 1.760.000                           |
| 0,45                      | 1.433                | 28.651,50                 | 61,63                                       | -45,30%                                | 1.760.000                           |
| 0,50                      | 1.441                | 28.506,50                 | 61,32                                       | -45,58%                                | 1.770.000                           |
| 0,55                      | 1.441                | 28.506,50                 | 61,32                                       | -45,58%                                | 1.770.000                           |
| 0,60                      | 1.446                | 28.374,50                 | 61,04                                       | -45,83%                                | 1.760.000                           |
| 0,65                      | 1.446                | 28.374,50                 | 61,04                                       | -45,83%                                | 1.760.000                           |
| 0,70                      | 1.514                | 27.583,50                 | 59,33                                       | -47,34%                                | 1.780.000                           |
| 0,75                      | 1.527                | 26.893,00                 | 57,85                                       | -48,66%                                | 1.765.000                           |
| 0,80                      | 1.589                | 26.102,50                 | 56,15                                       | -50,17%                                | 1.785.000                           |

Na figura 63, que representa o cenário 2, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo no ano de 2021 em um valor mínimo de R\$ 831 mi com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 36,31%, através da redução de aproximadamente 18.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 169 mi acarretaria na redução de mais 12% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 21. Já para o ano de 2025, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo em um valor mínimo, de R\$ 1.307 mi, com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 43,25%, através da redução de aproximadamente 24.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 73 mi acarretaria na redução de mais 5% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 22.

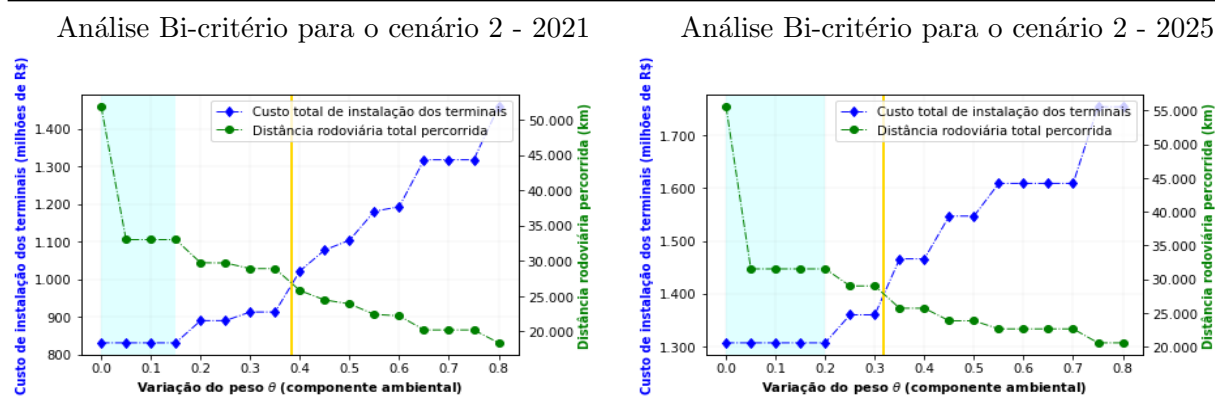


Figura 63 – Análise da variação do peso  $\theta$  para o resultado do cenário 2 com a preferência de utilização de intermodalidade em 100% de hidrovias no ano de 2021 e 2025.

Tabela 21 – Resultado do cenário 2 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2021

| Variação do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                         | 831                  | 51.824,00                 | 92,37                                       | 0                                      | 1.450.000                           |
| 0,05                      | 831                  | 33.009,00                 | 58,83                                       | -36,31%                                | 1.450.000                           |
| 0,10                      | 831                  | 33.009,00                 | 58,83                                       | -36,31%                                | 1.450.000                           |
| 0,15                      | 831                  | 33.009,00                 | 58,83                                       | -36,31%                                | 1.450.000                           |
| 0,20                      | 890                  | 29.735,00                 | 53,00                                       | -42,62%                                | 1.445.000                           |
| 0,25                      | 890                  | 29.708,00                 | 52,95                                       | -42,68%                                | 1.445.000                           |
| 0,30                      | 913                  | 28.906,50                 | 51,52                                       | -44,22%                                | 1.450.000                           |
| 0,35                      | 913                  | 28.906,50                 | 51,52                                       | -44,22%                                | 1.450.000                           |
| 0,40                      | 1.022                | 25.798,00                 | 45,98                                       | -50,22%                                | 1.460.000                           |
| 0,45                      | 1.078                | 24.463,00                 | 43,60                                       | -52,80%                                | 1.470.000                           |
| 0,50                      | 1.104                | 23.904,50                 | 42,60                                       | -53,87%                                | 1.495.000                           |
| 0,55                      | 1.181                | 22.421,00                 | 39,96                                       | -56,74%                                | 1.535.000                           |
| 0,60                      | 1.193                | 22.216,50                 | 39,60                                       | -57,13%                                | 1.545.000                           |
| 0,65                      | 1.318                | 20.218,50                 | 36,04                                       | -60,99%                                | 1.630.000                           |
| 0,70                      | 1.318                | 20.218,50                 | 36,04                                       | -60,99%                                | 1.630.000                           |
| 0,75                      | 1.318                | 20.218,50                 | 36,04                                       | -60,99%                                | 1.630.000                           |
| 0,80                      | 1.459                | 18.394,50                 | 32,78                                       | -64,51%                                | 1.695.000                           |



Tabela 22 – Resultado do cenário 2 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025

| Variação do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                         | 1.307                | 55.551,50                 | 119,50                                      | 0                                      | 1.750.000                           |
| 0,05                      | 1.307                | 31.526,50                 | 67,82                                       | -43,25%                                | 1.750.000                           |
| 0,10                      | 1.307                | 31.526,50                 | 67,82                                       | -43,25%                                | 1.750.000                           |
| 0,15                      | 1.307                | 31.526,50                 | 67,82                                       | -43,25%                                | 1.750.000                           |
| 0,20                      | 1.307                | 31.526,50                 | 67,82                                       | -43,25%                                | 1.750.000                           |
| 0,25                      | 1.360                | 28.996,50                 | 62,37                                       | -47,80%                                | 1.750.000                           |
| 0,30                      | 1.360                | 28.996,50                 | 62,37                                       | -47,80%                                | 1.750.000                           |
| 0,35                      | 1.466                | 25.691,50                 | 55,26                                       | -53,75%                                | 1.750.000                           |
| 0,40                      | 1.466                | 25.691,50                 | 55,26                                       | -53,75%                                | 1.750.000                           |
| 0,45                      | 1.547                | 23.826,50                 | 51,25                                       | -57,11%                                | 1.770.000                           |
| 0,50                      | 1.547                | 23.826,50                 | 51,25                                       | -57,11%                                | 1.770.000                           |
| 0,55                      | 1.609                | 22.629,50                 | 48,68                                       | -59,26%                                | 1.770.000                           |
| 0,60                      | 1.609                | 22.629,50                 | 48,68                                       | -59,26%                                | 1.770.000                           |
| 0,65                      | 1.609                | 22.629,50                 | 48,68                                       | -59,26%                                | 1.770.000                           |
| 0,70                      | 1.609                | 22.629,50                 | 48,68                                       | -59,26%                                | 1.770.000                           |
| 0,75                      | 1.754                | 20.564,00                 | 44,23                                       | -62,98%                                | 1.790.000                           |
| 0,80                      | 1.754                | 20.564,00                 | 44,23                                       | -62,98%                                | 1.790.000                           |

Na figura 64, que representa o cenário 3, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo no ano de 2021 em um valor mínimo de R\$ 831 mi com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 28,07%, através da redução de aproximadamente 14.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 69 mi acarretaria na redução de mais 8% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 23. Já para o ano de 2025, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo em um valor mínimo, de R\$ 1.307 mi, com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 29,57%, através da redução de aproximadamente 14.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 43 mi acarretaria na redução de mais 6% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 24.

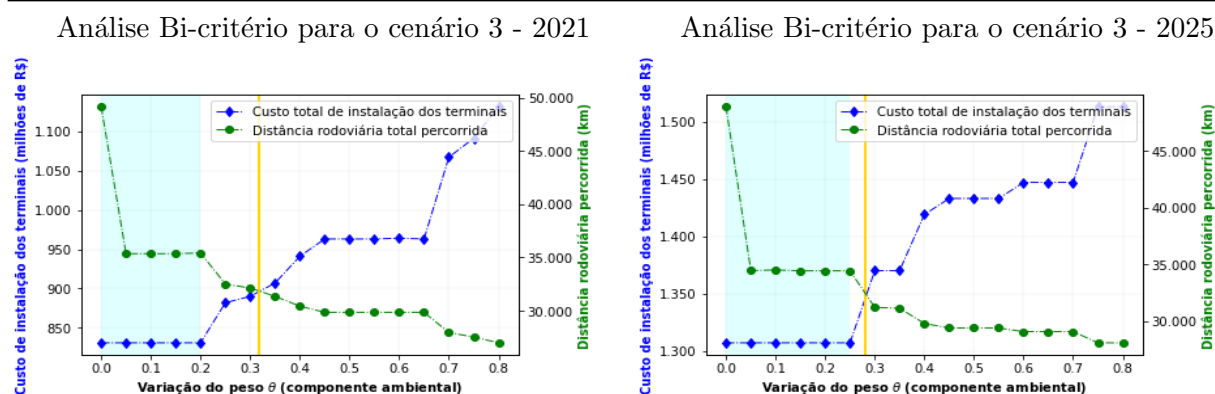


Figura 64 – Análise da variação do peso  $\theta$  para o resultado do cenário 3 com a preferência de utilização de intermodalidade em 50% de ferrovias e 50% de hidrovias no ano de 2021 e 2025.

Tabela 23 – Resultado do cenário 3 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenagem estática total para o ano de 2021

| Varição do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                        | 831                  | 49.139,00                 | 87,58                                       | 0                                      | 1.450.000                           |
| 0,05                     | 831                  | 35.344,50                 | 62,99                                       | -28,07%                                | 1.450.000                           |
| 0,10                     | 831                  | 35.344,50                 | 62,99                                       | -28,07%                                | 1.450.000                           |
| 0,15                     | 831                  | 35.344,50                 | 62,99                                       | -28,07%                                | 1.450.000                           |
| 0,20                     | 831                  | 35.415,50                 | 63,12                                       | -27,93%                                | 1.450.000                           |
| 0,25                     | 882                  | 32.492,50                 | 57,91                                       | -33,88%                                | 1.445.000                           |
| 0,30                     | 890                  | 32.120,00                 | 57,25                                       | -34,63%                                | 1.445.000                           |
| 0,35                     | 907                  | 31.340,00                 | 55,86                                       | -36,22%                                | 1.450.000                           |
| 0,40                     | 941                  | 30.415,50                 | 54,21                                       | -38,10%                                | 1.445.000                           |
| 0,45                     | 963                  | 29.841,50                 | 53,19                                       | -39,27%                                | 1.465.000                           |
| 0,50                     | 963                  | 29.841,50                 | 53,19                                       | -39,27%                                | 1.465.000                           |
| 0,55                     | 963                  | 29.841,50                 | 53,19                                       | -39,27%                                | 1.465.000                           |
| 0,60                     | 964                  | 29.839,50                 | 53,18                                       | -39,28%                                | 1.465.000                           |
| 0,65                     | 963                  | 29.841,50                 | 53,19                                       | -39,27%                                | 1.465.000                           |
| 0,70                     | 1.067                | 27.937,00                 | 49,79                                       | -43,15%                                | 1.590.000                           |
| 0,75                     | 1.091                | 27.519,50                 | 49,05                                       | -44,00%                                | 1.610.000                           |
| 0,80                     | 1.131                | 26.975,00                 | 48,08                                       | -45,10%                                | 1.600.000                           |

Tabela 24 – Resultado do cenário 3 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025

| Variação do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                         | 1.307                | 48.882,00                 | 105,15                                      | 0                                      | 1.750.000                           |
| 0,05                      | 1.307                | 34.446,00                 | 74,10                                       | -29,53%                                | 1.750.000                           |
| 0,10                      | 1.307                | 34.505,00                 | 74,22                                       | -29,41%                                | 1.750.000                           |
| 0,15                      | 1.307                | 34.430,00                 | 74,06                                       | -29,57%                                | 1.750.000                           |
| 0,20                      | 1.307                | 34.430,00                 | 74,06                                       | -29,57%                                | 1.750.000                           |
| 0,25                      | 1.307                | 34.430,00                 | 74,06                                       | -29,57%                                | 1.750.000                           |
| 0,30                      | 1.370                | 31.208,50                 | 67,13                                       | -36,16%                                | 1.740.000                           |
| 0,35                      | 1.370                | 31.133,00                 | 66,97                                       | -36,31%                                | 1.740.000                           |
| 0,40                      | 1.419                | 29.787,00                 | 64,07                                       | -39,06%                                | 1.750.000                           |
| 0,45                      | 1.433                | 29.394,00                 | 63,23                                       | -39,87%                                | 1.760.000                           |
| 0,50                      | 1.433                | 29.394,00                 | 63,23                                       | -39,87%                                | 1.760.000                           |
| 0,55                      | 1.433                | 29.394,00                 | 63,23                                       | -39,87%                                | 1.760.000                           |
| 0,60                      | 1.447                | 29.073,50                 | 62,54                                       | -40,52%                                | 1.770.000                           |
| 0,65                      | 1.447                | 29.073,50                 | 62,54                                       | -40,52%                                | 1.770.000                           |
| 0,70                      | 1.447                | 29.073,50                 | 62,54                                       | -40,52%                                | 1.770.000                           |
| 0,75                      | 1.513                | 28.086,00                 | 60,42                                       | -42,54%                                | 1.780.000                           |
| 0,80                      | 1.513                | 28.086,00                 | 60,42                                       | -42,54%                                | 1.780.000                           |

Na figura 65, que representa o cenário 4, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo no ano de 2021 em um valor mínimo de R\$ 831 mi com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 27,95%, através da redução de aproximadamente 14.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 155 mi acarretaria na redução de mais 12% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 25. Já para o ano de 2025, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo em um valor mínimo de R\$ 1.307 mi, com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 32,09%, através da redução de aproximadamente 16.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 140 mi acarretaria na redução de mais 10% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 26.

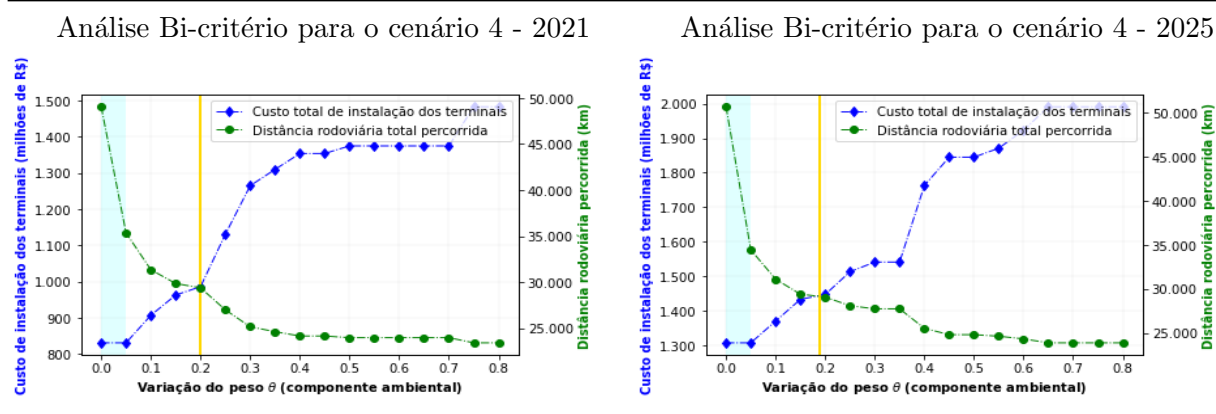


Figura 65 – Análise da variação do peso  $\theta$  para o resultado do cenário 4 com a preferência de utilização de intermodalidade em 75% de ferrovias e 25% de hidrovias no ano de 2021 e 2025.

Tabela 25 – Resultado do cenário 4 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenagem estática total para o ano de 2021

| Varição do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                        | 831                  | 49.054,00                 | 87,43                                       | 0                                      | 1.450.000                           |
| 0,05                     | 831                  | 35.344,50                 | 62,99                                       | -27,95%                                | 1.450.000                           |
| 0,10                     | 907                  | 31.340,00                 | 55,86                                       | -36,11%                                | 1.450.000                           |
| 0,15                     | 963                  | 29.841,50                 | 53,19                                       | -39,17%                                | 1.465.000                           |
| 0,20                     | 986                  | 29.376,00                 | 52,36                                       | -40,11%                                | 1.490.000                           |
| 0,25                     | 1.131                | 26.975,00                 | 48,08                                       | -45,01%                                | 1.600.000                           |
| 0,30                     | 1.265                | 25.139,50                 | 44,81                                       | -48,75%                                | 1.730.000                           |
| 0,35                     | 1.310                | 24.605,50                 | 43,85                                       | -49,84%                                | 1.780.000                           |
| 0,40                     | 1.354                | 24.136,50                 | 43,02                                       | -50,80%                                | 1.830.000                           |
| 0,45                     | 1.354                | 24.136,50                 | 43,02                                       | -50,80%                                | 1.830.000                           |
| 0,50                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -51,17%                                | 1.860.000                           |
| 0,55                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -51,17%                                | 1.860.000                           |
| 0,60                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -51,17%                                | 1.860.000                           |
| 0,65                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -51,17%                                | 1.860.000                           |
| 0,70                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -51,17%                                | 1.860.000                           |
| 0,75                     | 1.483                | 23.396,00                 | 41,70                                       | -52,31%                                | 1.910.000                           |
| 0,80                     | 1.483                | 23.396,00                 | 41,70                                       | -52,31%                                | 1.910.000                           |

Tabela 26 – Resultado do cenário 4 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025

| Variação do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                         | 1.307                | 50.700,00                 | 109,06                                      | 0                                      | 1.750.000                           |
| 0,05                      | 1.307                | 34.430,00                 | 74,06                                       | -32,09%                                | 1.750.000                           |
| 0,10                      | 1.370                | 31.101,50                 | 66,90                                       | -38,66%                                | 1.740.000                           |
| 0,15                      | 1.433                | 29.394,00                 | 63,23                                       | -42,02%                                | 1.760.000                           |
| 0,20                      | 1.447                | 29.073,50                 | 62,54                                       | -42,66%                                | 1.770.000                           |
| 0,25                      | 1.513                | 28.086,00                 | 60,42                                       | -44,60%                                | 1.780.000                           |
| 0,30                      | 1.541                | 27.735,00                 | 59,66                                       | -45,30%                                | 1.800.000                           |
| 0,35                      | 1.541                | 27.735,00                 | 59,66                                       | -45,30%                                | 1.800.000                           |
| 0,40                      | 1.763                | 25.518,50                 | 54,89                                       | -49,67%                                | 1.980.000                           |
| 0,45                      | 1.845                | 24.795,50                 | 53,34                                       | -51,09%                                | 2.060.000                           |
| 0,50                      | 1.845                | 24.795,50                 | 53,34                                       | -51,09%                                | 2.060.000                           |
| 0,55                      | 1.871                | 24.623,00                 | 52,97                                       | -51,43%                                | 2.080.000                           |
| 0,60                      | 1.923                | 24.313,00                 | 52,30                                       | -52,05%                                | 2.130.000                           |
| 0,65                      | 1.991                | 23.870,00                 | 51,35                                       | -52,92%                                | 2.130.000                           |
| 0,70                      | 1.991                | 23.870,00                 | 51,35                                       | -52,92%                                | 2.130.000                           |
| 0,75                      | 1.991                | 23.870,00                 | 51,35                                       | -52,92%                                | 2.130.000                           |
| 0,80                      | 1.991                | 23.870,00                 | 51,35                                       | -52,92%                                | 2.130.000                           |

Na figura 66, que representa o cenário 5, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo no ano de 2021 em um valor mínimo de R\$ 831 mi com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 31,03%, através da redução de aproximadamente 16.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 178 mi acarretaria na redução de mais 12% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 27. Já para o ano de 2025, a análise da região em azul claro destacada permite manter o custo de instalação de novos terminais de transbordo em um valor mínimo de R\$ 1.307 mi, com uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> em 25,97%, através da redução de aproximadamente 12.000km de tráfego rodoviário. Para atingir a linha amarela, o aumento de custo em R\$ 206 mi acarretaria na redução de mais 12% de emissão de CO<sub>2</sub>, conforme dados da tabela 28.

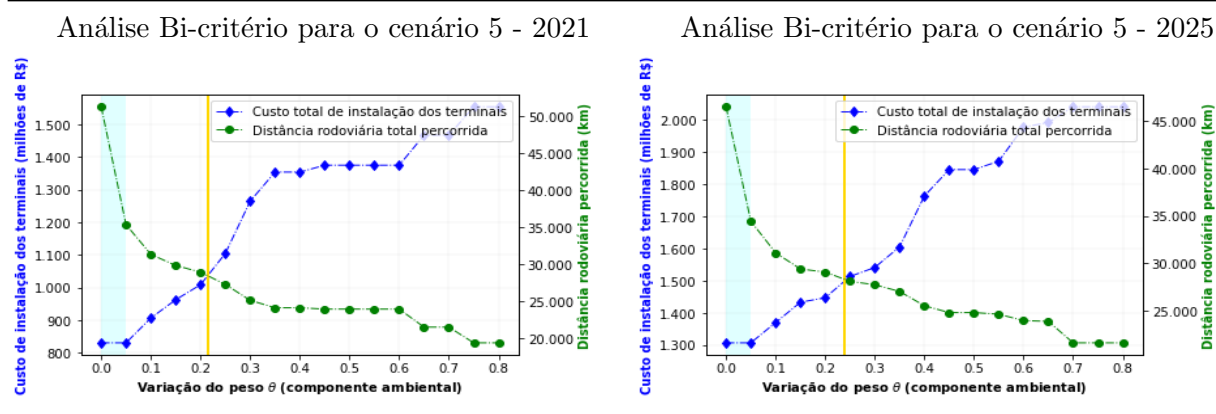


Figura 66 – Análise da variação do peso  $\theta$  para o resultado do cenário 5 com a preferência de utilização de intermodalidade em 25% de ferrovias e 75% de hidrovias no ano de 2021 e 2025.

Tabela 27 – Resultado do cenário 5 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2021

| Varição do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                        | 831                  | 51.246,50                 | 91,34                                       | 0                                      | 1.450.000                           |
| 0,05                     | 831                  | 35.344,50                 | 62,99                                       | -31,03%                                | 1.450.000                           |
| 0,10                     | 907                  | 31.340,00                 | 55,86                                       | -38,84%                                | 1.450.000                           |
| 0,15                     | 963                  | 29.841,50                 | 53,19                                       | -41,77%                                | 1.465.000                           |
| 0,20                     | 1.009                | 28.939,50                 | 51,58                                       | -43,53%                                | 1.520.000                           |
| 0,25                     | 1.105                | 27.276,50                 | 48,61                                       | -46,77%                                | 1.605.000                           |
| 0,30                     | 1.265                | 25.139,50                 | 44,81                                       | -50,94%                                | 1.730.000                           |
| 0,35                     | 1.354                | 24.136,50                 | 43,02                                       | -52,90%                                | 1.830.000                           |
| 0,40                     | 1.354                | 24.136,50                 | 43,02                                       | -52,90%                                | 1.830.000                           |
| 0,45                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -53,26%                                | 1.860.000                           |
| 0,50                     | 1.375                | 23.957,00                 | 42,70                                       | -53,25%                                | 1.860.000                           |
| 0,55                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -53,26%                                | 1.860.000                           |
| 0,60                     | 1.375                | 23.955,00                 | 42,70                                       | -53,26%                                | 1.860.000                           |
| 0,65                     | 1.467                | 21.525,00                 | 38,36                                       | -58,00%                                | 1.910.000                           |
| 0,70                     | 1.467                | 21.525,00                 | 38,36                                       | -58,00%                                | 1.910.000                           |
| 0,75                     | 1.554                | 19.408,50                 | 34,59                                       | -62,13%                                | 1.885.000                           |
| 0,80                     | 1.554                | 19.408,50                 | 34,59                                       | -62,13%                                | 1.885.000                           |

Tabela 28 – Resultado do cenário 5 considerando a variação do peso  $\theta$  e sua relação com os aspectos econômico, ambiental e capacidade de armazenamento estática total para o ano de 2025

| Varição do peso $\theta$ | Custo total (mi R\$) | Distância rod. total (km) | Emissão total CO <sub>2</sub> (x10 mil ton) | Redução na emissão CO <sub>2</sub> (%) | Capacidade estática instalada (ton) |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|---|--|-------------------------------------|
| 0                        | 1.307                | 46.509,50                 | 100,05                                      | 0                                      | 1.750.000                           |
| 0,05                     | 1.307                | 34.430,00                 | 74,06                                       | -25,97%                                | 1.750.000                           |
| 0,10                     | 1.370                | 31.101,50                 | 66,90                                       | -33,13%                                | 1.740.000                           |
| 0,15                     | 1.433                | 29.394,00                 | 63,23                                       | -36,80%                                | 1.760.000                           |
| 0,20                     | 1.447                | 29.073,50                 | 62,54                                       | -37,49%                                | 1.770.000                           |
| 0,25                     | 1.513                | 28.086,00                 | 60,42                                       | -39,61%                                | 1.780.000                           |
| 0,30                     | 1.541                | 27.735,00                 | 59,66                                       | -40,37%                                | 1.800.000                           |
| 0,35                     | 1.605                | 27.023,50                 | 58,13                                       | -41,90%                                | 1.830.000                           |
| 0,40                     | 1.763                | 25.518,50                 | 54,89                                       | -45,13%                                | 1.980.000                           |
| 0,45                     | 1.845                | 24.795,50                 | 53,34                                       | -46,69%                                | 2.060.000                           |
| 0,50                     | 1.845                | 24.795,50                 | 53,34                                       | -46,69%                                | 2.060.000                           |
| 0,55                     | 1.871                | 24.623,00                 | 52,97                                       | -47,06%                                | 2.080.000                           |
| 0,60                     | 1.977                | 23.949,00                 | 51,52                                       | -48,51%                                | 2.120.000                           |
| 0,65                     | 1.991                | 23.870,00                 | 51,35                                       | -48,68%                                | 2.130.000                           |
| 0,70                     | 2.040                | 21.606,00                 | 46,48                                       | -53,54%                                | 2.130.000                           |
| 0,75                     | 2.040                | 21.606,00                 | 46,48                                       | -53,54%                                | 2.130.000                           |
| 0,80                     | 2.040                | 21.606,00                 | 46,48                                       | -53,54%                                | 2.130.000                           |

A análise da variação do peso  $\theta$  em cada cenário possibilitou identificar regiões de eficiência econômica combinadas com menores quantidades de emissão de CO<sub>2</sub>. O percentual obtido de redução nas emissões de CO<sub>2</sub> estão próximos dos resultados de Branco et al. (2020) e Vidotte Plaza et al. (2020). Como os terminais de transbordo são estrategicamente posicionados em locais com maior potencial para a intermodalidade segundo a EPL (2021), a instalação dessas estruturas permite reduzir consideravelmente o tráfego de caminhões pelas rodovias de outros estados, gerando assim um menor custo operacional por quilômetro rodado nessa modalidade de transporte. Do ponto de vista gerencial, esses resultados permitem que tomadores de decisão possam implementar ações que combinem menores custos econômicos e sustentabilidade ambiental. Além disso, preenche lacunas nos estudos de Garcia et al. (2019), Melo et al. (2018), Lopes et al. (2017), Oliveira e Cicolin (2016) e Zucchi et al. (2011), já que permite a busca de rotas mais eficientes para a exportação da soja do estado do Mato Grosso a partir de terminais de transbordo estrategicamente posicionados.

## 7 RESULTADOS DO MODELO DE REDE DE PETRI P-TEMPORIZADA

O presente capítulo apresenta os resultados da simulação em rede de Petri P-temporizada estocástica dos cenários de otimização, nos quais foram considerados os principais portos de exportação ilustrados na Figura 50. O objetivo central dessa segunda etapa está em explorar as melhores rotas para o escoamento de soja destinada à exportação privilegiando a intermodalidade. A condição definida para a geração dos cenários de simulação utiliza o resultado de cada cenário do modelo de otimização que apresenta o menor custo de implantação dos terminais de transbordo conjuntamente com o critério de menor distância percorrida, ou seja, menor emissão de CO<sub>2</sub>. Essa condição é obtida considerando o maior valor de  $\theta$  (componente ambiental) contido na região em azul, nas Figuras 62, 63, 64, 65, 66 da Seção 6.2. A partir desse pressuposto, são apresentados nas seções seguintes, os resultados dos cenários das simulações em rede de Petri P-temporizada estocástica, bem como a análise das soluções encontradas.

### 7.1 Resultados dos Cenários da Rede de Petri P-temporizada

Para calcular os resultados referentes às rotas de exportação de soja do estado do Mato Grosso, de acordo com o exemplo do modelo de simulação da Seção 5.7, foram elaborados cinco cenários. Os cenários prioritariamente investigam situações de tomada de decisão que envolvem custos operacionais relacionado ao escoamento de um quantitativo de soja por determinados percursos e os impactos ambientais relacionados à emissão de CO<sub>2</sub>. Para obter as soluções, foram realizados testes de simulação envolvendo 5, 10, 15 e 20 réplicas, sendo adotado o padrão de 15 réplicas para cada cenário. O tempo médio de simulação para cada cenário foi de 130 segundos e o número de estados da rede de Petri variou de 8.700 a 10.115, dependendo do tipo de cenário analisado. Todos os intervalos de confiança foram parametrizados a um nível de confiança de 95% para a estimativa do valor esperado. Ao final da simulação de cada cenário, compararam-se as quantidades médias de soja obtidas pelo modelo com a quantidade de soja esperada a ser percorrida por aquela rota de origem/destino, a partir da estatística P-value, para o grau de confiança de 95%. Este teste possui a característica de contrapor resultados simulados com um valor esperado. Estatísticas de P-value acima de 0,10 indicam efetiva validação dos resultados da rede de Petri P-temporizada estocástica simulada com os valores esperados do sistema.

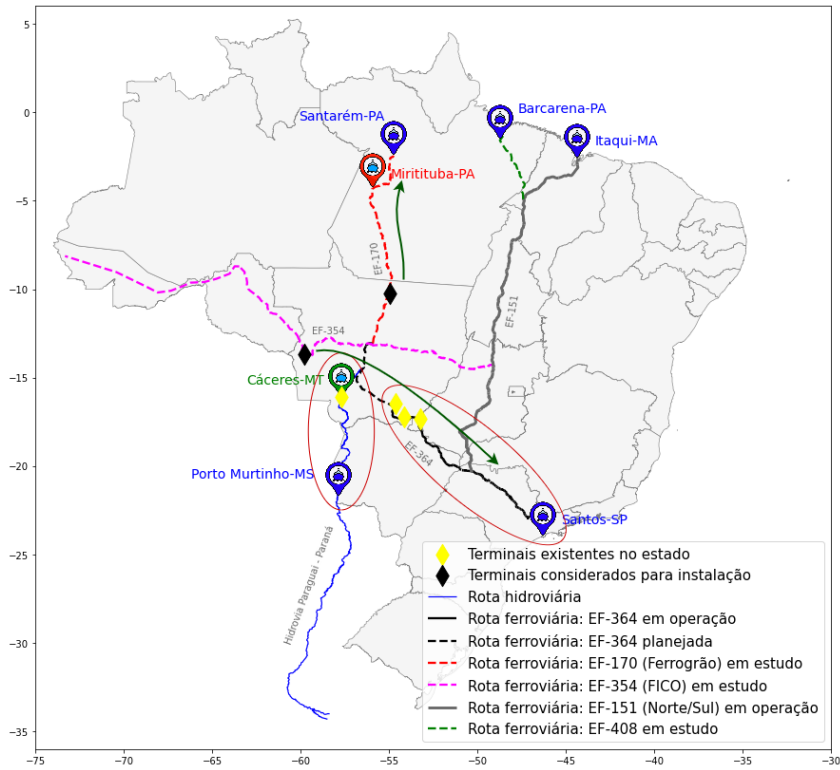


### 7.1.1 Cenário 1

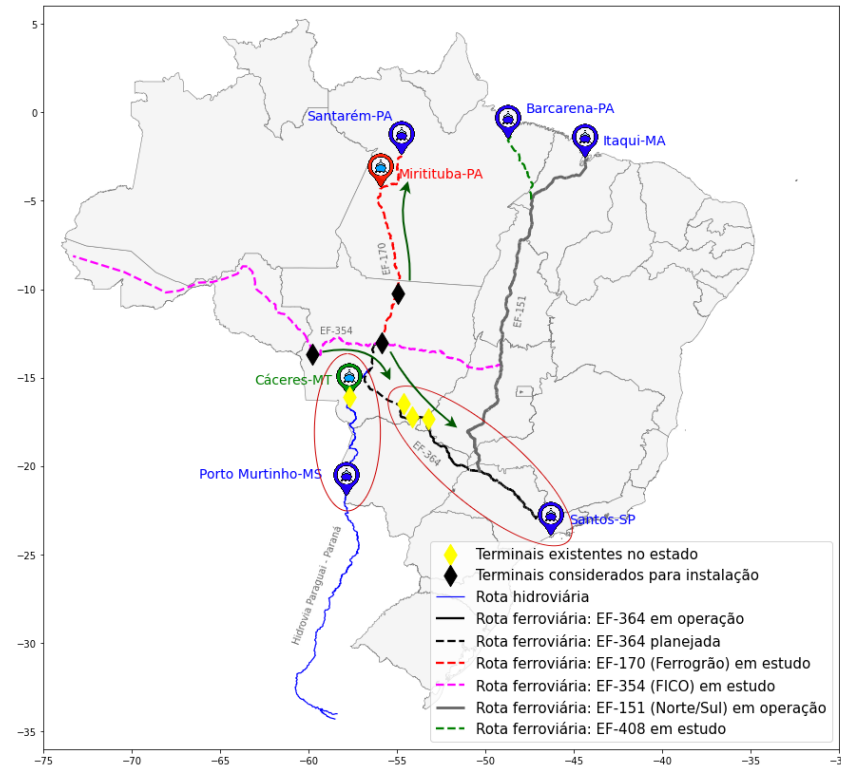
Este cenário considera a implantação de novos terminais de transbordo no Mato Grosso a partir dos projetos de expansão da malha ferroviário no estado. Nele, são organizados os casos 1a, 1b e 1c, nos quais são explorados rotas adicionais de exportação de soja de acordo com os possíveis portos exportadores do grão. Como o projeto ferroviário da EF-170 (Ferrogrão) prevê a cidade de Miritituba (PA) como ponto de término, este cenário considera um transbordo adicional de carga nesta localidade, bem como a mudança para o modo hidroviário para se alcançar o porto de exportação. A simulação é construída com o resultado realizado de exportação de soja para o ano de 2021 e com a projeção de produção e exportação para o ano de 2025, segundo [IMEA \(2015, 2019\)](#).

#### 7.1.1.1 Cenário 1a

Neste cenário são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 67, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 29. Na sequência, é apresentada a modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica (Figura 86) que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador (Tabelas 89 e 90). Por fim, são descritos os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 30), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabelas 33 e 34) e os custos de transporte da soja por essas rotas (Tabelas 35 e 36), todos com suas medidas estatísticas.



Ano 2021



Ano 2025

Figura 67 – Mapa de referência do cenário 1a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 29 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 1a - 100% ferroviário

| 2021                    |                         |                     |                         |                  |
|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|------------------|
| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado         | Rota                | Distância estimada (km) | Porto de destino |
| Comodoro                | Ferrovário              | EF-354, EF-364      | 2.520                   | Santos - SP      |
| Peixoto de Azevedo      | Ferrovário / Hidrovário | EF-170, Rio Tapajós | 1030                    | Santarém - PA    |
| 2025                    |                         |                     |                         |                  |
| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado         | Rota                | Distância estimada (km) | Porto de destino |
| Comodoro                | Ferrovário              | EF-354, EF-364      | 2.520                   | Santos - SP      |
| Lucas do Rio Verde      | Ferrovário              | EF-364              | 1.880                   | Santos - SP      |
| Matupá                  | Ferrovário / Hidrovário | EF-170, Rio Tapajós | 1.010                   | Santarém - PA    |

Tabela 30 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 1a nos anos de 2021 e 2025

| 2021  |                     |                          |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
| Terminais de transbordo - MT  | Portos de destino   | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 787.000,00               | 29.681,64           | 775.365,01 - 798.634,99       | 0,68    | 791.277,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro                     | Santos - SP         | 11.775.000,00            | 423.798,30          | 11.608.874,12 - 11.941.125,88 | 0,92    | 11.788.678,00               |
| Peixoto de Azevedo  | Santarém - PA       | 10.084.000,00            | 816.886,77          | 9.763.786,27 - 10.404.213,73  | 0,29    | 10.387.832,00               |
| 2025  |                     |                          |                     |                               |         |                             |
| Terminais de transbordo - MT  | Portos de destino   | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 795.000,00               | 38.535,70           | 779.894,28 - 810.105,72       | 0,41    | 783.825,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro, Lucas do Rio Verde | Santos - SP         | 24.091.000,00            | 1.234.661,49        | 23.607.021,59 - 24.574.978,41 | 0,89    | 24.147.271,00               |
| Matupá  | Santarém - PA       | 2.755.000,00             | 177.946,62          | 2.685.246,21 - 2.824.753,79   | 0,58    | 2.788.904,00                |

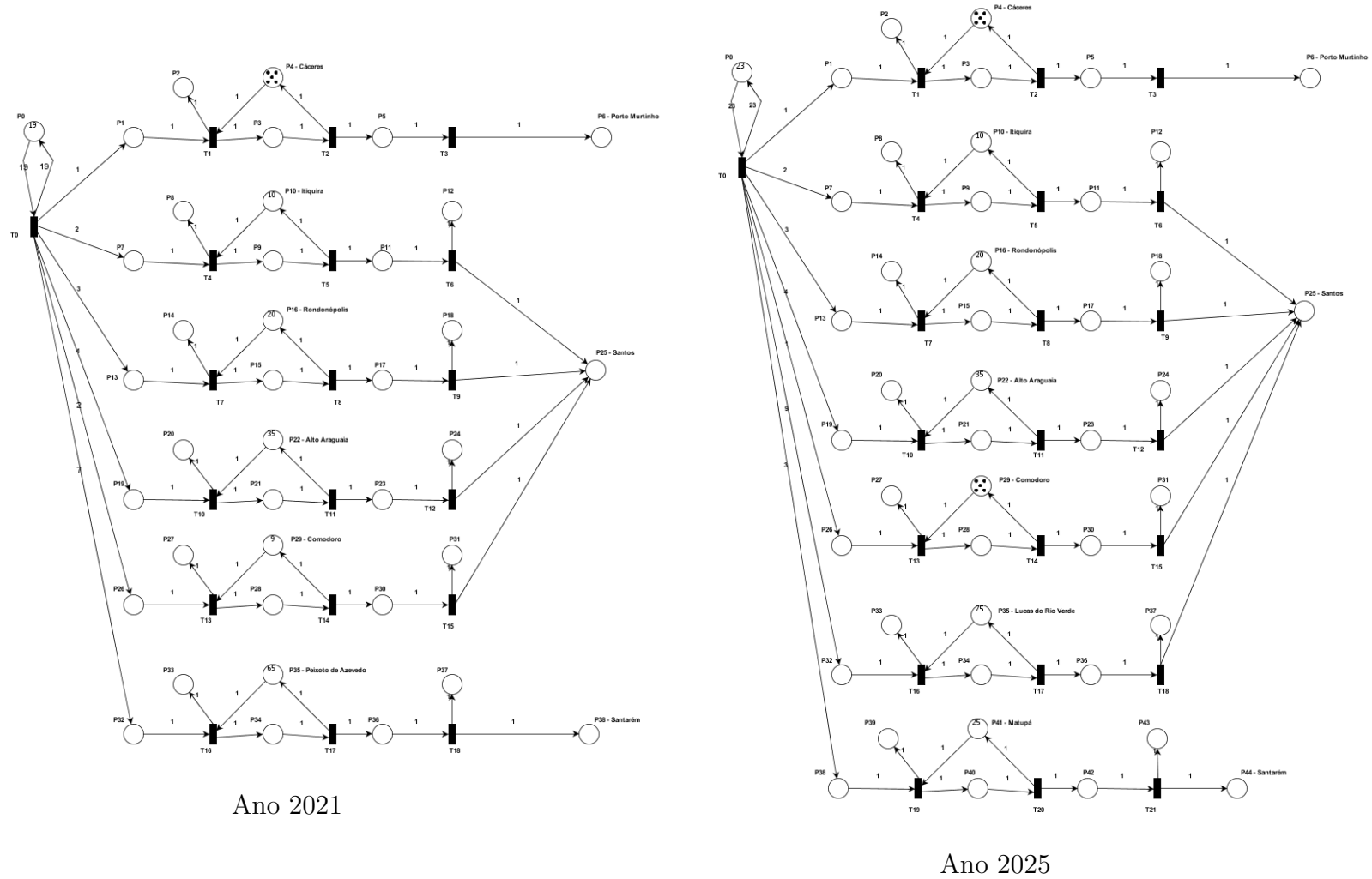


Figura 68 – Modelo de rede de Petri do cenário 1a para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 31 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2021 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2021             | 2021         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | expo(0,9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.51)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.51)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6/2)  |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 9                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6/2)  |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.8/7)  |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 65               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.8/7)  |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 32 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2025 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2025             | 2025         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 23               | expo(0,9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.53)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.53)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6)    |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)    |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/9) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 75               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.84/9) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.3/3)  |
| P39   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P40   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P41   | Capacidade do terminal                             | 25               | 1            |
| P42   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.3/3)  |
| P43   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P44   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 33 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 1a no ano de 2021 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 58.988,01                              | 58.115,93 - 59.860,09              | 74,95                                  | 73,84 - 76,06                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 99.444,76                              | 98.611,46 - 100.278,07             | 62,31                                  | 61,79 - 62,83                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 215.341,98                             | 212.415,45 - 218.268,51            | 69,51                                  | 68,57 - 70,45                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 393.212,55                             | 383.163,93 - 403.261,17            | 70,52                                  | 68,72 - 72,32                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 119.549,68                             | 118.746,70 - 120.352,65            | 79,44                                  | 78,90 - 79,97                   |
| Peixoto de Azevedo           | Santarém - PA       | 627.560,09                             | 607.632,15 - 647.488,03            | 62,23                                  | 60,26 - 64,21                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.514.097,07</b>                    | <b>1.478.685,63 - 1.549.508,52</b> | <b>66,86</b>                           | <b>65,30 - 68,42</b>            |

Tabela 34 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 1a no ano de 2025 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 62.234,99                              | 61.052,46 - 63.417,51              | 78,28                                  | 76,80 - 79,77                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 82.873,10                              | 82.008,30 - 83.737,89              | 51,7                                   | 51,16 - 52,24                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 191.072,30                             | 189.340,26 - 192.804,34            | 59,45                                  | 58,91 - 59,99                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 406.102,65                             | 395.261,55 - 416.943,74            | 71,36                                  | 69,45 - 73,26                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 58.742,97                              | 57.995,36 - 59.490,58              | 68,47                                  | 67,59 - 69,34                   |
| Lucas do Rio Verde           | Santos - SP         | 862.309,62                             | 841.231,19 - 883.388,06            | 67,77                                  | 66,11 - 69,42                   |
| Matupá                       | Santarém - PA       | 204.615,92                             | 199.435,25 - 209.796,58            | 74,27                                  | 72,39 - 76,15                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.867.951,54</b>                    | <b>1.826.324,38 - 1.909.578,70</b> | <b>67,58</b>                           | <b>66,07 - 69,09</b>            |

Tabela 35 – Resultado do custo da rota para o cenário 1a no ano de 2021 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 45.382.276,30           | 44.711.345,72 - 46.053.206,88              | 57,66                  | 56,81 - 58,52                        |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 111.217.100,40          | 110.285.149,02 - 112.149.051,78            | 69,68                  | 69,10 - 70,27                        |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 239.025.880,20          | 235.777.482,28 - 242.274.278,12            | 77,15                  | 76,11 - 78,20                        |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 394.975.402,40          | 384.881.732,53 - 405.069.072,27            | 70,83                  | 69,02 - 72,65                        |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 164.007.224,50          | 162.905.646,16 - 165.108.802,84            | 108,97                 | 108,24 - 109,71                      |
| Peixoto de Azevedo           | Santarém - PA       | 602.113.623,20          | 582.993.725,37 - 621.233.521,03            | 59,71                  | 57,81 - 61,61                        |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.556.721.507,00</b> | <b>1.521.555.081,08 - 1.591.887.932,92</b> | <b>68,74</b>           | <b>67,19 - 70,29</b>                 |

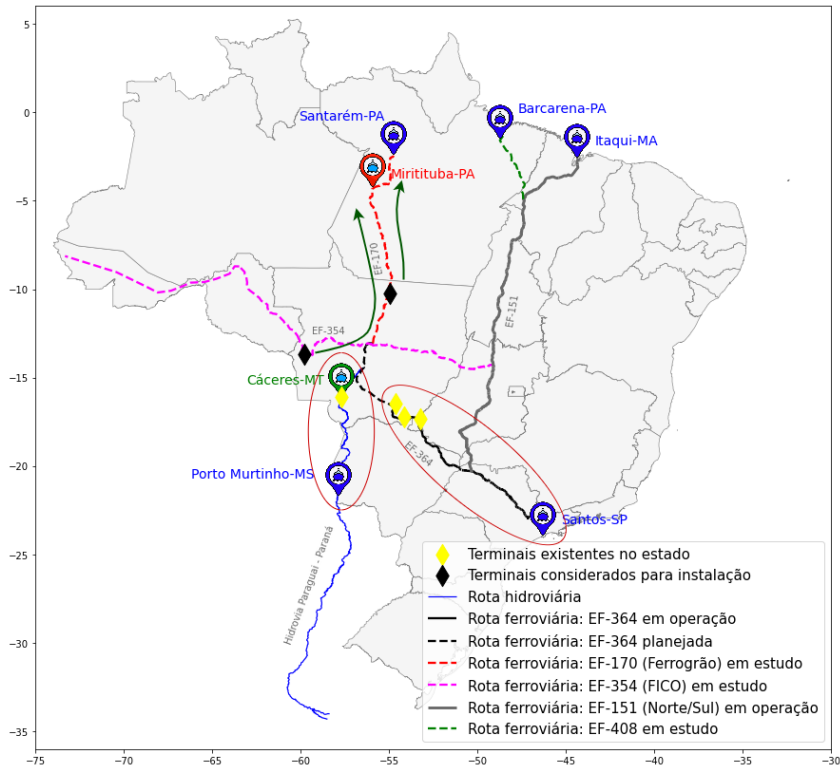
Tabela 36 – Resultado do custo da rota para o cenário 1a no ano de 2025 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2025                    |  |                        |                                      |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 47.449.495,50           | 46.547.912,35 - 48.351.078,65              | 59,68                  | 58,55 - 60,82                        |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 101.413.634,70          | 100.355.366,16 - 102.471.903,24            | 63,26                  | 62,60 - 63,93                        |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 228.788.268,60          | 226.714.344,77 - 230.862.192,43            | 71,18                  | 70,54 - 71,83                        |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 406.023.825,90          | 395.184.831,36 - 416.862.820,44            | 71,34                  | 69,44 - 73,25                        |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 87.803.344,20           | 86.685.882,32 - 88.920.806,08              | 102,33                 | 101,03 - 103,64                      |
| Lucas do Rio Verde           | Santos - SP         | 1.102.174.602,50        | 1.075.232.872,97 - 1.129.116.332,03        | 86,61                  | 84,50 - 88,73                        |
| Matupá                       | Santarém - PA       | 183.262.049,00          | 178.622.040,59 - 187.902.057,41            | 66,52                  | 64,84 - 68,20                        |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.926.203.675,90</b> | <b>1.884.173.297,59 - 1.968.234.054,21</b> | <b>79,96</b>           | <b>78,21 - 81,70</b>                 |

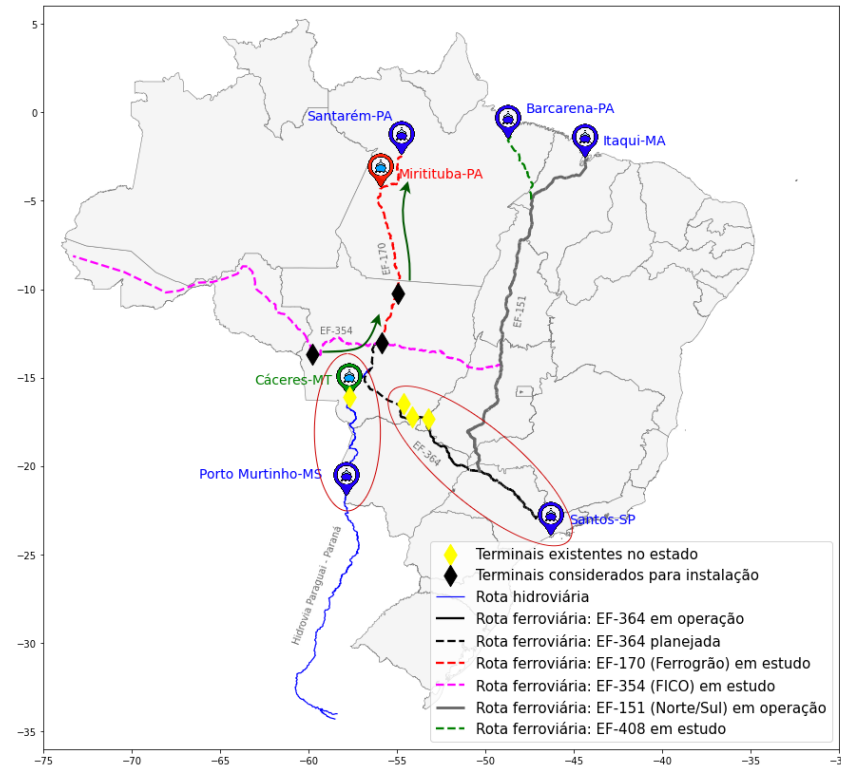
### 7.1.1.2 Cenário 1b

Neste cenário são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 69, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 37. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 87 e Tabelas 93 e 92. Os resultados quantitativos de soja destinada cada porto (Tabela 38), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabelas 39 e 40) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabelas 41 e 42), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.





Ano 2021



Ano 2025

Figura 69 – Mapa de referência do cenário 1b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 37 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 1b - 100% ferroviário

| 2021                    |                          |                             |                         |                  |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------|
| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado          | Rota                        | Distância estimada (km) | Porto de destino |
| Comodoro                | Ferrovário / Hidroviário | EF-354, EF-170, Rio Tapajós | 1.910                   | Santarém - PA    |
| Peixoto de Azevedo      | Ferrovário / Hidroviário | EF-170, Rio Tapajós         | 1.030                   | Santarém - PA    |
| 2025                    |                          |                             |                         |                  |
| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado          | Rota                        | Distância estimada (km) | Porto de destino |
| Comodoro                | Ferrovário / Hidroviário | EF-354, EF-170, Rio Tapajós | 1.910                   | Santarém - PA    |
| Lucas do Rio Verde      | Ferrovário / Hidroviário | EF-170, Rio Tapajós         | 1.370                   | Santarém - PA    |
| Matupá                  | Ferrovário / Hidroviário | EF-170, Rio Tapajós         | 1.010                   | Santarém - PA    |

Tabela 38 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 1b nos anos de 2021 e 2025

| 2021                                  |                    |                          |                     |                               |         |                             |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
| Terminais de transbordo - MT          | Portos de destino  | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres                               | Porto Murinho - MS | 779.000,00               | 30.149,63           | 767.181,56 - 790.818,44       | 0,25    | 791.277,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia | Santos - SP        | 10.268.000,00            | 382.538,89          | 10.118.047,51 - 10.417.952,49 | 0,53    | 10.350.647,00               |
| Comodoro, Peixoto de Azevedo          | Santarém - PA      | 11.706.000,00            | 744.583,10          | 11.414.128,79 - 11.997.871,21 | 0,64    | 11.825.863,00               |
| 2025                                  |                    |                          |                     |                               |         |                             |
| Terminais de transbordo - MT          | Portos de destino  | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres                               | Porto Murinho - MS | 781.000,00               | 27.367,86           | 770.271,99 - 791.728,01       | 0,76    | 783.825,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia | Santos - SP        | 10.434.000,00            | 410.443,66          | 10.273.109,04 - 10.594.890,96 | 0,75    | 10.389.421,00               |
| Comodoro, Lucas do Rio Verde, Matupá  | Santarém - PA      | 16.286.000,00            | 737.647,61          | 15.996.847,45 - 16.575.152,55 | 0,32    | 16.546.754,00               |

Tabela 39 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 1b no ano de 2021 - 100% ferroviário

| 2021                         |                    |  |                                    |  |                                 |
|------------------------------|--------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino  | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murinho - MS | 58.388,39                              | 57.502,56 - 59.274,21              | 74,95                                  | 73,82 - 76,09                   |
| Itiquira                     | Santos - SP        | 99.008,60                              | 98.331,29 - 99.685,92              | 62,31                                  | 61,88 - 62,74                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP        | 214.716,39                             | 211.875,72 - 217.557,06            | 69,51                                  | 68,59 - 70,43                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP        | 394.199,81                             | 385.735,50 - 402.664,12            | 70,52                                  | 69,00 - 72,03                   |
| Comodoro                     | Santarém - PA      | 105.727,01                             | 105.038,24 - 106.415,78            | 68,34                                  | 67,90 - 68,79                   |
| Peixoto de Azevedo           | Santarém - PA      | 632.227,59                             | 614.338,74 - 650.116,43            | 62,23                                  | 60,47 - 63,99                   |
| <b>Total</b>                 |                    | <b>1.504.267,79</b>                    | <b>1.472.822,06 - 1.535.713,52</b> | <b>66,11</b>                           | <b>64,73 - 67,49</b>            |

Tabela 40 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 1b no ano de 2025 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murтинho - MS | 61.139,02                              | 60.299,20 - 61.978,84              | 78,28                                  | 77,21 - 79,36                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 82.769,70                              | 81.865,89 - 83.673,51              | 51,7                                   | 51,13 - 52,26                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 187.624,20                             | 184.765,87 - 190.482,53            | 59,45                                  | 58,54 - 60,36                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 405.103,62                             | 396.950,29 - 413.256,96            | 71,36                                  | 69,92 - 72,79                   |
| Comodoro                     | Santarém - PA       | 49.513,11                              | 48.653,48 - 50.372,75              | 57,37                                  | 56,38 - 58,37                   |
| Lucas do Rio Verde           | Santarém - PA       | 745.037,10                             | 731.417,69 - 758.656,52            | 58,84                                  | 57,76 - 59,91                   |
| Matupá                       | Santarém - PA       | 204.987,27                             | 199.573,39 - 210.401,15            | 74,27                                  | 72,31 - 76,23                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.736.174,03</b>                    | <b>1.703.525,82 - 1.768.822,24</b> | <b>63,13</b>                           | <b>61,94 - 64,32</b>            |

Tabela 41 – Resultado do custo da rota para o cenário 1b no ano de 2021 - 100% ferroviário

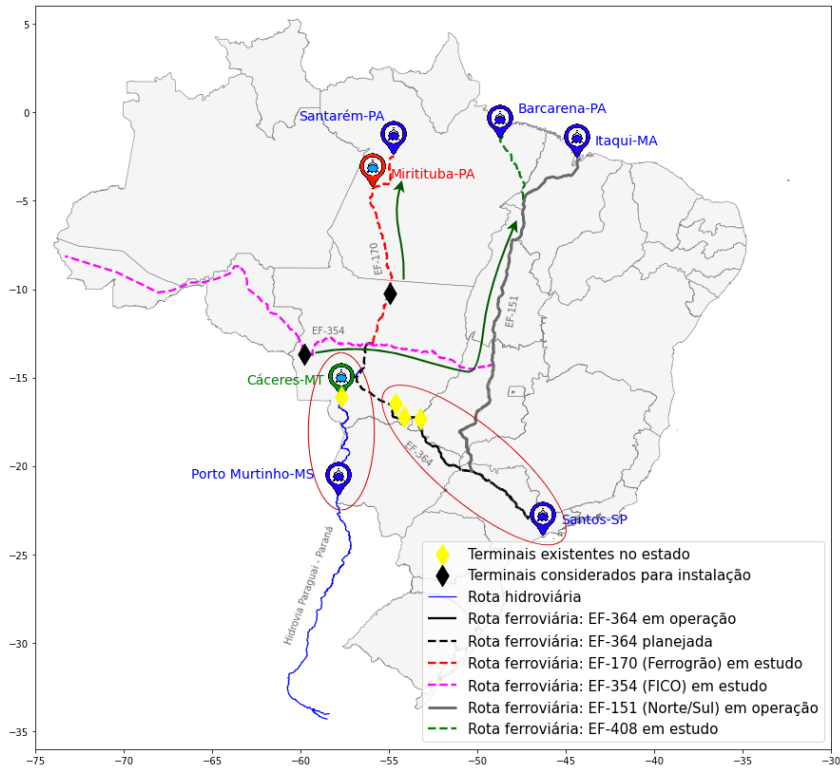
| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) |
| Cáceres                      | Porto Murтинho - MS | 44.920.957,10           | 44.239.448,14 - 45.602.466,06              | 57,66                  | 56,79 - 58,54                        |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 110.729.306,10          | 109.971.810,81 - 111.486.801,39            | 69,68                  | 69,21 - 70,16                        |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 238.331.486,10          | 235.178.395,91 - 241.484.576,29            | 77,15                  | 76,13 - 78,18                        |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 395.967.091,00          | 387.464.835,12 - 404.469.346,88            | 70,83                  | 69,31 - 72,36                        |
| Comodoro                     | Santarém - PA       | 130.628.370,60          | 129.777.377,55 - 131.479.363,65            | 84,44                  | 83,89 - 84,99                        |
| Peixoto de Azevedo           | Santarém - PA       | 606.591.858,20          | 589.428.374,87 - 623.755.341,53            | 59,71                  | 58,02 - 61,40                        |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.527.169.069,10</b> | <b>1.496.060.242,39 - 1.558.277.895,81</b> | <b>67,12</b>           | <b>65,75 - 68,49</b>                 |

Tabela 42 – Resultado do custo da rota para o cenário 1b no ano de 2025 - 100% ferroviário

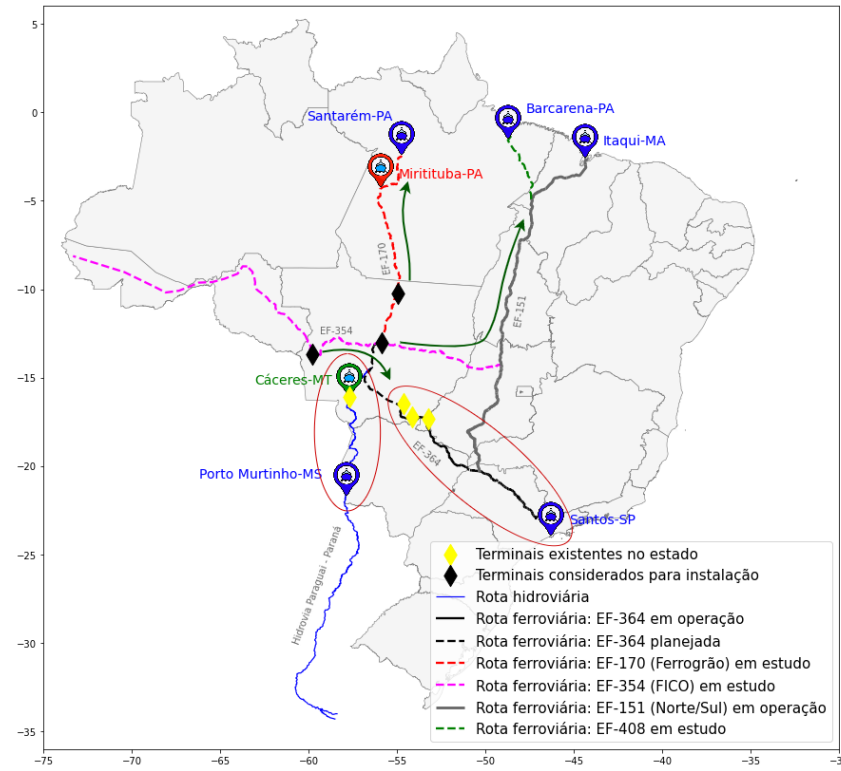
| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2025                    |  |                        |                                      |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) |
| Cáceres                      | Porto Murтинho - MS | 46.613.906,90           | 45.973.606,95 - 47.254.206,85              | 59,68                  | 58,87 - 60,50                        |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 101.287.104,90          | 100.181.096,81 - 102.393.112,99            | 63,26                  | 62,57 - 63,96                        |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 224.659.544,40          | 221.237.011,53 - 228.082.077,27            | 71,18                  | 70,10 - 72,27                        |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 405.024.997,30          | 396.873.247,75 - 413.176.746,85            | 71,34                  | 69,91 - 72,78                        |
| Comodoro                     | Santarém - PA       | 67.141.227,40           | 65.975.541,15 - 68.306.913,65              | 77,8                   | 76,45 - 79,15                        |
| Lucas do Rio Verde           | Santarém - PA       | 832.969.607,40          | 817.742.770,84 - 848.196.443,96            | 65,78                  | 64,58 - 66,98                        |
| Matupá                       | Santarém - PA       | 183.594.648,00          | 178.745.767,11 - 188.443.528,89            | 66,52                  | 64,76 - 68,28                        |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.861.291.036,30</b> | <b>1.826.729.042,14 - 1.895.853.030,46</b> | <b>67,68</b>           | <b>66,42 - 68,94</b>                 |

### 7.1.1.3 Cenário 1c

Neste cenário são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 70, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 43. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 88 e Tabelas 93 e 94. Os resultados quantitativos de soja destinada cada porto (Tabela 44), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabelas 45 e 46) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabelas 47 e 48), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.



Ano 2021



Ano 2025

Figura 70 – Mapa de referência do cenário 1c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 43 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 1c - 100% ferroviário

| 2021                    |                                |                        |                         |                  |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|
| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado                | Rota                   | Distância estimada (km) | Porto de destino |
| Comodoro                | Ferrovário                     | EF-354, EF-151, EF-408 | 2.950                   | Barcarena - PA   |
| Comodoro                | Ferrovário                     | EF-354, EF-151, EF-315 | 3.160                   | Itaqui - MA      |
| Peixoto de Azevedo      | Ferrovário / Hidroviário       | EF-170, Rio Tapajós    | 1.030                   | Santarém - PA    |
| 2025                    |                                |                        |                         |                  |
| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado                | Rota                   | Distância estimada (km) | Porto de destino |
| Comodoro                | Ferrovário                     | EF-354, EF-364         | 2.520                   | Santos - SP      |
| Lucas do Rio Verde      | Ferrovário                     | EF-354, EF-151, EF-408 | 2.460                   | Barcarena - PA   |
| Lucas do Rio Verde      | Ferrovário                     | EF-354, EF-151, EF-315 | 2.670                   | Itaqui - MA      |
| Matupá                  | Ferrovário / Hidroviário 750km | EF-170, Rio Tapajós    | 1.010                   | Santarém - PA    |

Tabela 44 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 1c nos anos de 2021 e 2025

| 2021  |                     |                          |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 784.000,00               | 29.732,14           | 772.345,22 - 795.654,78       | 0,48    | 791.277,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia           | Santos - SP         | 10.238.000,00            | 493.311,26          | 10.044.625,54 - 10.431.374,46 | 0,51    | 10.350.647,00               |
| Comodoro  | Barcarena - PA      | 724.000,00               | 28.705,40           | 712.747,69 - 735.252,31       | 0,62    | 719.016,00                  |
| Comodoro  | Itaqui - MA         | 727.000,00               | 18.466,19           | 719.761,39 - 734.238,61       | 0,23    | 719.016,00                  |
| Peixoto de Azevedo                              | Santarém - PA       | 10.105.000,00            | 854.508,63          | 9.770.038,77 - 10.439.961,23  | 0,35    | 10.387.832,00               |
| 2025  |                     |                          |                     |                               |         |                             |
| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 776.000,00               | 30.724,58           | 763.956,18 - 788.043,82       | 0,46    | 783.825,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 11.220.000,00            | 334.604,24          | 11.088.837,55 - 11.351.162,45 | 0,28    | 11.348.660,00               |
| Lucas do Rio Verde 480 até nova nazaré          | Barcarena - PA      | 6.313.000,00             | 273.497,71          | 6.205.790,87 - 6.420.209,13   | 0,37    | 6.399.306,00                |
| Lucas do Rio Verde                              | Itaqui - MA         | 6.313.000,00             | 272.251,72          | 6.206.279,29 - 6.419.720,71   | 0,37    | 6.399.306,00                |
| Matupá  | Santarém - PA       | 2.732.000,00             | 205.805,73          | 2.651.325,63 - 2.812.674,37   | 0,43    | 2.788.904,00                |

Tabela 45 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 1c no ano de 2021 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murтинho - MS | 58.763,15                              | 57.889,59 - 59.636,71              | 74,95                                  | 73,84 - 76,07                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 99.507,07                              | 99.005,92 - 100.008,22             | 62,31                                  | 61,99 - 62,62                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 215.759,04                             | 212.473,04 - 219.045,04            | 69,51                                  | 68,45 - 70,57                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 390.462,32                             | 379.573,67 - 401.350,97            | 70,52                                  | 68,55 - 72,49                   |
| Comodoro                     | Barcarena - PA      | 64.243,24                              | 63.244,78 - 65.241,69              | 88,73                                  | 87,35 - 90,11                   |
| Comodoro                     | Itaqui - MA         | 67.810,93                              | 67.135,74 - 68.486,11              | 93,28                                  | 92,35 - 94,20                   |
| P. de Azevedo                | Santarém - PA       | 628.866,99                             | 608.021,27 - 649.712,72            | 62,23                                  | 60,17 - 64,30                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.525.412,74</b>                    | <b>1.487.344,01 - 1.563.481,46</b> | <b>67,56</b>                           | <b>65,88 - 69,25</b>            |

Tabela 46 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 1c no ano de 2025 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murтинho - MS | 60.747,61                              | 59.804,78 - 61.690,43              | 78,28                                  | 77,07 - 79,50                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 81.735,72                              | 80.624,07 - 82.847,38              | 51,7                                   | 51,00 - 52,40                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 185.840,70                             | 184.521,60 - 187.159,80            | 59,45                                  | 59,03 - 59,87                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 404.532,75                             | 397.606,67 - 411.458,83            | 71,36                                  | 70,14 - 72,58                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 57.784,46                              | 56.917,30 - 58.651,62              | 68,47                                  | 67,44 - 69,49                   |
| Lucas do Rio Verde           | Barcarena - PA      | 506.981,25                             | 498.371,55 - 515.590,95            | 80,31                                  | 78,94 - 81,67                   |
| Lucas do Rio Verde           | Itaqui - MA         | 535.650,16                             | 526.595,04 - 544.705,28            | 84,85                                  | 83,41 - 86,28                   |
| Matupá                       | Santarém - PA       | 202.907,69                             | 196.915,94 - 208.899,43            | 74,27                                  | 72,08 - 76,46                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>2.036.180,34</b>                    | <b>2.001.356,97 - 2.071.003,71</b> | <b>74,44</b>                           | <b>73,17 - 75,71</b>            |

Tabela 47 – Resultado do custo da rota para o cenário 1c no ano de 2021 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) |
| Cáceres                      | Porto Murтинho - MS | 45.209.281,60           | 44.537.209,66 - 45.881.353,54              | 57,66                  | 56,81 - 58,52                        |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 111.286.785,30          | 110.726.308,27 - 111.847.262,33            | 69,68                  | 69,33 - 70,04                        |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 239.488.809,60          | 235.841.408,44 - 243.136.210,76            | 77,15                  | 75,98 - 78,33                        |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 392.212.841,30          | 381.275.376,79 - 403.150.305,81            | 70,83                  | 68,86 - 72,81                        |
| Comodoro                     | Barcarena - PA      | 90.416.667,60           | 89.011.423,98 - 91.821.911,22              | 124,88                 | 122,94 - 126,83                      |
| Comodoro                     | Itaqui - MA         | 96.440.112,30           | 95.479.875,00 - 97.400.349,60              | 132,65                 | 131,33 - 133,98                      |
| Peixoto de Azevedo           | Santarém - PA       | 603.367.529,00          | 583.367.061,06 - 623.367.996,94            | 59,71                  | 57,73 - 61,69                        |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.578.422.026,70</b> | <b>1.540.238.663,20 - 1.616.605.390,20</b> | <b>69,91</b>           | <b>68,22 - 71,60</b>                 |

Tabela 48 – Resultado do custo da rota para o cenário 1c no ano de 2025 - 100% ferroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2025                    |  |                        |                                      |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 46.315.482,40           | 45.596.648,49 - 47.034.316,31              | 59,68                  | 58,76 - 60,61                        |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 100.021.806,90          | 98.661.452,69 - 101.382.161,11             | 63,26                  | 62,40 - 64,13                        |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 222.523.997,40          | 220.944.524,35 - 224.103.470,45            | 71,18                  | 70,68 - 71,69                        |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 404.454.238,10          | 397.529.503,45 - 411.378.972,75            | 71,34                  | 70,12 - 72,57                        |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 86.370.655,60           | 85.074.515,03 - 87.666.796,17              | 102,33                 | 100,80 - 103,87                      |
| Lucas do Rio Verde           | Barcarena - PA      | 682.276.843,70          | 670.690.227,25 - 693.863.460,15            | 108,07                 | 106,24 - 109,91                      |
| Lucas do Rio Verde           | Itaqui - MA         | 731.328.853,70          | 718.965.803,27 - 743.691.904,13            | 115,84                 | 113,89 - 117,80                      |
| Matupá                       | Santarém - PA       | 181.732.093,60          | 176.365.650,97 - 187.098.536,23            | 66,52                  | 64,56 - 68,48                        |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>2.455.023.971,40</b> | <b>2.413.828.325,49 - 2.496.219.617,31</b> | <b>89,75</b>           | <b>88,24 - 91,26</b>                 |

### 7.1.2 Cenário 2

Este cenário considera a implantação de novos terminais de transbordo no Mato Grosso a partir da expansão do uso de rios navegáveis no estado. Nele, são detalhados os casos 2a, 2b e 2c, nos quais são exploradas rotas adicionais de exportação de soja de acordo com os possíveis portos exportadores do grão. Esta análise não considera um transbordo adicional na localidade de Miritituba (PA), uma vez que a carga segue diretamente para os portos de exportação. A simulação é construída com o resultado realizado de exportação de soja para o ano de 2021 e com a projeção de produção e exportação para o ano de 2025, segundo [IMEA \(2015, 2019\)](#).

Para este caso, o modelo de otimização estabelece a alocação dos terminais de transbordo nas mesmas localidades para os anos de 2021 e 2025, porém com capacidades de armazenamento modificadas em função da maior quantidade de soja direcionada à exportação. A orientação das rotas rodoviárias até os terminais de transbordo também sofre pequenas alterações, modificando a dinâmica do fluxo de soja na rede para os anos em questão.

#### 7.1.2.1 Cenário 2a

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 71, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 49. A modelagem em rede de Petri P-temporizada



estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 89 e Tabela 95. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 50), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 51) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 52), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

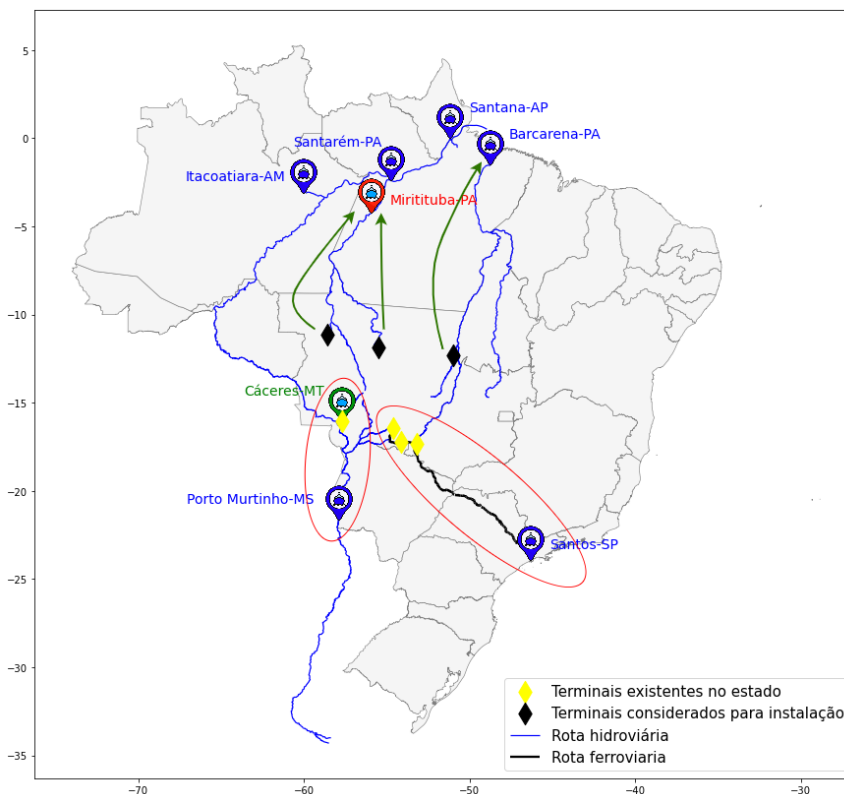


Figura 71 – Mapa de referência do cenário 2a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 49 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 2a - 100% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Castanheira             | Hidroviário     | Rios Juruena e Tapajós                | 1.530                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Novo Santo Antônio      | Hidroviário     | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.370                   | Barcarena - PA   |

Tabela 50 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 2a nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT          | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|                                       |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres                               | Porto Murtinho - MS | 734.000,00               | 32.000,00           | 721.456,23 - 746.543,77       | 0,26    | 746.741,00                  | 777.000,00               | 32.878,56           | 764.111,84 - 789.888,16       | 0,73    | 780.918,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia | Santos - SP         | 10.303.000,00            | 310.646,10          | 10.181.228,97 - 10.424.771,03 | 0,51    | 10.374.116,00               | 10.096.000,00            | 533.089,11          | 9.887.032,91 - 10.304.967,09  | 0,51    | 10.217.863,00               |
| Castanheira, Sinop                    | Santarém - PA       | 9.507.000,00             | 428.790,16          | 9.338.917,35 - 9.675.082,65   | 0,95    | 9.497.226,00                | 13.367.000,00            | 1.139.526,66        | 12.920.313,76 - 13.813.686,24 | 0,65    | 13.543.659,00               |
| Novo Santo Antônio                    | Barcarena - PA      | 2.325.000,00             | 62.169,12           | 2.300.630,15 - 2.349.369,85   | 0,26    | 2.349.704,00                | 3.149.000,00             | 103.677,38          | 3.108.359,21 - 3.189.640,79   | 0,43    | 3.177.558,00                |

Tabela 51 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 2a nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 51.506,98                              | 50.626,75 - 52.387,22              | 70,17                                  | 68,97 - 71,37                   | 54.330,17                              | 53.428,99 - 55.231,35              | 69,92                                  | 68,76 - 71,08                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 98.325,39                              | 97.279,86 - 99.370,91              | 63,56                                  | 62,88 - 64,23                   | 107.098,39                             | 106.182,57 - 108.014,22            | 68,13                                  | 67,55 - 68,71                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 214.744,25                             | 211.932,49 - 217.556,01            | 69,25                                  | 68,34 - 70,16                   | 182.833,20                             | 180.289,34 - 185.377,06            | 59,4                                   | 58,57 - 60,23                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 402.742,03                             | 396.755,43 - 408.728,64            | 71,22                                  | 70,16 - 72,28                   | 363.241,39                             | 351.561,55 - 374.921,23            | 66,7                                   | 64,55 - 68,84                   |
| Castanheira                  | Santarém - PA       | 51.233,48                              | 50.598,44 - 51.868,52              | 69,14                                  | 68,28 - 70,00                   | 51.724,32                              | 50.839,02 - 52.609,62              | 68,69                                  | 67,52 - 69,87                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 732.742,52                             | 719.787,72 - 745.697,32            | 77,07                                  | 75,71 - 78,44                   | 1.062.596,30                           | 1.027.087,42 - 1.098.105,17        | 79,49                                  | 76,84 - 82,15                   |
| Novo Santo Antônio           | Barcarena - PA      | 223.988,17                             | 221.640,41 - 226.335,94            | 96,34                                  | 95,33 - 97,35                   | 303.591,94                             | 299.673,80 - 307.510,08            | 96,41                                  | 95,16 - 97,65                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.775.282,82</b>                    | <b>1.748.621,10 - 1.801.944,55</b> | <b>75,19</b>                           | <b>74,06 - 76,32</b>            | <b>2.125.415,72</b>                    | <b>2.069.062,70 - 2.181.768,74</b> | <b>75,52</b>                           | <b>73,52 - 77,53</b>            |

Tabela 52 – Resultado do custo da rota para o cenário 2a nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 40.197.436,60           | 39.510.478,32 - 40.884.394,88              | 54,76                  | 53,83 - 55,70                        | 42.428.007,30           | 41.724.250,59 - 43.131.764,01              | 54,60                  | 53,70 - 55,51                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 108.978.260,30          | 107.819.463,41 - 110.137.057,19            | 70,44                  | 69,70 - 71,19                        | 115.093.822,80          | 114.109.627,65 - 116.078.017,95            | 73,21                  | 72,59 - 73,84                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 238.761.184,90          | 235.634.963,95 - 241.887.405,85            | 76,99                  | 75,99 - 78,00                        | 218.645.422,20          | 215.603.281,72 - 221.687.562,68            | 71,03                  | 70,05 - 72,02                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 402.946.459,50          | 396.956.816,79 - 408.936.102,21            | 71,25                  | 70,20 - 72,31                        | 373.186.605,40          | 361.186.982,52 - 385.186.228,28            | 68,52                  | 66,32 - 70,73                   |
| Castanheira                  | Santarém - PA       | 41.714.520,90           | 41.197.469,99 - 42.231.571,81              | 56,29                  | 55,60 - 56,99                        | 42.186.749,70           | 41.464.691,80 - 42.908.807,60              | 56,02                  | 55,07 - 56,98                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 597.276.324,30          | 586.716.548,40 - 607.836.100,20            | 62,82                  | 61,71 - 63,94                        | 859.296.258,30          | 830.581.077,96 - 888.011.438,64            | 64,28                  | 62,14 - 66,43                   |
| Novo Santo Antônio           | Barcarena - PA      | 186.801.892,50          | 184.843.899,43 - 188.759.885,57            | 80,34                  | 79,50 - 81,19                        | 253.132.050,10          | 249.865.144,44 - 256.398.955,76            | 80,38                  | 79,35 - 81,42                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.616.676.079,00</b> | <b>1.592.679.640,29 - 1.640.672.517,71</b> | <b>68,47</b>           | <b>67,46 - 69,49</b>                 | <b>1.903.968.915,80</b> | <b>1.854.535.056,68 - 1.953.402.774,92</b> | <b>67,66</b>           | <b>65,90 - 69,41</b>            |

### 7.1.2.2 Cenário 2b

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 72, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 53. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 90 e Tabela 96. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 54), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 55) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 56), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

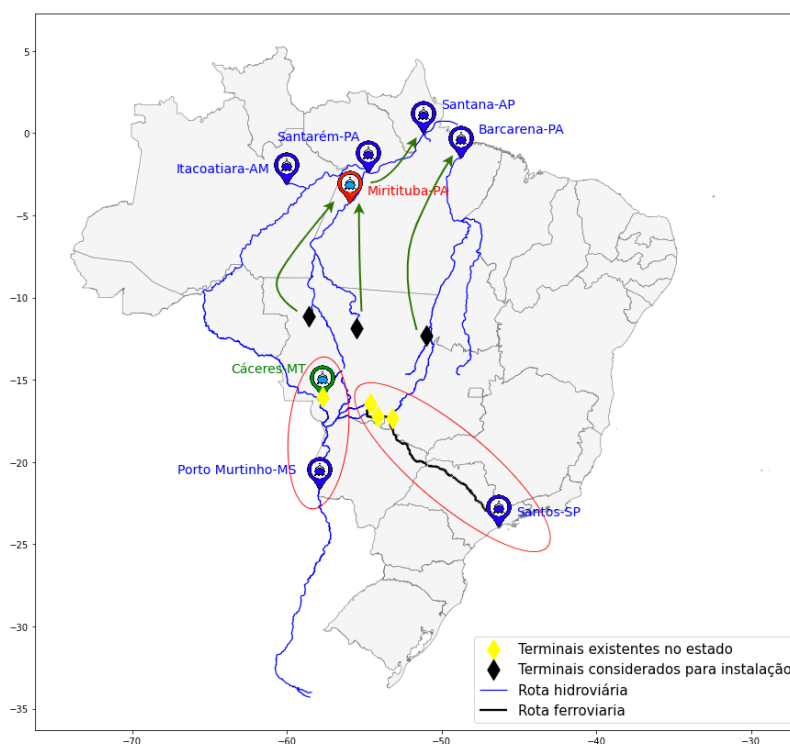


Figura 72 – Mapa de referência do cenário 2b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 53 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 2b - 100% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Castanheira             | Hidroviário     | Rios Juruena e Tapajós                | 1.530                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 2.260                   | Santana - AP     |
| Novo Santo Antônio      | Hidroviário     | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.370                   | Barcarena - PA   |

Tabela 54 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 2b nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT          | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                              |         |                             |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------------|---------|-----------------------------|
|                                       |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton) | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres                               | Porto Murtinho - MS | 747.000,00               | 34.942,81           | 733.302,67 - 760.697,33       | 0,98    | 746.741,00                  | 777.000,00               | 35.227,83           | 763.190,94 - 790.809,06      | 0,75    | 780.918,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia | Santos - SP         | 10.349.000,00            | 353.254,87          | 10.210.526,64 - 10.487.473,36 | 0,84    | 10.374.116,00               | 10.086.000,00            | 498.762,47          | 9.890.488,70 - 10.281.511,30 | 0,45    | 10.217.863,00               |
| Castanheira, Sinop                    | Santarém - PA       | 5.097.000,00             | 298.397,39          | 4.980.030,37 - 5.213.969,63   | 0,81    | 5.121.939,00                | 7.007.000,00             | 526.175,83          | 6.800.742,87 - 7.213.257,13  | 0,43    | 7.151.799,00                |
| Sinop                                 | Santana - AP        | 4.324.000,00             | 302.099,32          | 4.205.579,24 - 4.442.420,76   | 0,62    | 4.375.287,00                | 6.247.000,00             | 515.578,32          | 6.044.897,01 - 6.449.102,99  | 0,42    | 6.391.860,00                |
| Novo Santo Antônio                    | Barcarena - PA      | 2.318.000,00             | 74.404,30           | 2.288.834,05 - 2.347.165,95   | 0,23    | 2.349.704,00                | 3.169.000,00             | 101.631,69          | 3.129.161,11 - 3.208.838,89  | 0,81    | 3.177.558,00                |

Tabela 55 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 2b nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 52.419,23                              | 51.458,05 - 53.380,41              | 70,17                                  | 68,89 - 71,46                   | 54.330,17                              | 53.364,60 - 55.295,74              | 69,92                                  | 68,68 - 71,17                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 101.439,76                             | 100.254,29 - 102.625,24            | 63,56                                  | 62,82 - 64,30                   | 106.962,14                             | 105.948,72 - 107.975,56            | 68,13                                  | 67,48 - 68,77                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 215.506,00                             | 213.106,12 - 217.905,88            | 69,25                                  | 68,48 - 70,02                   | 182.952,00                             | 180.782,68 - 185.121,32            | 59,4                                   | 58,70 - 60,10                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 401.744,97                             | 392.368,39 - 411.121,55            | 71,22                                  | 69,56 - 72,88                   | 362.574,41                             | 352.432,00 - 372.716,81            | 66,7                                   | 64,83 - 68,56                   |
| Castanheira                  | Santarém - PA       | 53.445,99                              | 52.804,05 - 54.087,93              | 69,14                                  | 68,31 - 69,97                   | 52.273,85                              | 50.729,63 - 53.818,07              | 68,69                                  | 66,66 - 70,72                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 392.846,18                             | 383.830,86 - 401.861,49            | 77,07                                  | 75,31 - 78,84                   | 557.014,46                             | 540.618,25 - 573.410,66            | 79,49                                  | 77,15 - 81,83                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 402.616,29                             | 391.589,89 - 413.642,68            | 93,11                                  | 90,56 - 95,66                   | 596.788,40                             | 577.481,10 - 616.095,71            | 95,53                                  | 92,44 - 98,62                   |
| Novo Santo Antônio           | Barcarena - PA      | 223.313,80                             | 220.503,98 - 226.123,62            | 96,34                                  | 95,13 - 97,55                   | 305.520,12                             | 301.679,29 - 309.360,95            | 96,41                                  | 95,20 - 97,62                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.843.332,23</b>                    | <b>1.805.915,64 - 1.880.748,81</b> | <b>78,08</b>                           | <b>76,50 - 79,67</b>            | <b>2.218.415,55</b>                    | <b>2.163.036,27 - 2.273.794,82</b> | <b>79,1</b>                            | <b>77,12 - 81,07</b>            |

Tabela 56 – Resultado do custo da rota para o cenário 2b nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 40.909.380,30           | 40.159.247,39 - 41.659.513,21              | 54,76                  | 53,76 - 55,77                        | 42.428.007,30           | 41.673.965,20 - 43.182.049,40              | 54,6                   | 53,63 - 55,58                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 112.430.060,40          | 111.116.149,68 - 113.743.971,12            | 70,44                  | 69,62 - 71,27                        | 114.947.393,00          | 113.858.315,45 - 116.036.470,55            | 73,21                  | 72,52 - 73,91                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 239.608.128,80          | 236.939.843,15 - 242.276.414,45            | 76,99                  | 76,14 - 77,85                        | 218.787.492,00          | 216.193.254,56 - 221.381.729,44            | 71,03                  | 70,19 - 71,88                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 401.948.890,90          | 392.567.554,78 - 411.330.227,02            | 71,25                  | 69,59 - 72,92                        | 372.501.356,40          | 362.081.261,83 - 382.921.450,97            | 68,52                  | 66,61 - 70,44                   |
| Castanheira                  | Santarém - PA       | 43.515.957,70           | 42.993.286,50 - 44.038.628,90              | 56,29                  | 55,62 - 56,97                        | 42.634.948,90           | 41.375.469,37 - 43.894.428,43              | 56,02                  | 54,37 - 57,68                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 320.218.515,30          | 312.869.910,25 - 327.567.120,35            | 62,82                  | 61,38 - 64,27                        | 450.444.294,30          | 437.185.075,08 - 463.703.513,52            | 64,28                  | 62,39 - 66,18                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 334.698.787,60          | 325.532.440,67 - 343.865.134,53            | 77,40                  | 75,29 - 79,52                        | 492.669.030,30          | 476.730.198,51 - 508.607.862,09            | 78,86                  | 76,31 - 81,42                   |
| Novo Santo Antônio           | Barcarena - PA      | 186.239.478,20          | 183.896.142,86 - 188.582.813,54            | 80,34                  | 79,33 - 81,36                        | 254.739.748,10          | 251.537.302,94 - 257.942.193,26            | 80,38                  | 79,37 - 81,40                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.679.569.199,20</b> | <b>1.646.074.575,29 - 1.713.063.823,11</b> | <b>71,14</b>           | <b>69,73 - 72,56</b>                 | <b>1.989.152.270,30</b> | <b>1.940.634.842,94 - 2.037.669.697,66</b> | <b>70,92</b>           | <b>69,19 - 72,65</b>            |

Fonte: Elaborado pelo autor

### 7.1.2.3 Cenário 2c

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 73, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 57. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 91 e Tabela 97. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 58), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 59) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 60), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

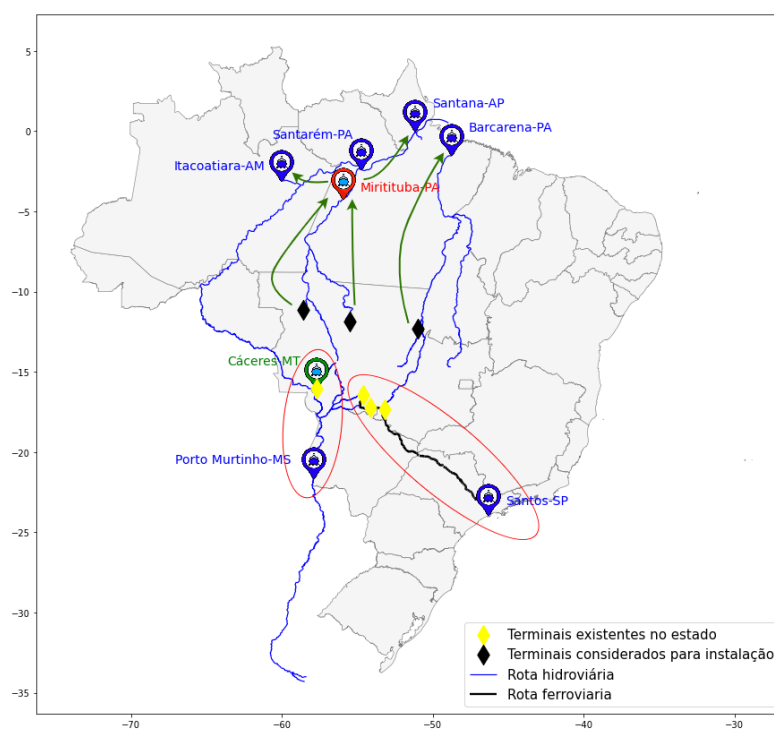


Figura 73 – Mapa de referência do cenário 2c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 100% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 57 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 2c - 100% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Castanheira             | Hidroviário     | Rios Juruena e Tapajós                | 1.530                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 2.260                   | Santana - AP     |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 2.280                   | Itacoatiara - AM |
| Novo Santo Antônio      | Hidroviário     | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.370                   | Barcarena - PA   |

Tabela 58 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 2c nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT          | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|                                       |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres                               | Porto Murtinho - MS | 753.000,00               | 22.825,42           | 744.052,60 - 761.947,40       | 0,43    | 746.741,00                  | 783.000,00               | 22.825,42           | 774.052,60 - 791.947,40       | 0,79    | 780.918,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia | Santos - SP         | 10.412.000,00            | 286.872,79          | 10.299.547,93 - 10.524.452,07 | 0,7     | 10.374.116,00               | 10.260.000,00            | 375.046,66          | 10.112.984,41 - 10.407.015,59 | 0,74    | 10.217.863,00               |
| Castanheira, Sinop                    | Santarém - PA       | 3.644.000,00             | 152.983,66          | 3.584.031,51 - 3.703.968,49   | 0,71    | 3.663.510,00                | 4.954.000,00             | 288.069,44          | 4.841.078,86 - 5.066.921,14   | 0,50    | 5.021.179,00                |
| Sinop                                 | Santana - AP        | 2.870.000,00             | 135.351,39          | 2.816.943,23 - 2.923.056,77   | 0,33    | 2.916.858,00                | 4.186.000,00             | 277.712,08          | 4.077.138,86 - 4.294.861,14   | 0,44    | 4.261.240,00                |
| Sinop                                 | Itacoatiara - AM    | 2.870.000,00             | 135.351,39          | 2.816.943,23 - 2.923.056,77   | 0,33    | 2.916.858,00                | 4.188.000,00             | 285.580,11          | 4.076.054,65 - 4.299.945,35   | 0,46    | 4.261.240,00                |
| Novo Santo Antônio                    | Barcarena - PA      | 2.354.000,00             | 60.530,98           | 2.330.272,29 - 2.377.727,71   | 0,84    | 2.349.704,00                | 3.163.000,00             | 75.769,39           | 3.133.298,95 - 3.192.701,05   | 0,58    | 3.177.558,00                |

Tabela 59 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 2c nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 52.840,27                              | 52.212,40 - 53.468,14              | 70,17                                  | 69,34 - 71,01                   | 54.749,71                              | 54.124,08 - 55.375,34              | 69,92                                  | 69,12 - 70,72                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 101.884,68                             | 101.006,99 - 102.762,36            | 63,56                                  | 63,01 - 64,11                   | 106.485,24                             | 105.107,61 - 107.862,86            | 68,13                                  | 67,25 - 69,01                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 218.414,50                             | 216.318,14 - 220.510,86            | 69,25                                  | 68,59 - 69,91                   | 188.179,20                             | 187.347,46 - 189.010,94            | 59,4                                   | 59,14 - 59,66                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 402.742,03                             | 396.763,24 - 408.720,82            | 71,22                                  | 70,16 - 72,28                   | 368.777,39                             | 360.151,42 - 377.403,36            | 66,7                                   | 65,14 - 68,26                   |
| Castanheira                  | Santarém - PA       | 53.445,99                              | 52.708,22 - 54.183,77              | 69,14                                  | 68,19 - 70,10                   | 52.754,69                              | 51.847,15 - 53.662,23              | 68,69                                  | 67,51 - 69,87                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 280.857,66                             | 276.235,64 - 285.479,67            | 77,07                                  | 75,81 - 78,34                   | 393.813,28                             | 384.836,72 - 402.789,83            | 79,49                                  | 77,68 - 81,31                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 267.231,44                             | 262.291,22 - 272.171,66            | 93,11                                  | 91,39 - 94,83                   | 399.896,95                             | 389.497,23 - 410.296,67            | 95,53                                  | 93,05 - 98,02                   |
| Sinop                        | Itacoatiara - AM    | 268.936,22                             | 263.964,48 - 273.907,96            | 93,71                                  | 91,97 - 95,44                   | 402.575,69                             | 391.814,83 - 413.336,55            | 96,13                                  | 93,56 - 98,70                   |
| Novo Santo Antônio           | Barcarena - PA      | 226.782,01                             | 224.496,10 - 229.067,91            | 96,34                                  | 95,37 - 97,31                   | 304.941,67                             | 302.078,22 - 307.805,12            | 96,41                                  | 95,50 - 97,31                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.873.134,79</b>                    | <b>1.845.996,44 - 1.900.273,14</b> | <b>79,12</b>                           | <b>77,97 - 80,26</b>            | <b>2.272.173,81</b>                    | <b>2.226.804,71 - 2.317.542,90</b> | <b>80,28</b>                           | <b>78,68 - 81,89</b>            |



Tabela 60 – Resultado do custo da rota para o cenário 2c nos anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 41.237.969,70           | 40.747.966,13 - 41.727.973,27              | 54,76                  | 54,11 - 55,42                        | 42.755.636,70           | 42.267.064,71 - 43.244.208,69              | 54,60                  | 53,98 - 55,23                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 112.923.174,70          | 111.950.397,16 - 113.895.952,24            | 70,44                  | 69,84 - 71,05                        | 114.434.888,70          | 112.954.417,38 - 115.915.360,02            | 73,21                  | 72,27 - 74,16                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 242.841.914,60          | 240.511.093,92 - 245.172.735,28            | 76,99                  | 76,26 - 77,73                        | 225.038.563,20          | 224.043.901,95 - 226.033.224,45            | 71,03                  | 70,72 - 71,35                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 402.946.459,50          | 396.964.637,02 - 408.928.281,98            | 71,25                  | 70,20 - 72,31                        | 378.874.172,10          | 370.012.029,81 - 387.736.314,39            | 68,52                  | 66,92 - 70,13                   |
| Castanheira                  | Santarém - PA       | 43.515.957,70           | 42.915.259,62 - 44.116.655,78              | 56,29                  | 55,52 - 57,07                        | 43.027.123,20           | 42.286.924,46 - 43.767.321,94              | 56,02                  | 55,06 - 56,99                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 228.933.935,60          | 225.166.421,06 - 232.701.450,14            | 62,82                  | 61,79 - 63,86                        | 318.467.394,60          | 311.208.270,15 - 325.726.519,05            | 64,28                  | 62,82 - 65,75                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 222.152.063,00          | 218.045.208,89 - 226.258.917,11            | 77,4                   | 75,97 - 78,84                        | 330.128.471,40          | 321.543.148,84 - 338.713.793,96            | 78,86                  | 76,81 - 80,92                   |
| Sinop                        | Itacoatiara - AM    | 223.701.863,00          | 219.566.358,24 - 227.837.367,76            | 77,94                  | 76,50 - 79,39                        | 332.547.721,20          | 323.658.712,15 - 341.436.730,25            | 79,4                   | 77,28 - 81,53                   |
| Novo Santo Antônio           | Barcarena - PA      | 189.131.894,60          | 187.225.494,14 - 191.038.295,06            | 80,34                  | 79,54 - 81,15                        | 254.257.438,70          | 251.869.922,45 - 256.644.954,95            | 80,38                  | 79,63 - 81,14                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.707.385.232,40</b> | <b>1.683.092.836,17 - 1.731.677.628,63</b> | <b>72,11</b>           | <b>71,09 - 73,14</b>                 | <b>2.039.531.409,80</b> | <b>1.999.844.391,91 - 2.079.218.427,69</b> | <b>72,06</b>           | <b>70,66 - 73,47</b>            |

### 7.1.3 Cenário 3

Este cenário considera a implantação de novos terminais de transbordo no Mato Grosso a partir dos projetos de expansão da malha ferroviário no estado e da expansão do uso de rios navegáveis no estado, numa relação de 50% para a distribuição do fluxo de soja nesses modais. Nele, são detalhados os casos 3a, 3b e 3c, nos quais são exploradas rotas adicionais de exportação de soja de acordo com os possíveis portos exportadores do grão. Esta análise não considera um transbordo adicional na localidade de Miritituba (PA), uma vez que a carga segue diretamente para os portos de exportação. A simulação é construída com o resultado realizado de exportação de soja para o ano de 2021 e com a projeção de produção e exportação para o ano de 2025, segundo [IMEA \(2015, 2019\)](#).

Para este caso, o modelo de otimização estabelece a alocação dos terminais de transbordo nas mesmas localidades para os anos de 2021 e 2025, porém com capacidades de armazenamento modificadas em função da maior quantidade de soja direcionada à exportação. A orientação das rotas rodoviárias até os terminais de transbordo também sofre pequenas alterações, modificando a dinâmica do fluxo de soja na rede para os anos em questão.

#### 7.1.3.1 Cenário 3a

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 74, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 61. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 92 e Tabela 98. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 62), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 63) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 64), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

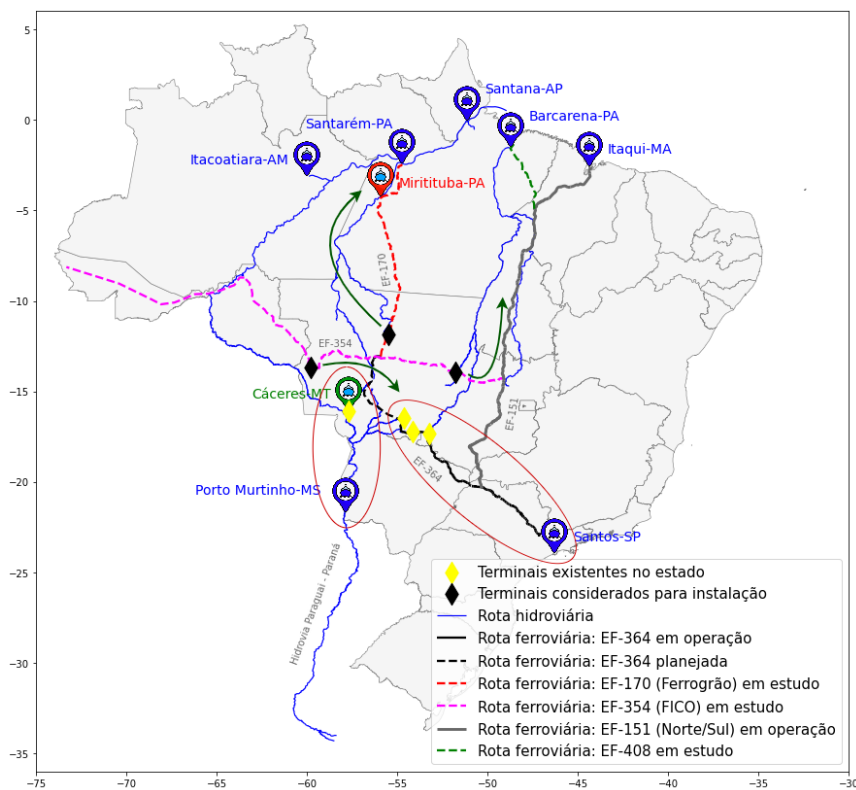


Figura 74 – Mapa de referência do cenário 3a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 50% ferroviário e 50% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 61 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 3a - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                       | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| Comodoro                | Ferrovário      | EF-354, EF-364             | 2.520                   | Santos - SP      |
| Nova Nazaré             | Ferrovário      | EF-354, EF-170, EF-408     | 1.980                   | Barcarena - PA   |
| Nova Nazaré             | Ferrovário      | EF-354, EF-170, EF-315     | 2.190                   | Itaqui - MA      |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós | 1.720                   | Santarém - PA    |

Tabela 62 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 3a nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|   |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 635.000,00               | 40.558,60           | 619.101,32 - 650.898,68       | 0,71    | 640.113,00                  | 798.000,00               | 32.186,95           | 785.382,95 - 810.617,05       | 0,61    | 792.393,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 11.094.000,00            | 294.047,62          | 10.978.735,45 - 11.209.264,55 | 0,7     | 11.132.505,00               | 11.012.000,00            | 335.612,87          | 10.880.442,17 - 11.143.557,83 | 0,95    | 11.004.506,00               |
| Nova Nazaré                                     | Barcarena - PA      | 1.200.000,00             | 32.557,64           | 1.187.237,64 - 1.212.762,36   | 0,99    | 1.199.860,00                | 1.572.000,00             | 34.292,86           | 1.558.557,45 - 1.585.442,55   | 0,68    | 1.576.843,00                |
| Nova Nazaré                                     | Itaqui - MA         | 1.199.000,00             | 28.442,93           | 1.187.850,58 - 1.210.149,42   | 0,93    | 1.199.860,00                | 1.565.000,00             | 43.416,59           | 1.547.981,01 - 1.582.018,99   | 0,43    | 1.576.843,00                |
| Sinop   | Santarém - PA       | 8.658.000,00             | 325.969,32          | 8.530.222,37 - 8.785.777,63   | 0,24    | 8.795.449,00                | 12.616.000,00            | 738.609,50          | 12.326.470,39 - 12.905.529,61 | 0,55    | 12.769.416,00               |

Tabela 63 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 3a nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 42.458,01                              | 41.394,97 - 43.521,04              | 66,86                                  | 65,19 - 68,54                   | 52.047,95                              | 51.225,03 - 52.870,88              | 65,22                                  | 64,19 - 66,25                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 100.518,15                             | 99.401,19 - 101.635,12             | 63,26                                  | 62,56 - 63,96                   | 100.355,41                             | 99.130,88 - 101.579,93             | 62,92                                  | 62,15 - 63,69                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 234.915,40                             | 232.291,86 - 237.538,94            | 74,6                                   | 73,77 - 75,43                   | 198.688,56                             | 196.870,61 - 200.506,51            | 63,56                                  | 62,98 - 64,14                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 394.510,95                             | 388.535,03 - 400.486,87            | 69,95                                  | 68,89 - 71,01                   | 385.459,42                             | 376.865,72 - 394.053,13            | 69,08                                  | 67,54 - 70,62                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 49.106,86                              | 48.457,16 - 49.756,56              | 68,59                                  | 67,68 - 69,49                   | 55.461,56                              | 54.289,60 - 56.633,51              | 78,01                                  | 76,36 - 79,65                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 89.757,00                              | 88.802,41 - 90.711,59              | 74,8                                   | 74,00 - 75,59                   | 116.088,27                             | 115.095,57 - 117.080,97            | 73,85                                  | 73,22 - 74,48                   |
| Nova Nazaré                  | Itaqui - MA         | 95.127,16                              | 94.242,58 - 96.011,74              | 79,34                                  | 78,60 - 80,08                   | 122.678,39                             | 121.344,30 - 124.012,49            | 78,39                                  | 77,54 - 79,24                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 693.107,53                             | 682.878,42 - 703.336,64            | 80,05                                  | 78,87 - 81,24                   | 1.002.643,98                           | 979.633,91 - 1.025.654,06          | 79,47                                  | 77,65 - 81,30                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.699.501,06</b>                    | <b>1.676.003,62 - 1.722.998,51</b> | <b>74,59</b>                           | <b>73,55 - 75,62</b>            | <b>2.033.423,55</b>                    | <b>1.994.455,62 - 2.072.391,47</b> | <b>73,77</b>                           | <b>72,36 - 75,19</b>            |

Tabela 64 – Resultado do custo da rota para o cenário 3a nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 33.499.361,50           | 32.660.628,29 - 34.338.094,71              | 52,75                  | 51,43 - 54,08                        | 41.308.390,20           | 40.655.269,66 - 41.961.510,74              | 51,76                  | 50,95 - 52,58                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 111.650.926,10          | 110.410.252,50 - 112.891.599,70            | 70,26                  | 69,48 - 71,05                        | 111.737.565,50          | 110.374.159,92 - 113.100.971,08            | 70,05                  | 69,20 - 70,91                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 252.659.700,10          | 249.837.990,17 - 255.481.410,03            | 80,23                  | 79,34 - 81,13                        | 229.901.357,40          | 227.797.822,74 - 232.004.892,06            | 73,54                  | 72,87 - 74,22                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 397.534.836,00          | 391.513.110,15 - 403.556.561,85            | 70,48                  | 69,42 - 71,55                        | 390.404.142,00          | 381.700.196,50 - 399.108.087,50            | 69,96                  | 68,41 - 71,52                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 73.321.908,40           | 72.351.833,54 - 74.291.983,26              | 102,4                  | 101,05 - 103,76                      | 76.869.693,90           | 75.245.362,89 - 78.494.024,91              | 108,11                 | 105,83 - 110,40                 |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 111.917.880,00          | 110.727.599,69 - 113.108.160,31            | 93,26                  | 92,27 - 94,26                        | 145.700.662,80          | 144.454.741,15 - 146.946.584,45            | 92,68                  | 91,89 - 93,48                   |
| Nova Nazaré                  | Itaqui - MA         | 121.140.845,10          | 120.014.364,38 - 122.267.325,82            | 101,03                 | 100,10 - 101,97                      | 157.211.918,50          | 155.502.277,64 - 158.921.559,36            | 100,45                 | 99,36 - 101,55                  |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 559.522.384,20          | 551.264.767,84 - 567.780.000,56            | 64,62                  | 63,67 - 65,58                        | 810.892.138,40          | 792.282.651,96 - 829.501.624,84            | 64,27                  | 62,80 - 65,75                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.661.247.841,40</b> | <b>1.638.780.546,56 - 1.683.715.136,24</b> | <b>72,91</b>           | <b>71,92 - 73,89</b>                 | <b>1.964.025.868,70</b> | <b>1.928.012.482,46 - 2.000.039.254,94</b> | <b>71,26</b>           | <b>69,95 - 72,56</b>            |

### 7.1.3.2 Cenário 3b

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 75, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 65. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 93 e Tabela 99. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 66), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 67) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 68), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

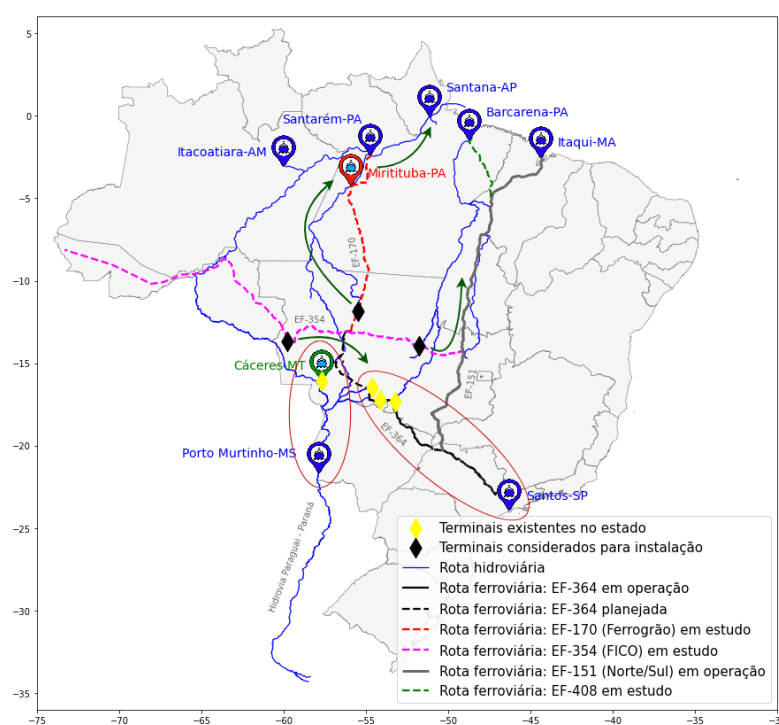


Figura 75 – Mapa de referência do cenário 3b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 50% ferroviário e 50% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 65 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 3b - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                       | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| Comodoro                | Ferrovário      | EF-354, EF-364             | 2.520                   | Santos - SP      |
| Nova Nazaré             | Ferrovário      | EF-354, EF-170, EF-408     | 1.980                   | Barcarena - PA   |
| Nova Nazaré             | Ferrovário      | EF-354, EF-170, EF-315     | 2.190                   | Itaquí - MA      |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós | 2.260                   | Santana - AP     |

Tabela 66 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 3b nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|   |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 631.000,00               | 34.190,64           | 617.597,51 - 644.402,49       | 0,44    | 640.113,00                  | 783.000,00               | 21.000,00           | 774.768,15 - 791.231,85       | 0,21    | 792.393,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 11.191.000,00            | 355.399,77          | 11.051.685,85 - 11.330.314,15 | 0,63    | 11.132.505,00               | 11.044.000,00            | 318.377,13          | 10.919.198,46 - 11.168.801,54 | 0,72    | 11.004.506,00               |
| Nova Nazaré                                     | Barcarena - PA      | 1.205.000,00             | 45.661,80           | 1.187.100,90 - 1.222.899,10   | 0,74    | 1.199.860,00                | 1.594.000,00             | 45.650,85           | 1.576.105,20 - 1.611.894,80   | 0,29    | 1.576.843,00                |
| Nova Nazaré                                     | Itaqui - MA         | 1.209.000,00             | 29.816,10           | 1.197.312,30 - 1.220.687,70   | 0,38    | 1.199.860,00                | 1.582.000,00             | 42.614,55           | 1.565.295,40 - 1.598.704,60   | 0,72    | 1.576.843,00                |
| Sinop   | Santarém - PA       | 4.381.000,00             | 236.746,70          | 4.288.197,00 - 4.473.803,00   | 0,84    | 4.397.724,00                | 6.341.000,00             | 279.658,72          | 6.231.375,80 - 6.450.624,20   | 0,65    | 6.384.708,00                |
| Sinop   | Santana - AP        | 4.381.000,00             | 236.746,70          | 4.288.197,00 - 4.473.803,00   | 0,84    | 4.397.724,00                | 6.340.000,00             | 275.644,70          | 6.231.949,26 - 6.448.050,74   | 0,64    | 6.384.708,00                |

Tabela 67 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 3b nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 42.190,55                              | 41.294,42 - 43.086,68              | 66,86                                  | 65,44 - 68,28                   | 51.069,61                              | 50.532,70 - 51.606,51              | 65,22                                  | 64,54 - 65,91                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 100.075,34                             | 98.500,00 - 101.650,68             | 63,26                                  | 62,26 - 64,25                   | 100.355,41                             | 99.682,22 - 101.028,59             | 62,92                                  | 62,50 - 63,34                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 235.810,60                             | 233.113,13 - 238.508,07            | 74,6                                   | 73,75 - 75,45                   | 200.150,44                             | 197.601,18 - 202.699,70            | 63,56                                  | 62,75 - 64,37                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 401.855,57                             | 395.381,74 - 408.329,39            | 69,95                                  | 68,82 - 71,08                   | 385.459,42                             | 378.668,20 - 392.250,65            | 69,08                                  | 67,86 - 70,30                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 48.215,26                              | 47.331,32 - 49.099,19              | 68,59                                  | 67,33 - 69,84                   | 56.163,60                              | 55.493,68 - 56.833,52              | 78,01                                  | 77,07 - 78,94                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 90.130,99                              | 88.792,18 - 91.469,80              | 74,8                                   | 73,69 - 75,91                   | 117.712,92                             | 116.391,43 - 119.034,40            | 73,85                                  | 73,02 - 74,68                   |
| Nova Nazaré                  | Itaqui - MA         | 95.920,55                              | 94.993,26 - 96.847,84              | 79,34                                  | 78,57 - 80,11                   | 124.011,00                             | 122.701,55 - 125.320,45            | 78,39                                  | 77,56 - 79,22                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 350.716,57                             | 343.287,32 - 358.145,83            | 80,05                                  | 78,36 - 81,75                   | 503.944,63                             | 495.232,36 - 512.656,91            | 79,47                                  | 78,10 - 80,85                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 420.979,05                             | 412.061,43 - 429.896,68            | 96,09                                  | 94,06 - 98,13                   | 605.546,08                             | 595.225,94 - 615.866,22            | 95,51                                  | 93,88 - 97,14                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.785.894,48</b>                    | <b>1.754.754,81 - 1.817.034,15</b> | <b>77,65</b>                           | <b>76,30 - 79,01</b>            | <b>2.144.413,11</b>                    | <b>2.111.529,26 - 2.177.296,96</b> | <b>77,46</b>                           | <b>76,27 - 78,65</b>            |

Tabela 68 – Resultado do custo da rota para o cenário 3b nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 33.288.341,90           | 32.581.295,12 - 33.995.388,68              | 52,75                  | 51,63 - 53,88                        | 40.531.916,70           | 40.105.795,87 - 40.958.037,53              | 51,76                  | 51,22 - 52,31                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 111.159.071,80          | 109.409.256,95 - 112.908.886,65            | 70,26                  | 69,16 - 71,37                        | 111.737.565,50          | 110.988.025,63 - 112.487.105,37            | 70,05                  | 69,58 - 70,52                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 253.622.518,90          | 250.721.298,89 - 256.523.738,91            | 80,23                  | 79,32 - 81,15                        | 231.592.890,10          | 228.643.153,42 - 234.542.626,78            | 73,54                  | 72,61 - 74,48                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 404.935.750,50          | 398.412.303,56 - 411.459.197,44            | 70,48                  | 69,35 - 71,62                        | 390.404.142,00          | 383.525.802,19 - 397.282.481,81            | 69,96                  | 68,73 - 71,20                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 71.990.644,70           | 70.670.833,92 - 73.310.455,48              | 102,4                  | 100,53 - 104,28                      | 77.842.728,00           | 76.914.222,98 - 78.771.233,02              | 108,11                 | 106,83 - 109,40                 |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 112.384.204,50          | 110.714.847,03 - 114.053.561,97            | 93,26                  | 91,88 - 94,65                        | 147.739.730,60          | 146.081.152,49 - 149.398.308,71            | 92,68                  | 91,64 - 93,73                   |
| Nova Nazaré                  | Itaqui - MA         | 122.151.194,10          | 120.970.328,74 - 123.332.059,46            | 101,03                 | 100,06 - 102,01                      | 158.919.651,80          | 157.241.593,16 - 160.597.710,44            | 100,45                 | 99,39 - 101,52                  |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 283.121.686,90          | 277.124.302,23 - 289.119.071,57            | 64,62                  | 63,26 - 65,99                        | 407.567.140,90          | 400.521.056,15 - 414.613.225,65            | 64,27                  | 63,16 - 65,39                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 346.996.666,90          | 339.646.214,48 - 354.347.119,32            | 79,2                   | 77,53 - 80,88                        | 499.940.066,00          | 491.419.735,98 - 508.460.396,02            | 78,85                  | 77,51 - 80,20                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.739.650.080,20</b> | <b>1.710.250.680,92 - 1.769.049.479,48</b> | <b>75,64</b>           | <b>74,37 - 76,92</b>                 | <b>2.066.275.831,60</b> | <b>2.035.440.537,87 - 2.097.111.125,33</b> | <b>74,64</b>           | <b>73,52 - 75,75</b>            |



### 7.1.3.3 Cenário 3c

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 76, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 69. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 94 e Tabela 100. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 70), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 71) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 72), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

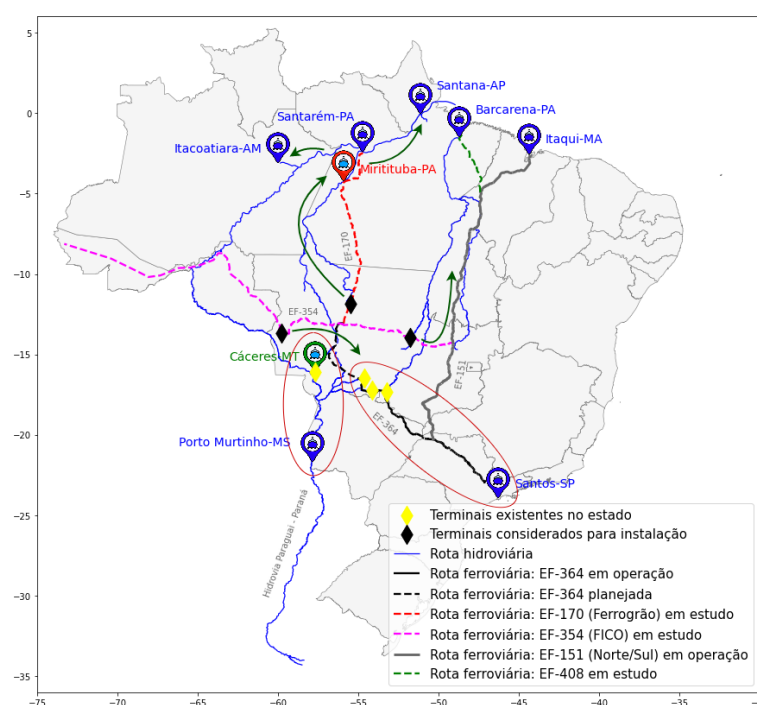


Figura 76 – Mapa de referência do cenário 3c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 50% ferroviário e 50% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 69 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 3c - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                       | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|------------------|
| Comodoro                | Ferrovário      | EF-354, EF-364             | 2.520                   | Santos - SP      |
| Nova Nazaré             | Ferrovário      | EF-354, EF-170, EF-408     | 1.980                   | Barcarena - PA   |
| Nova Nazaré             | Ferrovário      | EF-354, EF-170, EF-315     | 2.190                   | Itaquí - MA      |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós | 2.260                   | Santana - AP     |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós | 2.280                   | Itacoatiara - AM |

Tabela 70 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 3c nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|   |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 630.000,00               | 34.641,02           | 616.420,97 - 643.579,03       | 0,4     | 640.113,00                  | 780.000,00               | 28.982,75           | 768.638,97 - 791.361,03       | 0,23    | 792.393,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 11.083.000,00            | 253.615,85          | 10.983.584,41 - 11.182.415,59 | 0,57    | 11.132.505,00               | 11.029.000,00            | 415.221,63          | 10.866.236,11 - 11.191.763,89 | 0,86    | 11.004.506,00               |
| Nova Nazaré                                     | Barcarena - PA      | 1.204.000,00             | 38.522,72           | 1.188.899,37 - 1.219.100,63   | 0,75    | 1.199.860,00                | 1.562.000,00             | 67.349,83           | 1.535.599,35 - 1.588.400,65   | 0,53    | 1.576.843,00                |
| Nova Nazaré                                     | Itaqui - MA         | 1.212.000,00             | 34.583,23           | 1.198.443,62 - 1.225.556,38   | 0,32    | 1.199.860,00                | 1.576.000,00             | 60.695,96           | 1.552.207,62 - 1.599.792,38   | 0,97    | 1.576.843,00                |
| Sinop   | Santarém - PA       | 2.895.000,00             | 138.654,25          | 2.840.648,53 - 2.949.351,47   | 0,45    | 2.931.816,00                | 4.229.000,00             | 217.506,32          | 4.143.739,09 - 4.314.260,91   | 0,71    | 4.256.472,00                |
| Sinop   | Santana - AP        | 2.893.000,00             | 140.716,03          | 2.837.840,33 - 2.948.159,67   | 0,43    | 2.931.816,00                | 4.223.000,00             | 219.228,19          | 4.137.064,13 - 4.308.935,87   | 0,66    | 4.256.472,00                |
| Sinop   | Itacoatiara - AM    | 2.895.000,00             | 138.654,25          | 2.840.648,53 - 2.949.351,47   | 0,45    | 2.931.816,00                | 4.229.000,00             | 219.793,08          | 4.142.842,69 - 4.315.157,31   | 0,72    | 4.256.472,00                |

Tabela 71 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 3c nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 42.123,69                              | 41.215,76 - 43.031,62              | 66,86                                  | 65,42 - 68,30                   | 50.873,94                              | 50.132,94 - 51.614,94              | 65,22                                  | 64,27 - 66,17                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 100.897,71                             | 99.493,88 - 102.301,53             | 63,26                                  | 62,38 - 64,14                   | 100.166,65                             | 99.064,76 - 101.268,54             | 62,92                                  | 62,23 - 63,61                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 234.094,80                             | 231.631,46 - 236.558,14            | 74,6                                   | 73,81 - 75,39                   | 199.769,08                             | 196.430,00 - 203.108,16            | 63,56                                  | 62,50 - 64,62                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 394.720,80                             | 389.820,39 - 399.621,20            | 69,95                                  | 69,08 - 70,82                   | 385.873,90                             | 378.111,14 - 393.636,66            | 69,08                                  | 67,69 - 70,47                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 48.489,60                              | 47.700,72 - 49.278,47              | 68,59                                  | 67,47 - 69,70                   | 55.227,54                              | 54.109,90 - 56.345,18              | 78,01                                  | 76,43 - 79,58                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 90.056,19                              | 88.926,70 - 91.185,68              | 74,8                                   | 73,86 - 75,74                   | 115.349,79                             | 113.400,17 - 117.299,42            | 73,85                                  | 72,60 - 75,10                   |
| Nova Nazaré                  | Itaqui - MA         | 96.158,57                              | 95.083,02 - 97.234,11              | 79,34                                  | 78,45 - 80,23                   | 123.540,67                             | 121.675,62 - 125.405,72            | 78,39                                  | 77,21 - 79,57                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 231.756,33                             | 227.405,28 - 236.107,38            | 80,05                                  | 78,55 - 81,56                   | 336.095,55                             | 329.319,52 - 342.871,57            | 79,47                                  | 77,87 - 81,08                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 277.994,16                             | 272.693,75 - 283.294,56            | 96,09                                  | 94,26 - 97,92                   | 403.347,18                             | 395.139,27 - 411.555,08            | 95,51                                  | 93,57 - 97,46                   |
| Sinop                        | Itacoatiara - AM    | 279.905,97                             | 274.650,94 - 285.161,00            | 96,69                                  | 94,87 - 98,50                   | 406.432,27                             | 398.152,04 - 414.712,51            | 96,11                                  | 94,15 - 98,06                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.796.197,80</b>                    | <b>1.768.621,90 - 1.823.773,69</b> | <b>78,74</b>                           | <b>77,53 - 79,95</b>            | <b>2.176.676,57</b>                    | <b>2.135.535,35 - 2.217.817,79</b> | <b>78,79</b>                           | <b>77,30 - 80,27</b>            |

Tabela 72 – Resultado do custo da rota para o cenário 3c nos anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 33.235.587,00           | 32.519.226,69 - 33.951.947,31              | 52,75                  | 51,62 - 53,89                        | 40.376.622,00           | 39.788.519,39 - 40.964.724,61              | 51,76                  | 51,01 - 52,52                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 112.072.515,50          | 110.513.212,42 - 113.631.818,58            | 70,26                  | 69,29 - 71,24                        | 111.527.400,80          | 110.300.535,53 - 112.754.266,07            | 70,05                  | 69,28 - 70,83                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 251.777.116,20          | 249.127.712,09 - 254.426.520,31            | 80,23                  | 79,39 - 81,08                        | 231.151.620,70          | 227.287.987,36 - 235.015.254,04            | 73,54                  | 72,32 - 74,77                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 397.746.290,70          | 392.808.320,91 - 402.684.260,49            | 70,48                  | 69,61 - 71,36                        | 390.823.931,40          | 382.961.589,20 - 398.686.273,60            | 69,96                  | 68,56 - 71,37                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 72.400.264,30           | 71.222.386,06 - 73.578.142,54              | 102,4                  | 100,74 - 104,07                      | 76.545.349,20           | 74.996.294,10 - 78.094.404,30              | 108,11                 | 105,93 - 110,30                 |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 112.290.939,60          | 110.882.580,95 - 113.699.298,25            | 93,26                  | 92,10 - 94,43                        | 144.773.813,80          | 142.326.872,25 - 147.220.755,35            | 92,68                  | 91,12 - 94,25                   |
| Nova Nazaré                  | Itaqui - MA         | 122.454.298,80          | 121.084.631,48 - 123.823.966,12            | 101,03                 | 99,90 - 102,16                       | 158.316.922,40          | 155.926.861,19 - 160.706.983,61            | 100,45                 | 98,94 - 101,97                  |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 187.089.085,50          | 183.576.627,46 - 190.601.543,54            | 64,62                  | 63,41 - 65,84                        | 271.818.552,10          | 266.338.415,55 - 277.298.688,65            | 64,27                  | 62,98 - 65,57                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 229.139.775,70          | 224.770.859,66 - 233.508.691,74            | 79,2                   | 77,69 - 80,72                        | 333.004.242,70          | 326.227.778,11 - 339.780.707,29            | 78,85                  | 77,25 - 80,46                   |
| Sinop                        | Itacoatiara - AM    | 230.861.485,50          | 226.527.233,30 - 235.195.737,70            | 79,74                  | 78,25 - 81,24                        | 335.761.032,10          | 328.920.581,41 - 342.601.482,79            | 79,39                  | 77,78 - 81,01                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.749.067.358,80</b> | <b>1.723.032.791,01 - 1.775.101.926,59</b> | <b>76,67</b>           | <b>75,53 - 77,81</b>                 | <b>2.094.099.487,20</b> | <b>2.055.075.434,08 - 2.133.123.540,32</b> | <b>75,8</b>            | <b>74,38 - 77,21</b>            |

#### 7.1.4 Cenário 4

Este cenário considera a implantação de novos terminais de transbordo no Mato Grosso a partir dos projetos de expansão da malha ferroviária e da expansão do uso de rios navegáveis no estado, numa relação de 75% para a distribuição do fluxo de soja no modo ferroviário e 25% no modo hidroviário. Como o projeto ferroviário da EF-170 (Ferrogrão) prevê a cidade de Miritituba (PA) como ponto de término, este cenário considera um transbordo adicional de carga nesta localidade, bem como a mudança para o modo hidroviário para se alcançar o porto de exportação de Santarém (PA). A simulação é construída com o resultado realizado de exportação de soja para o ano de 2021 e com a projeção de produção e exportação para o ano de 2025, segundo [IMEA \(2015, 2019\)](#).

Para este caso, o modelo de otimização estabelece a alocação dos terminais de transbordo nas mesmas localidades para os anos de 2021 e 2025, porém com capacidades de armazenamento modificadas em função da maior quantidade de soja direcionada à exportação. A orientação das rotas rodoviárias até os terminais de transbordo também sofre pequenas alterações, modificando a dinâmica do fluxo de soja na rede para os anos em questão.

Nesta análise, são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 77, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 73. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 95 e Tabela 101. Os resultados quantitativos de soja destinada para cada porto (Tabela 74), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 75) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 76), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

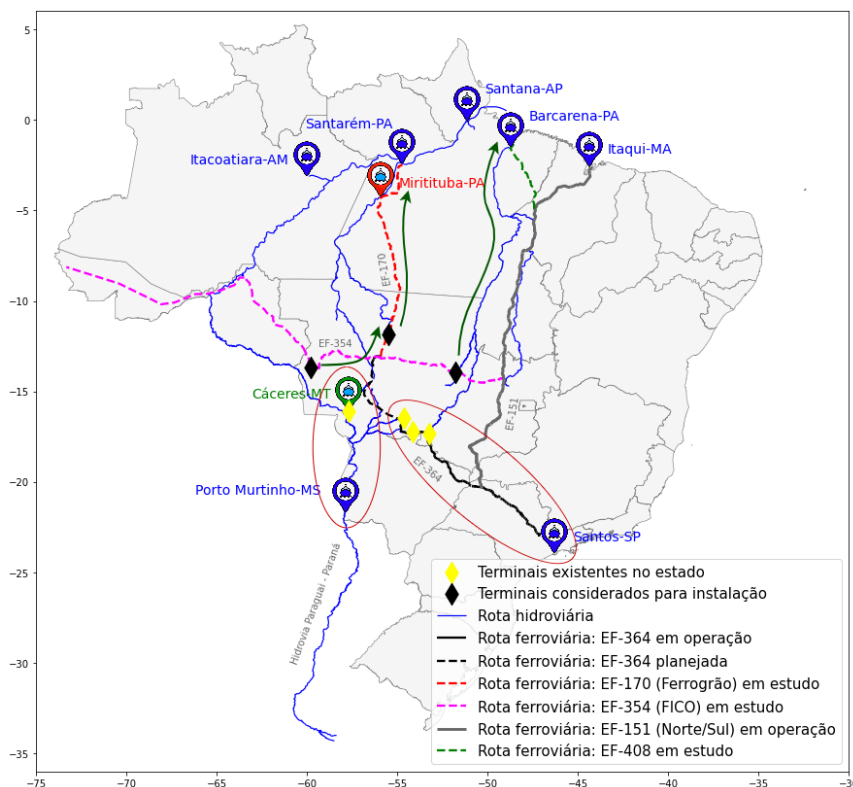


Figura 77 – Mapa de referência do cenário 4 utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 75% ferroviário e 25% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 73 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 4 - 75% ferroviário e 25% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado          | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Nova Nazaré             | Hidroviário              | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.760                   | Barcarena - PA   |
| Comodoro                | Ferrovário / Hidroviário | EF-354, EF-170, Rio Tapajós           | 1.910                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Ferrovário / Hidroviário | EF-170, Rio Tapajós                   | 1.195                   | Santarém - PA    |

Tabela 74 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 4 nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT          | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|                                       |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres                               | Porto Murtinho - MS | 716.000,00               | 32.310,99           | 703.334,33 - 728.665,67       | 0,96    | 715.377,00                  | 797.000,00               | 27.221,32           | 786.329,44 - 807.670,56       | 0,62    | 792.393,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia | Santos - SP         | 10.290.000,00            | 212.508,82          | 10.206.698,07 - 10.373.301,93 | 0,68    | 10.260.075,00               | 10.314.000,00            | 508.806,45          | 10.114.551,54 - 10.513.448,46 | 0,96    | 10.305.532,00               |
| Comodoro, Sinop                       | Santarém - PA       | 9.394.000,00             | 562.764,60          | 9.173.400,33 - 9.614.599,67   | 0,32    | 9.592.616,00                | 13.258.000,00            | 1.002.574,69        | 12.864.997,94 - 13.651.002,06 | 0,54    | 13.468.389,00               |
| Nova Nazaré                           | Barcarena - PA      | 2.390.000,00             | 62.928,53           | 2.365.332,47 - 2.414.667,53   | 0,65    | 2.399.719,00                | 3.168.000,00             | 94.741,75           | 3.130.861,91 - 3.205.138,09   | 0,66    | 3.153.686,00                |

Tabela 75 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 4 nos anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 47.966,99                              | 47.118,48 - 48.815,50              | 66,99                                  | 65,81 - 68,18                   | 51.982,73                              | 51.286,77 - 52.678,70              | 65,22                                  | 64,35 - 66,10                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 100.802,58                             | 99.501,75 - 102.103,42             | 63,76                                  | 62,94 - 64,58                   | 100.795,84                             | 100.065,86 - 101.525,82            | 62,92                                  | 62,46 - 63,37                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 236.263,28                             | 234.542,46 - 237.984,10            | 74,32                                  | 73,78 - 74,86                   | 202.184,36                             | 199.572,55 - 204.796,17            | 63,56                                  | 62,74 - 64,38                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 386.816,59                             | 381.230,83 - 392.402,35            | 69,95                                  | 68,94 - 70,96                   | 382.074,57                             | 370.414,22 - 393.734,91            | 69,08                                  | 66,97 - 71,19                   |
| Comodoro                     | Santarém - PA       | 45.994,60                              | 45.480,68 - 46.508,52              | 57,49                                  | 56,85 - 58,14                   | 45.367,18                              | 44.695,38 - 46.038,99              | 66,91                                  | 65,92 - 67,90                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 489.096,36                             | 476.611,29 - 501.581,42            | 56,91                                  | 55,46 - 58,36                   | 708.648,70                             | 686.581,12 - 730.716,28            | 56,33                                  | 54,58 - 58,09                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 272.345,28                             | 269.534,37 - 275.156,19            | 113,95                                 | 112,78 - 115,13                 | 357.990,34                             | 353.793,66 - 362.187,01            | 113,00                                 | 111,68 - 114,33                 |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.579.285,68</b>                    | <b>1.554.019,85 - 1.604.551,50</b> | <b>69,30</b>                           | <b>68,19 - 70,41</b>            | <b>1.849.043,71</b>                    | <b>1.806.409,56 - 1.891.677,87</b> | <b>67,15</b>                           | <b>65,60 - 68,70</b>            |

Tabela 76 – Resultado do custo da rota para o cenário 4 nos anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 37.836.948,40           | 37.167.632,08 - 38.506.264,72              | 52,84                  | 51,91 - 53,78                        | 41.256.625,30           | 40.704.264,86 - 41.808.985,74              | 51,76                  | 51,07 - 52,46                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 111.563.106,90          | 110.123.409,17 - 113.002.804,63            | 70,56                  | 69,65 - 71,48                        | 112.227.949,80          | 111.415.177,94 - 113.040.721,66            | 70,05                  | 69,55 - 70,56                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 254.558.107,10          | 252.704.042,01 - 256.412.172,19            | 80,07                  | 79,49 - 80,66                        | 233.946.326,90          | 230.924.220,61 - 236.968.433,19            | 73,54                  | 72,59 - 74,49                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 389.836.797,00          | 384.207.426,49 - 395.466.167,51            | 70,49                  | 69,48 - 71,51                        | 386.975.861,90          | 375.165.937,09 - 398.785.786,71            | 69,96                  | 67,83 - 72,10                   |
| Comodoro                     | Santarém - PA       | 62.295.840,00           | 61.599.776,57 - 62.991.903,43              | 77,87                  | 77,00 - 78,74                        | 56.667.104,40           | 55.827.970,37 - 57.506.238,43              | 83,58                  | 82,34 - 84,82                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 519.376.671,20          | 506.118.646,44 - 532.634.695,96            | 60,43                  | 58,89 - 61,98                        | 755.866.784,00          | 732.328.818,14 - 779.404.749,86            | 60,08                  | 58,21 - 61,96                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 225.914.511,00          | 223.582.815,12 - 228.246.206,88            | 94,52                  | 93,55 - 95,50                        | 297.617.443,20          | 294.128.509,50 - 301.106.376,90            | 93,94                  | 92,84 - 95,05                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.601.381.981,60</b> | <b>1.575.503.747,87 - 1.627.260.215,33</b> | <b>70,27</b>           | <b>69,13 - 71,40</b>                 | <b>1.884.558.095,50</b> | <b>1.840.494.898,51 - 1.928.621.292,49</b> | <b>68,44</b>           | <b>66,84 - 70,04</b>            |

### 7.1.5 Cenário 5

Este cenário considera a implantação de novos terminais de transbordo no Mato Grosso a partir dos projetos de expansão da malha ferroviária e da expansão do uso de rios navegáveis no estado, numa relação de 25% para a distribuição do fluxo de soja no modo ferroviário e 75% no modo hidroviário. Nele, são detalhados os casos 5a, 5b e 5c, nos quais são exploradas rotas adicionais de exportação de soja de acordo com os possíveis portos exportadores do grão. Esta análise não considera um transbordo adicional na localidade de Miritituba (PA), uma vez que a carga segue diretamente para os portos de exportação. A simulação é construída com o resultado realizado de exportação de soja para o ano de 2021 e com a projeção de produção e exportação para o ano de 2025, segundo [IMEA \(2015, 2019\)](#).

Para este caso, o modelo de otimização estabelece a alocação dos terminais de transbordo nas mesmas localidades para os anos de 2021 e 2025, porém com capacidades de armazenamento modificadas em função da maior quantidade de soja direcionada à exportação. A orientação das rotas rodoviárias até os terminais de transbordo também sofre pequenas alterações, modificando a dinâmica do fluxo de soja na rede para os anos em questão.

#### 7.1.5.1 Cenário 5a

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 78, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 77. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 96 e Tabela 102. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 78), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 79) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 80), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.



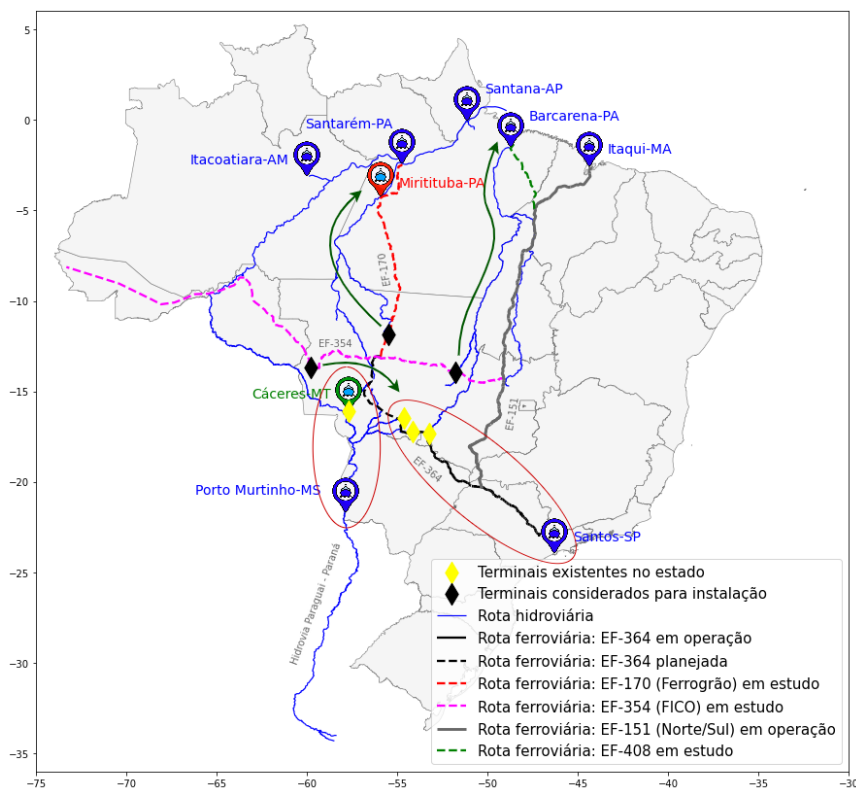


Figura 78 – Mapa de referência do cenário 5a utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 25% ferroviário e 75% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 77 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 5a - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Comodoro                | Ferrovário      | EF-354, EF-364                        | 2.520                   | Santos - SP      |
| Nova Nazaré             | Hidroviário     | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.760                   | Barcarena - PA   |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 1.720                   | Santarém - PA    |

Tabela 78 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 5a nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|   |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 716.000,00               | 41.036,57           | 699.913,96 - 732.086,04       | 0,92    | 714.613,00                  | 788.000,00               | 35.156,79           | 774.218,79 - 801.781,21       | 0,77    | 791.470,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 11.027.000,00            | 250.002,00          | 10.929.001,02 - 11.124.998,98 | 0,72    | 11.058.005,00               | 11.071.000,00            | 240.060,41          | 10.976.898,05 - 11.165.101,95 | 0,43    | 11.005.429,00               |
| Nova Nazaré                                     | Barcarena - PA      | 2.396.000,00             | 74.592,22           | 2.366.760,39 - 2.425.239,61   | 0,88    | 2.399.719,00                | 3.188.000,00             | 96.622,98           | 3.150.124,49 - 3.225.875,51   | 0,31    | 3.153.686,00                |
| Sinop   | Santarém - PA       | 8.734.000,00             | 467.251,54          | 8.550.840,76 - 8.917.159,24   | 0,7     | 8.795.451,00                | 12.871.000,00            | 478.235,30          | 12.683.535,21 - 13.058.464,79 | 0,54    | 12.769.416,00               |

Tabela 79 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 5a nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 47.966,99                              | 46.889,34 - 49.044,64              | 66,99                                  | 65,49 - 68,50                   | 51.395,72                              | 50.496,87 - 52.294,58              | 65,22                                  | 64,08 - 66,36                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 99.017,34                              | 98.210,95 - 99.823,73              | 63,76                                  | 63,24 - 64,28                   | 97.586,98                              | 96.498,14 - 98.675,82              | 62,92                                  | 62,22 - 63,62                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 232.324,32                             | 229.910,68 - 234.737,96            | 74,32                                  | 73,55 - 75,09                   | 198.625,00                             | 197.040,39 - 200.209,61            | 63,56                                  | 63,05 - 64,07                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 395.560,18                             | 389.770,53 - 401.349,83            | 69,95                                  | 68,92 - 70,97                   | 391.952,83                             | 386.584,48 - 397.321,18            | 69,08                                  | 68,13 - 70,02                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 47.529,41                              | 46.797,56 - 48.261,25              | 68,59                                  | 67,53 - 69,64                   | 56.241,61                              | 55.329,91 - 57.153,30              | 78,01                                  | 76,74 - 79,27                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 281.347,49                             | 278.111,27 - 284.583,71            | 113,95                                 | 112,64 - 115,26                 | 371.663,58                             | 367.886,97 - 375.440,18            | 113,00                                 | 111,85 - 114,15                 |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 699.191,64                             | 684.529,01 - 713.854,27            | 80,05                                  | 78,38 - 81,73                   | 1.022.909,85                           | 1.008.011,28 - 1.037.808,43        | 79,47                                  | 78,32 - 80,63                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.802.937,36</b>                    | <b>1.774.219,34 - 1.831.655,38</b> | <b>78,57</b>                           | <b>77,32 - 79,82</b>            | <b>2.190.375,57</b>                    | <b>2.161.848,04 - 2.218.903,10</b> | <b>78,17</b>                           | <b>77,16 - 79,19</b>            |

Tabela 80 – Resultado do custo da rota para o cenário 5a nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 37.829.788,40           | 36.979.884,11 - 38.679.692,69              | 52,83                  | 51,65 - 54,02                        | 40.790.741,20           | 40.077.358,29 - 41.504.124,11              | 51,76                  | 50,86 - 52,67                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 109.587.289,70          | 108.694.822,67 - 110.479.756,73            | 70,56                  | 69,99 - 71,14                        | 108.655.149,90          | 107.442.815,23 - 109.867.484,57            | 70,05                  | 69,27 - 70,84                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 250.282.877,40          | 247.682.664,61 - 252.883.090,19            | 80,06                  | 79,23 - 80,90                        | 229.827.812,50          | 227.994.274,52 - 231.661.350,48            | 73,54                  | 72,96 - 74,13                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 398.648.659,50          | 392.813.803,12 - 404.483.515,88            | 70,49                  | 69,46 - 71,53                        | 396.980.842,60          | 391.543.625,43 - 402.418.059,77            | 69,96                  | 69,01 - 70,92                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 70.966.595,70           | 69.873.878,12 - 72.059.313,28              | 102,4                  | 100,83 - 103,98                      | 77.950.842,90           | 76.687.228,64 - 79.214.457,16              | 108,11                 | 106,36 - 109,87                 |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 233.381.978,10          | 230.697.483,10 - 236.066.473,10            | 94,52                  | 93,44 - 95,61                        | 308.984.776,10          | 305.845.072,65 - 312.124.479,55            | 93,94                  | 92,99 - 94,90                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 564.433.876,60          | 552.597.229,20 - 576.270.524,00            | 64,62                  | 63,27 - 65,98                        | 827.282.237,90          | 815.232.957,14 - 839.331.518,66            | 64,27                  | 63,34 - 65,21                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.665.131.065,40</b> | <b>1.639.339.764,94 - 1.690.922.365,86</b> | <b>72,57</b>           | <b>71,44 - 73,69</b>                 | <b>1.990.472.403,10</b> | <b>1.964.823.331,90 - 2.016.121.474,30</b> | <b>71,04</b>           | <b>70,12 - 71,96</b>            |

### 7.1.5.2 Cenário 5b

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 79, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 81. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 97 e Tabela 103. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 82), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 83) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 84), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

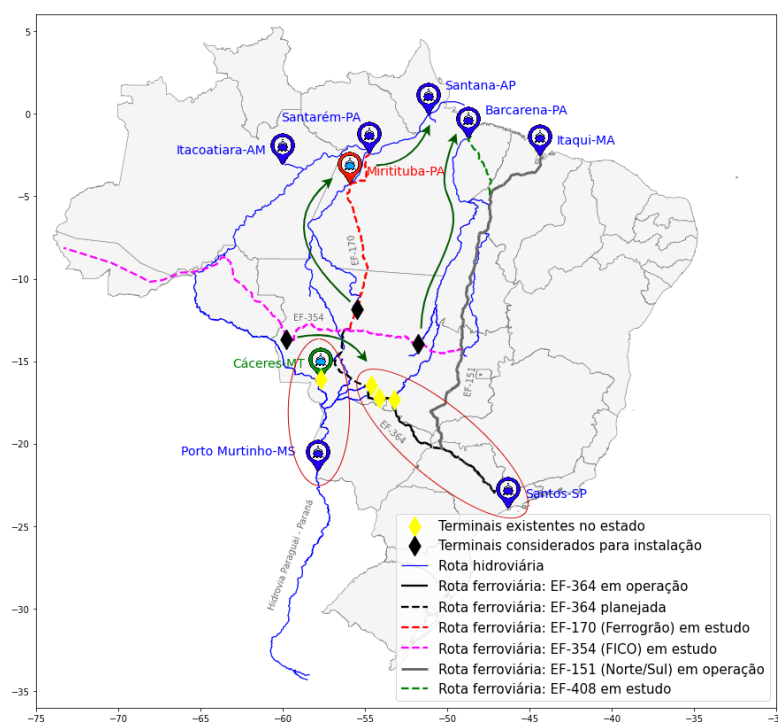


Figura 79 – Mapa de referência do cenário 5b utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 25% ferroviário e 75% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 81 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 5b - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Comodoro                | Ferrovário      | EF-354, EF-364                        | 2.520                   | Santos - SP      |
| Nova Nazaré             | Hidroviário     | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.760                   | Barcarena - PA   |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 2.260                   | Santana - AP     |

Tabela 82 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 5b nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|   |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 723.000,00               | 31.320,92           | 710.722,43 - 735.277,57       | 0,44    | 714.613,00                  | 786.000,00               | 24.576,41           | 776.366,22 - 795.633,78       | 0,52    | 791.470,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 11.062.000,00            | 323.103,70          | 10.935.345,68 - 11.188.654,32 | 0,97    | 11.058.005,00               | 10.907.000,00            | 414.392,33          | 10.744.561,19 - 11.069.438,81 | 0,49    | 11.005.429,00               |
| Nova Nazaré                                     | Barcarena - PA      | 2.407.000,00             | 56.577,38           | 2.384.822,07 - 2.429.177,93   | 0,71    | 2.399.719,00                | 3.167.000,00             | 77.723,87           | 3.136.532,80 - 3.197.467,20   | 0,62    | 3.153.686,00                |
| Sinop   | Santarém - PA       | 4.417.000,00             | 234.437,62          | 4.325.102,14 - 4.508.897,86   | 0,81    | 4.397.726,00                | 6.282.000,00             | 398.316,46          | 6.125.862,82 - 6.438.137,18   | 0,46    | 6.384.708,00                |
| Sinop   | Santana - AP        | 4.417.000,00             | 234.437,62          | 4.325.102,14 - 4.508.897,86   | 0,81    | 4.397.726,00                | 6.284.000,00             | 395.555,31          | 6.128.945,17 - 6.439.054,83   | 0,46    | 6.384.708,00                |

Tabela 83 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 5b nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 48.435,94                              | 47.613,43 - 49.258,45              | 66,99                                  | 65,86 - 68,13                   | 51.265,28                              | 50.636,93 - 51.893,62              | 65,22                                  | 64,42 - 66,02                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 100.738,83                             | 99.577,26 - 101.900,39             | 63,76                                  | 63,02 - 64,49                   | 99.285,79                              | 97.995,71 - 100.575,87             | 62,92                                  | 62,10 - 63,74                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 232.324,32                             | 229.640,93 - 235.007,71            | 74,32                                  | 73,46 - 75,18                   | 195.192,76                             | 192.854,33 - 197.531,19            | 63,56                                  | 62,80 - 64,32                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 395.839,98                             | 389.447,73 - 402.232,23            | 69,95                                  | 68,82 - 71,08                   | 384.423,24                             | 375.027,98 - 393.818,50            | 69,08                                  | 67,39 - 70,77                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 47.803,74                              | 46.987,84 - 48.619,65              | 68,58                                  | 67,41 - 69,76                   | 54.057,47                              | 52.912,95 - 55.201,98              | 78,01                                  | 76,35 - 79,66                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 280.094,02                             | 277.371,08 - 282.816,95            | 113,95                                 | 112,84 - 115,06                 | 364.883,46                             | 361.489,97 - 368.276,95            | 113,00                                 | 111,95 - 114,05                 |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 353.598,52                             | 346.241,73 - 360.955,31            | 80,05                                  | 78,39 - 81,72                   | 499.255,67                             | 486.846,82 - 511.664,51            | 79,47                                  | 77,50 - 81,45                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 424.438,36                             | 415.607,71 - 433.269,01            | 96,09                                  | 94,09 - 98,09                   | 600.197,41                             | 585.387,81 - 615.007,00            | 95,51                                  | 93,16 - 97,87                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.883.273,70</b>                    | <b>1.852.487,70 - 1.914.059,71</b> | <b>81,61</b>                           | <b>80,27 - 82,94</b>            | <b>2.248.561,07</b>                    | <b>2.203.152,51 - 2.293.969,63</b> | <b>81,80</b>                           | <b>80,15 - 83,45</b>            |

Tabela 84 – Resultado do custo da rota para o cenário 5b nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 38.199.632,70           | 37.550.948,26 - 38.848.317,14              | 52,83                  | 51,94 - 53,73                        | 40.687.211,40           | 40.188.519,94 - 41.185.902,86              | 51,76                  | 51,13 - 52,40                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 111.492.542,00          | 110.206.978,03 - 112.778.105,97            | 70,56                  | 69,75 - 71,38                        | 110.546.632,20          | 109.110.234,67 - 111.983.029,73            | 70,05                  | 69,14 - 70,97                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 250.282.877,40          | 247.392.060,52 - 253.173.694,28            | 80,06                  | 79,14 - 80,99                        | 225.856.387,90          | 223.150.598,73 - 228.562.177,07            | 73,54                  | 72,66 - 74,43                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 398.930.639,10          | 392.488.478,25 - 405.372.799,95            | 70,49                  | 69,36 - 71,63                        | 389.354.668,50          | 379.838.886,31 - 398.870.450,69            | 69,96                  | 68,25 - 71,67                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 71.376.215,30           | 70.157.987,12 - 72.594.443,48              | 102,40                 | 100,66 - 104,15                      | 74.923.625,70           | 73.337.335,27 - 76.509.916,13              | 108,11                 | 105,83 - 110,40                 |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 232.342.204,20          | 230.083.485,40 - 234.600.923,00            | 94,52                  | 93,61 - 95,44                        | 303.348.082,10          | 300.526.885,51 - 306.169.278,69            | 93,94                  | 93,07 - 94,82                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 285.448.183,30          | 279.509.293,27 - 291.387.073,33            | 64,62                  | 63,28 - 65,97                        | 403.774.921,80          | 393.739.220,04 - 413.810.623,56            | 64,27                  | 62,68 - 65,87                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 349.848.043,30          | 342.569.282,46 - 357.126.804,14            | 79,20                  | 77,56 - 80,85                        | 495.524.191,60          | 483.297.358,43 - 507.751.024,77            | 78,85                  | 76,91 - 80,80                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.737.920.337,30</b> | <b>1.709.958.513,32 - 1.765.882.161,28</b> | <b>75,31</b>           | <b>74,10 - 76,52</b>                 | <b>2.044.015.721,20</b> | <b>2.003.189.038,89 - 2.084.842.403,51</b> | <b>74,36</b>           | <b>72,88 - 75,85</b>            |

### 7.1.5.3 Cenário 5c

Nesta análise são consideradas as rotas de exportação indicadas na Figura 80, que ilustra o percurso da soja a partir de novos terminais de transbordo implantados. Os terminais já existentes seguem uma rota fixa, destacada em formato circular em vermelho no mapa, cujas distâncias estão sinalizadas na Tabela 11. Os novos terminais implantados seguem as rotas descritas na Tabela 85. A modelagem em rede de Petri P-temporizada estocástica que representa o cenário em questão, bem como os parâmetros utilizados no simulador são apresentados do Apêndice A na Figura 98 e Tabela 104. Os resultados quantitativos de soja destinada a cada porto (Tabela 86), a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> do cenário em questão (Tabela 87) e os custos do transporte da soja por essas rotas (Tabela 88), incluindo suas medidas estatísticas, são apresentados a seguir.

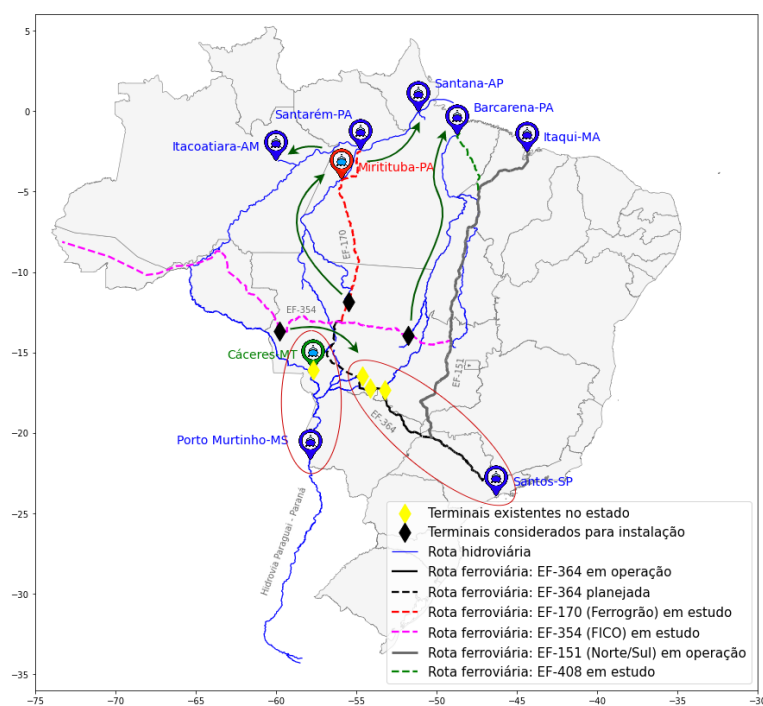


Figura 80 – Mapa de referência do cenário 5c utilizado no modelo de simulação de rede de Petri - 25% ferroviário e 75% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 85 – Descrição das rotas de exportação de soja para o cenário 5c - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminal de origem (MT) | Modal utilizado | Rota                                  | Distância estimada (km) | Porto de destino |
|-------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------|
| Comodoro                | Ferrovário      | EF-354, EF-364                        | 2.520                   | Santos - SP      |
| Nova Nazaré             | Hidroviário     | Rios das Mortes, Araguaia e Tocantins | 2.760                   | Barcarena - PA   |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 1.720                   | Santarém - PA    |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 2.260                   | Santana - AP     |
| Sinop                   | Hidroviário     | Rios Teles-Pires e Tapajós            | 2.280                   | Itacoatiara - AM |

Tabela 86 – Quantidade de soja destinada aos portos para o cenário 5c nos anos de 2021 e 2025

| Terminais de transbordo - MT                    | Portos de destino   | 2021                     |                     |                               |         |                             | 2025                     |                     |                               |         |                             |
|---|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------|-----------------------------|
|   |                     | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) | Qtde média de soja (ton) | Desvio padrão (ton) | Intervalo de confiança (ton)  | P-value | Qtde de soja esperada (ton) |
| Cáceres   | Porto Murtinho - MS | 728.000,00               | 42.379,24           | 711.387,64 - 744.612,36       | 0,37    | 714.613,00                  | 779.000,00               | 45.044,42           | 761.342,91 - 796.657,09       | 0,43    | 791.470,00                  |
| Itiquira, Rondonópolis, Alto Araguaia, Comodoro | Santos - SP         | 10.950.000,00            | 390.333,19          | 10.796.992,20 - 11.103.007,80 | 0,43    | 11.058.005,00               | 10.944.000,00            | 395.706,96          | 10.788.885,72 - 11.099.114,28 | 0,65    | 11.005.429,00               |
| Nova Nazaré                                     | Barcarena - PA      | 2.395.000,00             | 72.006,94           | 2.366.773,80 - 2.423.226,20   | 0,85    | 2.399.719,00                | 3.136.000,00             | 84.640,42           | 3.102.821,57 - 3.169.178,43   | 0,55    | 3.153.686,00                |
| Sinop   | Santarém - PA       | 2.868.000,00             | 151.907,87          | 2.808.453,21 - 2.927.546,79   | 0,24    | 2.931.817,00                | 4.209.000,00             | 227.703,75          | 4.119.741,77 - 4.298.258,23   | 0,55    | 4.256.472,00                |
| Sinop   | Santana - AP        | 2.868.000,00             | 149.318,45          | 2.809.468,24 - 2.926.531,76   | 0,23    | 2.931.817,00                | 4.209.000,00             | 220.383,76          | 4.122.611,16 - 4.295.388,84   | 0,53    | 4.256.472,00                |
| Sinop   | Itacoatiara - AM    | 2.868.000,00             | 148.579,94          | 2.809.757,73 - 2.926.242,27   | 0,23    | 2.931.817,00                | 4.211.000,00             | 220.746,46          | 4.124.468,98 - 4.297.531,02   | 0,55    | 4.256.472,00                |

Tabela 87 – Resultado de emissão de CO<sub>2</sub> para o cenário 5c nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                                   |                                    |  |                                 | 2025                                   |                                    |  |                                 |
|------------------------------|---------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------------|
|                              |                     | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) | Emissão total de CO <sub>2</sub> (ton) | Intervalo de confiança (E.tot)     | Emissão unit. CO <sub>2</sub> (kg/ton) | Intervalo de confiança (E.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 48.770,90                              | 47.657,99 - 49.883,82              | 66,99                                  | 65,46 - 68,52                   | 50.808,72                              | 49.657,07 - 51.960,37              | 65,22                                  | 63,74 - 66,70                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 101.248,89                             | 100.321,79 - 102.176,00            | 63,76                                  | 63,17 - 64,34                   | 100.103,73                             | 99.275,02 - 100.932,45             | 62,92                                  | 62,40 - 63,44                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 227.121,92                             | 223.835,71 - 230.408,13            | 74,32                                  | 73,24 - 75,40                   | 197.099,56                             | 194.182,37 - 200.016,75            | 63,56                                  | 62,62 - 64,50                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 391.852,90                             | 383.821,49 - 399.884,30            | 69,95                                  | 68,52 - 71,38                   | 382.834,43                             | 375.095,70 - 390.573,16            | 69,08                                  | 67,68 - 70,48                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 48.283,84                              | 47.015,97 - 49.551,71              | 68,59                                  | 66,78 - 70,39                   | 55.383,55                              | 54.057,75 - 56.709,35              | 78,01                                  | 76,14 - 79,87                   |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 277.814,98                             | 274.073,48 - 281.556,47            | 113,95                                 | 112,42 - 115,49                 | 361.380,40                             | 357.321,57 - 365.439,22            | 113,00                                 | 111,73 - 114,27                 |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 229.594,87                             | 224.827,91 - 234.361,83            | 80,05                                  | 78,39 - 81,72                   | 334.506,07                             | 327.412,36 - 341.599,77            | 79,47                                  | 77,79 - 81,16                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 275.591,86                             | 269.967,42 - 281.216,29            | 96,09                                  | 94,13 - 98,05                   | 402.010,01                             | 393.758,84 - 410.261,18            | 95,51                                  | 93,55 - 97,47                   |
| Sinop                        | Itacoatiara - AM    | 277.295,45                             | 271.664,24 - 282.926,66            | 96,69                                  | 94,72 - 98,65                   | 404.702,37                             | 396.386,22 - 413.018,52            | 96,11                                  | 94,13 - 98,08                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.877.575,61</b>                    | <b>1.843.186,01 - 1.911.965,21</b> | <b>82,64</b>                           | <b>81,13 - 84,15</b>            | <b>2.288.828,83</b>                    | <b>2.247.146,88 - 2.330.510,77</b> | <b>83,08</b>                           | <b>81,57 - 84,59</b>            |



Tabela 88 – Resultado do custo da rota para o cenário 5c nos anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Terminais de transbordo - MT | Portos de destino   | 2021                    |  |                        |                                      | 2025                    |  |                        |                                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|--|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
|                              |                     | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (Custo unit.) | Custo total (US\$)      | Intervalo de confiança (C.tot)             | Custo unit. (US\$/ton) | Intervalo de confiança (C.unit) |
| Cáceres                      | Porto Murtinho - MS | 38.463.807,20           | 37.586.094,98 - 39.341.519,42              | 52,83                  | 51,63 - 54,04                        | 40.324.857,10           | 39.410.839,64 - 41.238.874,56              | 51,76                  | 50,59 - 52,94                   |
| Itiquira                     | Santos - SP         | 112.057.061,20          | 111.030.993,46 - 113.083.128,94            | 70,56                  | 69,92 - 71,21                        | 111.457.345,90          | 110.534.639,41 - 112.380.052,39            | 70,05                  | 69,47 - 70,63                   |
| Rondonópolis                 | Santos - SP         | 244.678.334,40          | 241.138.099,47 - 248.218.569,33            | 80,06                  | 78,91 - 81,22                        | 228.062.734,90          | 224.687.270,46 - 231.438.199,34            | 73,54                  | 72,46 - 74,63                   |
| Alto Araguaia                | Santos - SP         | 394.912.429,80          | 386.818.316,01 - 403.006.543,59            | 70,49                  | 69,05 - 71,94                        | 387.745.475,80          | 379.907.470,83 - 395.583.480,77            | 69,96                  | 68,55 - 71,38                   |
| Comodoro                     | Santos - SP         | 72.093.049,60           | 70.199.981,59 - 73.986.117,61              | 102,4                  | 99,72 - 105,09                       | 76.761.579,00           | 74.924.014,63 - 78.599.143,37              | 108,11                 | 105,53 - 110,70                 |
| Nova Nazaré                  | Barcarena - PA      | 230.451.706,20          | 227.348.082,19 - 233.555.330,21            | 94,52                  | 93,25 - 95,80                        | 300.435.790,20          | 297.061.460,53 - 303.810.119,87            | 93,94                  | 92,89 - 95,00                   |
| Sinop                        | Santarém - PA       | 185.344.213,20          | 181.496.007,88 - 189.192.418,52            | 64,62                  | 63,28 - 65,97                        | 270.533.054,10          | 264.795.990,18 - 276.270.118,02            | 64,27                  | 62,91 - 65,64                   |
| Sinop                        | Santana - AP        | 227.159.653,20          | 222.523.651,20 - 231.795.655,20            | 79,2                   | 77,59 - 80,82                        | 331.900.274,10          | 325.088.090,37 - 338.712.457,83            | 78,85                  | 77,24 - 80,47                   |
| Sinop                        | Itacoatiara - AM    | 228.708.373,20          | 224.063.849,35 - 233.352.897,05            | 79,74                  | 78,13 - 81,36                        | 334.331.923,90          | 327.461.802,01 - 341.202.045,79            | 79,39                  | 77,76 - 81,03                   |
| <b>Total</b>                 |                     | <b>1.733.868.628,00</b> | <b>1.702.205.076,13 - 1.765.532.179,87</b> | <b>76,31</b>           | <b>74,92 - 77,71</b>                 | <b>2.081.553.035,00</b> | <b>2.043.871.578,07 - 2.119.234.491,93</b> | <b>75,56</b>           | <b>74,19 - 76,92</b>            |

Uma vez apresentados os resultados numéricos da simulação dos cenários na Seção 7.1, a Seção 7.2 a seguir, realizará uma análise comparativa mais abrangente dos principais soluções obtidas.

## 7.2 Análise dos Resultados da Rede de Petri P-temporizada

Nesta seção são analisados os resultados da simulação de Rede de Petri P-temporizada quanto as soluções relativas ao custo unitário e emissão de CO<sub>2</sub> das rotas de exportação para os anos de 2021 e 2025 de cada cenário. A Figura 81 sumariza todos estes valores através de um gráfico de barras e linhas.

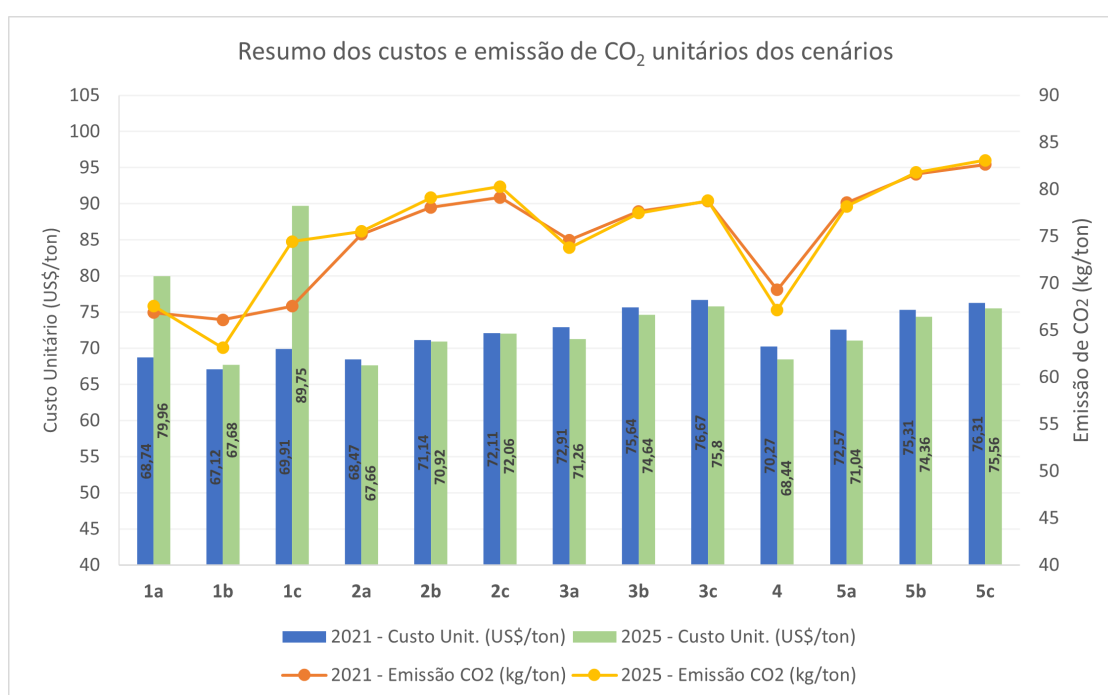


Figura 81 – Resumo dos resultados de custos e emissão de CO<sub>2</sub> unitários dos cenários obtidos pelo simulador de rede de Petri

Fonte: Elaborado pelo autor

Através de uma análise geral do gráfico exibido na Figura 81 é possível perceber que a maioria dos cenários simulados apresentam uma redução no custo unitário de transporte nas rotas do cenário, dado o aumento na quantidade de soja destinada à exportação de aproximadamente 20,6% do ano de 2021 para 2025. Apenas nos cenários 1a, 1b e 1c, com utilização preferencial do modo ferroviário, há um aumento nos custos devido a necessidade de implantação de mais um terminal de transbordo para o atendimento das demandas de expansão do quantitativo de soja destinado à exportação. Além disso, a maior diferença em destaque do cenários 1a e 1c para o ano de 2025 se deve à proposta de direcionamento de maiores quantidades de soja para os portos de Santos (SP), Barcarena (PA) e Itaquí

(MA), cujas distâncias ferroviárias são superiores ao porto de Santarém (PA), localizado no arco norte do país.

Em relação ao *trade-off* custo e sustentabilidade ambiental é possível observar, na Figura 81, que os cenários mais eficientes são respectivamente o 1b, 4, 2a e 3a. O cenário 1b trata a expansão da rede intermodal considerando apenas a utilização do modo ferroviário. O cenário 4 já utiliza uma relação de distribuição de modais na proporção de 75% ferroviário e 25% hidroviário. Já o cenário 2a considera apenas a expansão hidroviária enquanto que o 3a faz uso de uma relação de distribuição de 50% em cada modal.

Conforme Figura 81, os melhores desempenhos de emissão de CO<sub>2</sub> são alcançados pelos cenários 1b e 4, explicados pelo fato de uma grande quantidade de soja ser transportada pelo modo ferroviário até o porto de Santarém-PA (arco norte do país). Esse resultado reflete que ao direcionar grandes volumes de soja para serem transportados em rotas mais curtas, especialmente utilizando o modo ferroviário que tem uma trajetória quase linear, é possível alcançar importantes reduções nos custos de transporte e nas emissões de CO<sub>2</sub>. Destes cenários, destaca-se a importância da ferrovia EF-170 (ferrogrão) quanto ao possível impacto na diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> e na redução dos custos de transportes, mesmo considerando o ponto adicional de transbordo em Miritituba (PA), que gera a adição de mais um custo (de transbordo) na rota. As Figuras 82 e 83 ilustram os detalhes dos custos e emissões das rotas utilizadas nesses cenários. O destaque em vermelho na Figura 82 representa a alteração do número de terminais de transbordo instalados do ano de 2021 para 2025, dado o aumento do volume de soja destinado à exportação.

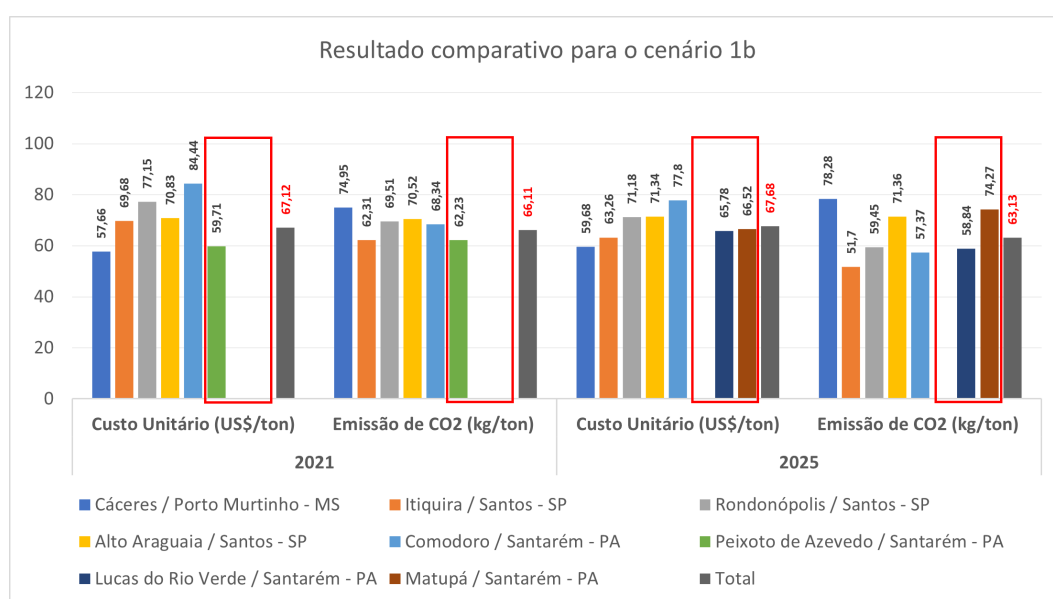


Figura 82 – Resultados de custos e emissão de CO<sub>2</sub> unitários do cenário 1b obtido pelo simulador de rede de Petri

Fonte: Elaborado pelo autor

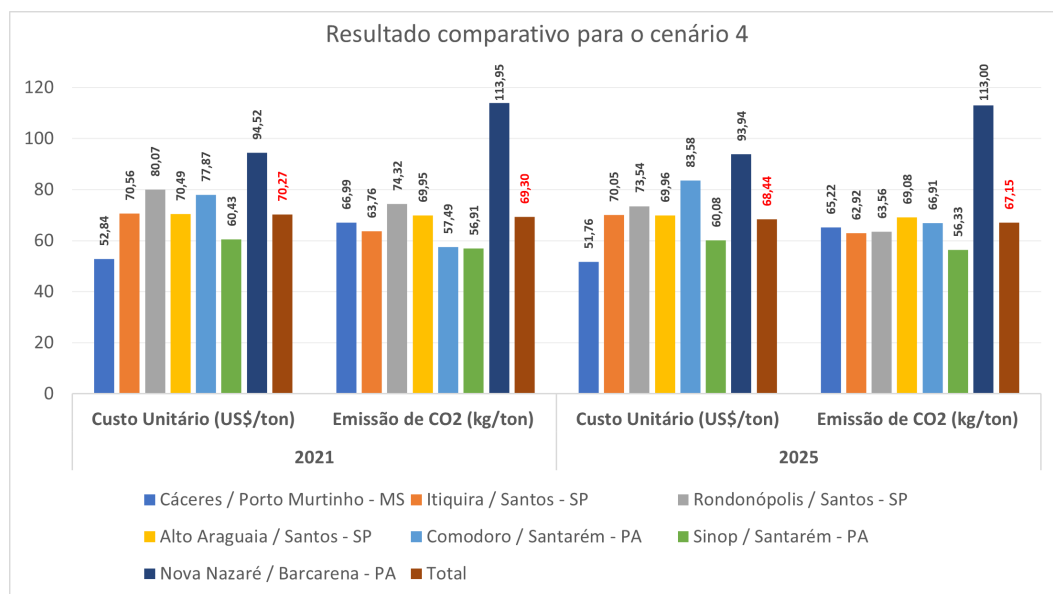


Figura 83 – Resultados de custos e emissão de CO<sub>2</sub> unitários do cenário 4 obtido pelo simulador de rede de Petri

Fonte: Elaborado pelo autor

Os cenários 2a e 3a, conforme Figura 81, apresentam emissões de CO<sub>2</sub> bem próximas, com uma diferença percentual de 0,8%, de aproximadamente 75 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada transportada. No cenário 2a, há a prevalência do uso exclusivo do modo hidroviário, que contribui para a redução do custo do transporte de soja para os portos de exportação. Já no cenário 3a, apesar da maior quantidade de soja destinada a exportação utilizar o modo hidroviário para alcançar o porto de exportação, a utilização do modo ferroviário em longas distâncias gerou um aumento nos custos de transporte para esse caso. Dessa forma, a opção pelo uso exclusivo de hidrovias se mostra mais viável economicamente, apesar de gerar maiores emissões de CO<sub>2</sub> em relação aos cenários 1b e 4. Além disso, o uso desse modal acarreta menor impacto ambiental associado a sua implantação e operação, já que se encontra disponível, necessitando de adequações para a utilização. Em outra linha, um modo ferroviário necessita ser totalmente construído, provocando maiores impactos ambientais durante sua implantação e operação. As Figuras 84 e 85 ilustram os detalhes dos custos e emissões das rotas utilizadas nesses cenários.

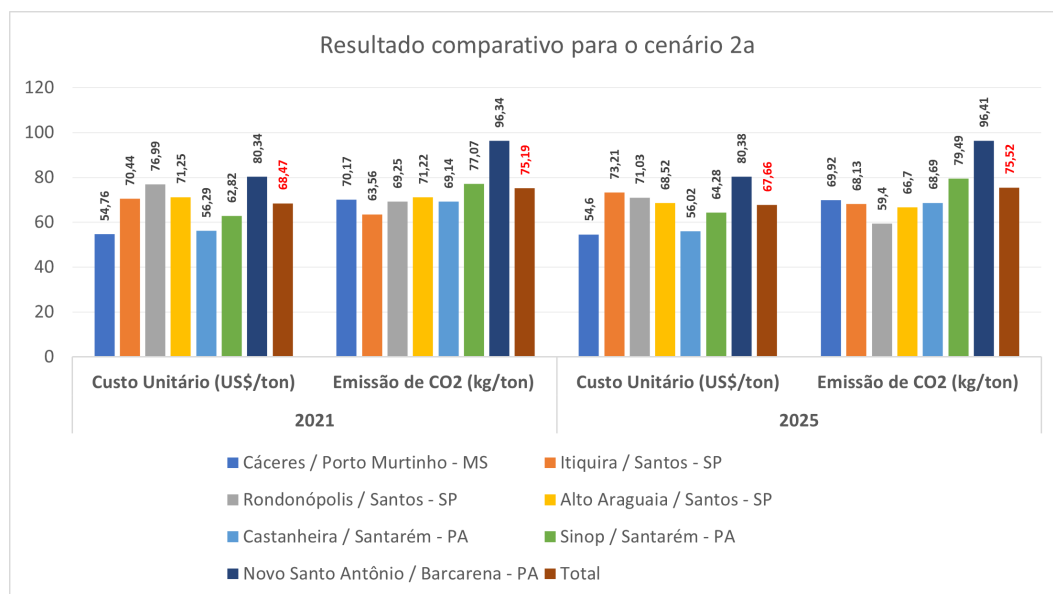


Figura 84 – Resultados de custos e emissão de CO<sub>2</sub> unitários do cenário 1b obtido pelo simulador de rede de Petri

Fonte: Elaborado pelo autor

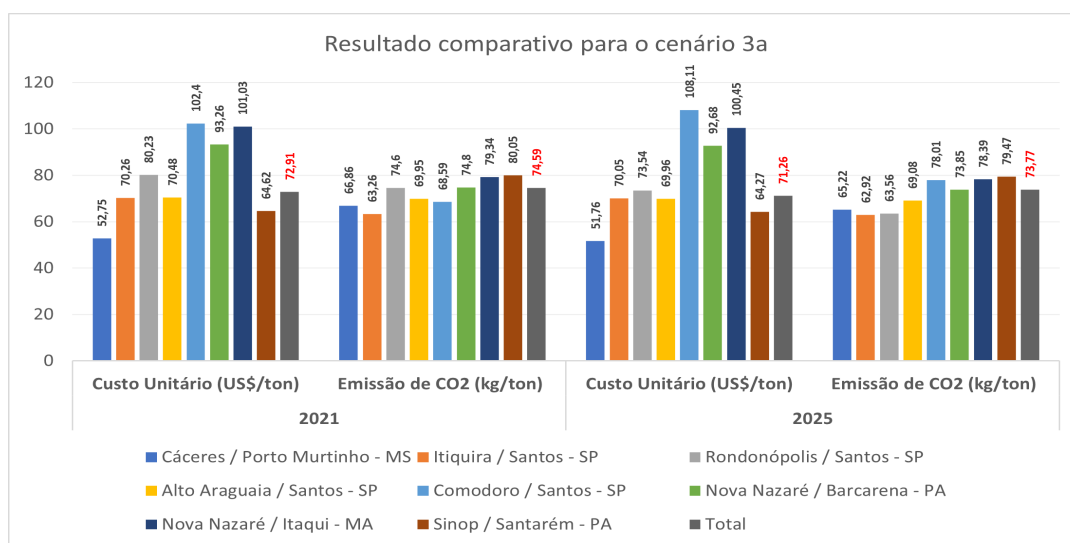


Figura 85 – Resultados de custos e emissão de CO<sub>2</sub> unitários do cenário 4 obtido pelo simulador de rede de Petri

Fonte: Elaborado pelo autor

Os números obtidos pelas simulações realizadas endossam a importância da diversificação dos modais de transporte da soja brasileira a partir de bom planejamento logístico, uma vez que oferecem significativas vantagens como a integração de diferentes modais, a redução dos custos logísticos e dos impactos ambientais relacionados a emissão de CO<sub>2</sub>. As soluções dos custos das rotas podem ser comparadas com [Salin \(2023\)](#), que analisa os atuais trajetos de exportação da soja brasileira e os números do desempenho logístico do setor. Em relação a emissão de CO<sub>2</sub>, não foram localizados estudos na literatura com

métricas de emissão para trajetos intermodais de exportação de soja do Mato Grosso como os propostos nesta tese.

O transporte intermodal de soja para exportação no estado de Mato Grosso promove vantagens significativas, como a integração de diferentes modais de transporte e a redução de custos logísticos. Entretanto, no atual momento deste estudo, enfrenta significativos desafios, como os altos custos de transporte relacionados às rotas de exportação (Salin, 2023) e os impactos ambientais relacionados às emissões de CO<sub>2</sub> pela grande utilização do transporte rodoviário. Para superar esses obstáculos e garantir uma logística eficiente e sustentável é preciso investir em melhorias de infraestrutura, integrar diferentes modais de transporte e adotar medidas que promovam a redução das emissões de gases de efeito estufa.

As técnicas utilizadas neste trabalho se mostraram eficientes e de grande valor como instrumentos de auxílio à tomada de decisão estratégica sobre projetos de expansão da rede de transportes intermodal do estado do Mato Grosso. Contudo, para se alcançar os números dos cenários descritos, são necessários estudos complementares de ampliação de capacidade dos portos arco norte e análises de viabilidades econômicas e ambientais relacionadas à implementação operacional dos modais sugeridos.

## 8 CONCLUSÃO

O estudo apresentou uma abordagem sustentável através da aplicação de modelos de otimização e simulação de rede de Petri P-temporizada no sistema logístico de exportação da soja do estado do Mato Grosso. Os principais objetivos foram localizar, dimensionar e estimar custo de instalação terminais de transbordo no estado, além de analisar diferentes cenários para o fluxo doméstico de exportação de soja para os principais portos de destino desse estado considerando o *trade-off* custo de transporte e sustentabilidade ambiental. A investigação considerou a base de dados de exportação de soja realizada do ano de 2021 (ComexVis, 2021) e a projeção para o ano 2025 (IMEA, 2015, 2019). A estratégia proposta baseou-se na implementação de ferramentas de otimização e simulação com o uso de modelos de rede de Petri P-temporizada. Todo o desenvolvimento foi realizado em linguagem *Python*, sendo o simulador, elaborado a partir do estado da arte dos conceitos de rede de Petri P-temporizada, uma ferramenta singular na literatura até o momento.

O modelo matemático de otimização considerou as possíveis rotas de transporte intermodais apontadas em EPL (2021) para o estado, tratando diversas variáveis de interesse, tais como: todas as cidades produtoras de soja; as reais distâncias rodoviárias entre as cidades; os terminais de transbordo já existentes e suas capacidades; os custos de implantação de terminais; as localidades candidatas à instalação de terminais próximas a hidrovias e ferrovias de forma a favorecer a intermodalidade. A representação proposta permitiu trabalhar com pesos, de forma a beneficiar condições pré-determinadas por um tomador de decisão. Além disso, todos os dados posicionais foram tratados de forma georreferenciada. As soluções mostraram uma redução mínima de 20% na emissão de CO<sub>2</sub> em todos os cenários, mantendo o foco no custo mínimo de instalação da infraestrutura dos terminais. A análise de sensibilidade da variação do peso  $\theta$  (componente ambiental) possibilitou obter limites de comparação entre o custo de instalação de terminais de transbordo e a distância rodoviária total percorrida até terminais. Os gráficos dessa variação mostraram que, após um determinado valor da componente ambiental  $\theta$ , os custos de instalação dos terminais se tornaram muito elevados em detrimento do ganho na redução da distância rodoviária total percorrida, com conseqüente repercussão na emissão de CO<sub>2</sub>. As regiões delimitadas em azul, nesses gráficos, destacaram regiões de eficiência prioritariamente econômica, aliada à preocupação ambiental no que concerne à menor distância rodoviária total percorrida. Já os maiores valores de  $\theta$  contidos nessas regiões, determinaram os cenários dos modelos de simulação. Dessa forma, pode-se concluir que as soluções obtidas pelo modelo de otimização permitem auxiliar no planejamento eficiente quanto à localização estratégica para a instalação de novos terminais de transbordo, na medida em que tratam da redução dos custos de implantação dessas estruturas logísticas

em consonância com a preocupação ambiental.

O modelo de simulação de rede de Petri P-temporizada proposto, assim como o modelo de otimização, também considerou as possíveis rotas de transporte intermodais apontadas em [EPL \(2021\)](#) para o estado. Todos os cenários analisados na simulação foram provenientes dos casos de melhor eficiência econômica e ambiental do modelo de otimização, ou seja, que apresentaram o menor custo de instalação dos terminais de transbordo aliada à menor distância rodoviária percorrida (redução de emissão de CO<sub>2</sub>). Através do simulador de rede de Petri P-temporizada estocástico, desenvolvido na seção 4.9, constatou-se que a maioria dos cenários simulados apresentaram redução no custo unitário de transporte considerando o aumento 20,6% na quantidade de soja destinada à exportação do ano de 2021 para 2025. Em relação ao *trade-off* custo e sustentabilidade ambiental verificou-se que os cenários mais eficientes foram respectivamente o 1b, 4, 2a e 3a. O cenário 1b tratou a expansão da rede intermodal considerando apenas a utilização do modo ferroviário. O cenário 4 utilizou uma relação de distribuição de modais na proporção de 75% ferroviário e 25% hidroviário. Já o cenário 2a considerou apenas a expansão hidroviária enquanto que o 3a fez uso de uma relação de distribuição de 50% em cada modal. Os melhores desempenhos de emissão de CO<sub>2</sub> foram alcançados pelos cenários 1b e 4, explicados pela grande quantidade de soja transportada pelo modo ferroviário até o porto de Santarém-PA (arco norte do país). Em relação aos cenários explorados, cabe destacar a importância da ferrovia EF-170 (ferrogrão) quanto ao seu impacto na diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> e na redução dos custos de transportes, mesmo considerando o ponto adicional de transbordo em Miritituba (PA). A implantação dessa ferrovia mostra-se como um promissor vetor de desenvolvimento e alternativa para o escoamento da produção do estado, principalmente se considerar uma possível expansão dos portos do arco norte do país. O cenário 2a adotou exclusivamente o modo hidroviário como meio de escoamento da produção, o que contribuiu na redução do custo do transporte de soja para os portos de exportação do arco norte. Já no cenário 3a, a maior quantidade soja destinada à exportação utilizou o modo hidroviário para alcançar o porto de exportação, porém o uso do modo ferroviário em longas distâncias neste cenário acarretou um aumento nos custos de transporte para este caso. A partir do cenário 2a, verificou-se que o uso exclusivo de hidrovias foi mais viável economicamente considerando o aumento do volume de exportação do ano de 2025, apesar de gerar maiores emissões de CO<sub>2</sub> em relação aos cenários 1b e 4. Assim, pode-se concluir que as soluções obtidas pelo modelo de simulação também contribuem para o planejamento eficiente da logística de exportação de soja do estado do Mato Grosso, uma vez que explora as melhores rotas de exportação de soja através da intermodalidade, privilegiando a redução dos custos de transporte com a devida responsabilidade ambiental.

Os resultados aqui apresentados permitem gerar avanços na logística sustentável do maior estado produtor de soja do mundo, além de incentivar o desenvolvimento de outras pesquisas no âmbito da sustentabilidade, de acordo com os desafios apontados em



Santos (2017) Bektaş et al. (2019). As abordagens híbridas de otimização e simulação se mostram adequadas para se alcançar o objetivo de planejamentos estratégicos a partir de modelos mais próximos ao desempenho de um sistema real. Assim, através desse estudo, pode-se concluir que é possível obter soluções eficientes e inovadoras que aliem redução de custos no sistema logístico da soja no estado do Mato Grosso com a devida responsabilidade ambiental. Portanto, é essencial que empresas e governos invistam na intermodalidade de transporte, de forma a melhorar a competitividade do setor no mercado global.

O presente estudo limita-se ao problema de localização, alocação de terminais de transbordo e rotas de escoamento de produção no estado de Mato Grosso, usando dados realizados de exportação de soja do ano de 2021 (ComexVis, 2021) e projeção para o ano 2025 segundo IMEA (2015, 2019). Apesar da abrangência do tema, dos parâmetros e variáveis que possam se inter-relacionar, a análise apresentada é uma representação simplificada de um sistema real complexo, no qual um número limitado de informações foi considerado. As principais premissas empregadas encontram-se no Capítulo 5. Estudos sobre a navegabilidade de certos rios e suas adequações são recomendados para refinar e melhorar a possível localização de terminais de transbordo nas localidades sugeridas. Os limites de capacidade de fluxo de cada rota intermodal, bem como os investimentos necessários para ampliação de capacidade portuária para receber a demanda direcionada não foram analisados nesse trabalho.

Como possíveis avanços para pesquisas futuras, propõem-se avaliar as particularidades que envolvem o fluxo de soja dos novos terminais de transbordo propostos até o portos marítimos exportadores, tratando das capacidades, dos custos de implantação e de possíveis ampliações, de forma a garantir a realização do quantitativo de soja trafegado por aquela rota intermodal sugerida. Aprofundar na investigação dos tempos das operações relacionada à cadeia de exportação da soja, de forma a aperfeiçoar o nível de abstração da rede de Petri representativa desse sistema. Elaborar um modelo de otimização que também contemple os portos e propor comparações dos resultados desse modelo com os simulados pela rede de Petri.

Por fim, a partir das ferramentas desenvolvidas e dos modelos propostos, é possível o desenvolvimento de novos trabalhos que considerem abordagens de localização de instalações e estudo de fluxos, tais como: localização de subestações elétricas e fluxo da rede, localização de torres de telecomunicações e fluxo de dados da rede, localização de fábricas e centros de distribuição, entre outros. Possíveis estudos de macrorregiões brasileiras e tratamento de multigrãos podem ser construídos a partir de ampliações dos modelos e ajustes nos dados de entrada. Casos similares em outros países também podem ser aplicados com as ferramentas elaboradas neste estudo.

## REFERÊNCIAS

- Akian, M., Bapat, R., e Gaubert, S. (2006). Max-Plus Algebra. *Discrete Mathematics and Its Applications*, 39. <https://doi.org/10.1201/9781420010572.ch25>
- Almeida, C., Seleme, R., e Neto, J. (2013). Rodovia Transoceânica: uma alternativa logística para o escoamento das exportações da soja brasileira com destino à China. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 51, 351–368. <https://doi.org/10.1590/S0103-20032013000200008>
- Almeida, M., Amaral, M., e Morabito, R. (2016). Um estudo sobre localização de terminais intermodais na rede de escoamento da soja brasileira. *Production*, 26. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.144513>
- Altiook, T. (1985). On the phase-type approximations of general distributions. *IIE Transactions*, 17, 110–116. <https://doi.org/10.1080/07408178508975280>
- Amaral, M., Almeida, M. S., e Morabito, R. (2012). Um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para escoamento da soja brasileira destinada à exportação. *Gestão e Produção*, UFSCAR. Impresso.
- Araújo, K. W. G. (2018). *Planejamento de rede de transporte urbano e os centros atratores de viagens: uma perspectiva de otimização baseada em redes de Petri*. PPGEC, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE.
- Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R., e Yanasse, H. (2007). *Pesquisa Operacional*. Campus - Elsevier.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *ABNT NBR 14.653 Avaliação de Bens - Parte 5: Máquinas, equipamentos, instalações e bens industriais em geral*. ABNT - Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *ABNT NBR 14.653 Avaliação de Bens - Parte 2: Imóveis Urbanos*. ABNT - Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). *ABNT NBR 14.653 Avaliação de Bens - Parte 1: Procedimentos Gerais*. ABNT - Rio de Janeiro.
- Barreto, R. C. P. e Ribeiro, A. J. M. (2020). Logística no brasil: Uma análise do panorama dos modais rodoviários e ferroviários no cenário nacional demonstrando as vantagens e desvantagens das referidas modalidade. *Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo*, 5, 145–176

- Bektaş, T., Ehmke, J., Psaraftis, H., e Puchinger, J. (2018). The Role of Operational Research in Green Freight Transportation. *European Journal of Operational Research*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.001>
- Bektaş, T., Ehmke, J. F., Psaraftis, H. N., e Puchinger, J. (2019). The role of operational research in green freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 274(3), 807–823. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.001>
- Bender, J. e Silva, A. (2020). Produção de Soja e Milho do Mato Grosso: Análise do Número de Berços Mínimos para Atender as Possíveis Demandas no Porto de Santarém (PA). *E&S Engineering and Science*, 9, 2–13. <https://doi.org/10.18607/ES2020910085>
- Bolch, G., Greiner, S., Meer, H., e Trivedi, K. (2006). *Queuing Networks and Markov Chains—Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. <https://doi.org/10.1002/0471200581.ch6>
- Bonet, P., Lladó, C., Puigjaner, R., e Knottenbelt, W. (2007). PIPE v2.5: a Petri Net Tool for Performance Modeling. *Proc. 23rd Latin American Conference on Informatics (CLEI 2007)*.
- Bouyekhf, R., Abbas-Turki, A., Grunder, O., e Moudni, A. (2003). Modelling, performance evaluation and planning of public transport systems using generalized stochastic petri nets. *Transport Reviews*, 23, 51–69. <https://doi.org/10.1080/01441640309898>
- Branco, J., Bartholomeu, D., Alves Junior, P., e Caixeta-Filho, J. (2020). Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the brazilian's transportation network: An application of a network equilibrium model. *Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.011>
- BRASIL (2009). Lei Federal nº6.759 de 05 de fevereiro de 2009. Regulamenta a administração das atividades aduaneiras, e a fiscalização, o controle e a tributação das operações de comércio exterior. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/decreto/d6759.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6759.htm) (Acesso em: 08/08/2021)
- Caixeta Filho, J. (2010). Logística para a agricultura brasileira. *Revista Brasileira de Comércio Exterior*, 103, 18–30.
- Caixeta-Filho, J. e Pera, T. (2018). Post-harvest losses during the transportation of grains from farms to aggregation points. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, 7, 209–247. <https://doi.org/10.1504/IJLEG.2018.093755>
- Caneppele, C., da Silva, A. R. B., Pereira, P. S. X., Blanger, B. R., Daros, R., dos Santos, L. O., da Costa Cañizares, L., e Campos, L. O. (2019). Perdas no transporte rodoviário de grãos. *CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento*, 148–156.

- Cassandras, C. G. e Lafortune, S. (1999). Discrete event systems: The state of the art and new directions. *Applied and computational control, signals, and circuits*, 1–65. Springer.
- Cassandras, C. G. e Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems* (2 ed.). Springer.
- Castelain, E. e Mesghouni, K. (2002). Regulation of a public transport network with consideration of the passenger flow: modeling of the system with high-level petri nets. volume 6, 5 pp. vol.6. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1175594>
- Castillo, R. (2004). Transporte e logística de granéis sólidos agrícolas: componentes estruturais do novo sistema de movimentos do território brasileiro brasileiro. *investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (55), 79–96. <https://doi.org/10.14350/rig/30112>
- Castro, N. (2002). Road Expansion and Agricultural Development in the Brazilian Cerrados. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.326680>
- Cavone, G., Dotoli, M., Epicoco, N., e Seatzu, C. (2017a). Intermodal terminal planning by petri nets and data envelopment analysis. *Control Engineering Practice*, 69, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.08.007>
- Cavone, G., Dotoli, M., e Seatzu, C. (2017b). A survey on petri net models for freight logistics and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, PP, 1–19. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2737788>
- Cepea e CNA (2021). PIB do agronegócio avança no trimestre e acumula alta de 9,81% no primeiro semestre de 2021. Disponível em: [https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea\\_PIB\\_CNA\\_1semestre\\_21\(2\).pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/Cepea_PIB_CNA_1semestre_21(2).pdf) (Acesso em: 25/09/2021)
- Chankong, V. e Haimes, Y. (1983). *Multiobjective Decision Making: Theory And Methodology*, 406. North Holland.
- Chen, S.-T., Kuo, H.-I., e Chen, C.-C. (2010). Modeling the relationship between the oil price and global food prices. *Applied Energy*, 87, 2517–2525. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.020>
- Chopra, S. e Meindl, P. (2013). *Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation*. Pearson. [https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5_22)
- Chwif, L. e Medina, A. C. (2014). *Modelagem e Simulação de eventos discretos: teoria e aplicações*. Campus - Elsevier.
- Clímaco, J. C. N., Antunes, C. H., e Alves, M. J. T. G. (2003). *Programação Linear Multiobjetivo - do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objetivo*. Imprensa da Universidade de Coimbra.

- CNA (2021). Impulsionado por ramo agrícola, PIB do agronegócio cresce 5,35% no 1º trimestre de 2021. Disponível em: [https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/dtec.pib\\_mar\\_2021.10jun2021vf-1.pdf](https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/dtec.pib_mar_2021.10jun2021vf-1.pdf) (Acesso em: 10/09/2021)
- Comex Stat (2021). Ministério da Economia - Exportação e Importação Geral. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/> (Acesso em: 03/12/2022)
- ComexVis (2021). Sistema Interativo dos Principais Aspectos das Estatísticas de Comércio Exterior. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis> (Acesso em: 03/12/2022)
- Conab (2014). Perspectivas para a agropecuária - volume 2 - Safra 2014-2015. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria> (Acesso em: 08/08/2021)
- Conab (2021). Sistema de Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras - Sicarm. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/armazenagem/sistema-de-cadastro-nacional-de-unidades-armazenadoras-sicarm-1> (Acesso em: 16/02/2021)
- Confederação Nacional do Transporte (2019). Anuário CNT dos transportes. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/Inicial> (Acesso em: 08/08/2021)
- Confederação Nacional do Transporte (2021). Transporte e desenvolvimento. infraestrutura de transporte: investimento e financiamento de longo prazo. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/pesquisas> (Acesso em: 01/09/2021)
- Coradi, P. C., Oliveira, M., Carneiro, L., Souza, G., Elias, M., Brackmann, A., e Teodoro, P. (2020). Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units. *Journal of Stored Products Research*, 87, 101624. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101624>
- Costa, W. (2013). *Modelagem e caracterização das rotas de exportação da Soja*. PPGAMSA, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Cox, D. (1955). A Use of Complex Probabilities in the Theory of Stochastic Processes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 51, 313 – 319. <https://doi.org/10.1017/S0305004100030231>
- Daskin, M. (1985). Logistics: an overview of the state of the art and perspective on future research. *Transportation Research Part A*, 19(5-6), 383–398
- Daskin, M. (2013). *Network and Discrete Location, Models, Algorithms, and Applications* (2 ed.). John Willey & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118537015>

- David, R. e Alla, H. (1992). Du grafctet au réseaux de petri. *Edition Hermes*.
- de Araujo Batista Silva, A. (2020). *Modelo de otimização para localização de hospitais de campanha para COVID-19*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- de Souza, F. H. B. (2019). *Modelagem, Simulação e Análise de Desempenho da Política de Despacho para Minas a Céu Aberto*. PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Di Febbraro, A. e Sacco, N. (2004). On Modelling Urban Transportation Networks Via Hybrid Petri Nets. *Control Engineering Practice*, 12, 1225–1239. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.04.008>
- DiCesare, F., Harhalakis, G., Proth, J.-M., Silva, M., e Vernadat, F. (1993). Practice of Petri Nets in Manufacturing. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6955-4>
- DNIT (2021). Hidrovia do Tapajós - Teles Pires. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/hidrovia-do-tapajos-teles-pires> (Acesso em: 09/08/2021)
- Dotoli, M., Epicoco, N., Falagario, M., e Cavone, G. (2015). A Timed Petri Nets Model for Performance Evaluation of Intermodal Freight Transport Terminals. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13, 1–16. <https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2404438>
- Eberhardt, I. D. R. (2020). *Metodologia de Definição de Rede de Suprimentos para Armazenagem de Commodities Agrícolas*. Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- EEA (2017). Specific CO2 emissions per tonne-km and per mode of transport in Europe. Disponível em: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/specific-co2-emissions-per-tonne-2#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/specific-co2-emissions-per-tonne-2#tab-chart_1) (Acesso em: 07/06/2023)
- EEA (2021). Rail and waterborne — best for low-carbon motorised transport. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport> (Acesso em: 08/06/2023)
- EPL (2018). Plano nacional de logística PNL 2025 - Relatório Executivo. Disponível em: [https://www.ontr.epl.gov.br/html/objects/\\_downloadblob.php?cod\\_blob=5835](https://www.ontr.epl.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=5835) (Acesso em: 05/09/2021)
- EPL (2021). Plano nacional de logística PNL 2035 - Relatório Executivo. Disponível em: <https://www.gov.br/participamaisbrasil/blob/baixar/3499> (Acesso em: 03/09/2021)

- Esalq (2021). PIB do agronegócio brasileiro. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> (Acesso em: 16/09/2021)
- Fajardo, A. P. C. (2006). *Uma Contribuição ao Estudo do Transporte Intermodal – Otimização da Expansão Dinâmica das Redes Intermodais do Transporte de Soja Produzida no Estado de Mato Grosso*. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- Fao (2018). FAO participa de painel sobre a agricultura brasileira durante conferência internacional sobre fertilizantes. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1098805> (Acesso em: 07/06/2021)
- Farges, J. e Gallego, J. (1999). Stochastic p-timed petri nets and their use for traffic queue estimation. *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)*, volume 1, 829–834 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.1999.814199>
- Fatoretto, S. e Oliveira, A. (2019). A eficiência logística das rotas de exportação de soja: um indicador baseado na Análise Envoltória de Dados (DEA). *Agrarian*, 12, 383–398. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v12i45.8005>
- Fearnside, P. (2001). Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. *Environmental Conservation*, 1, 23–38
- Folha de São Paulo (2020). Asfaltada, estrada da soja impulsiona exportação, mas permanece precária. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2020/03/asfaltada-estrada-da-soja-impulsiona-exportacao-mas-permanece-precaria.shtml> (Acesso em: 03/09/2021)
- Fraunhofer-Institute for Systems and Innovation Research ISI (2020). Methodology for GHG Efficiency of Transport Modes. Disponível em: <https://cedelft.eu/publications/methodology-for-ghg-efficiency-of-transport-modes/> (Acesso em: 05/06/2023)
- Gaied, M., Lefebvre, D., Mhalla, A., e Othman, K. (2019). Identification of Railway Transport Systems using stochastic P-timed Petri nets model. *6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 1090–1095. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820468>
- Gaied, M., Lefebvre, D., M'halla, A., e Othmen, K. B. (2018). Modelling and Performance Evaluation of Railway transport Systems using P-timed Petri Nets. *5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 841–846. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2018.8394927>

- Garcia, B. T., Lopes, D., Leal Junior, I., Amorim, J., Silva, M., e de Almeida Guimarães, V. (2019). Analysis of the Performance of Transporting Soybeans from Mato Grosso for Export: A Case Study of the Tapajós-Teles Pires Waterway. *Sustainability*, 11, 6124. <https://doi.org/10.3390/su11216124>
- Garrido, J. M. (2009). *Simulation Output Analysis*. In: *Object Oriented Simulation*, 405–409. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0516-1\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0516-1_30)
- Gazzoni, D. L. e Dall’Agnol, A. (2018). *A saga da soja: de 1050 a.C. a 2050 d.C.* Brasília, DF, Embrapa.
- Goverde, R. (2007). Railway Timetable Stability Analysis Using Max-Plus System Theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 179–201. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.003>
- Guimarães, Ribeiro, G., e Azevedo-Ferreira, M. (2018). Mapping of the Brazilian scientific publication on facility location. *Pesquisa Operacional*, 38, 307–330. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2018.038.02.0307>
- Guimarães, V. A. (2019). *Localização-alocação de Centros de Integração Logística Considerando Critérios Econômicos e Ambientais*. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- Guimarães, V. A., Ribeiro, G., Forte, V., e Lucena, A. (2017). A Location-allocation Model for Logistics Integration Centers. *International Journal of Transport Economics*, 44, 273–292. <https://doi.org/10.19272/201706702006>
- IBGE (2021). SIDRA - Banco de dados Estatístico. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/> (Acesso em: 20/02/2021)
- IMEA (2015). AgroMT 2025 Outlook. Disponível em: <https://www.imea.com.br/imea-site/view/uploads/estudos-customizados/AgroMT2025.pdf> (Acesso em: 02/09/2022)
- IMEA (2019). Outlook 2030. Disponível em: <http://hidroviaveis.com.br/wp-content/uploads/2021/10/4-Outlook-2030-IMEA.pdf> (Acesso em: 02/09/2022)
- Jesus, P. e Pereira, L. (2020). Logística agroindustrial, transportes e exportações do complexo da soja no estado de Minas Gerais, Brasil. *Revista Transporte y Territorio*, 22. <https://doi.org/10.34096/rtt.i22.6658>
- Kamali, F. P., Meuwissen, M., Boer, I., Middelaar, C., Moreira, A., e Oude Lansink, A. (2016). Evaluation of the environmental, economic, and social performance of soybean farming systems in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.135>



- Kelton, D., Sadowski, R., e Sturrock, D. (2002). *Simulation With Arena*. Boston: McGraw-Hill.
- Kussano, M. e Batalha, M. (2012). Custos logísticos agroindustriais: avaliação do escoamento da soja em grão do Mato Grosso para o mercado externo. *Gestão & Produção*, 19, 619–632. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2012000300013>
- Laftit, S. (1991). Graphes d'évènements déterministes et stochastiques : application aux systèmes de production. *Thèse de doctorat Paris*.
- Law, A. (2006). *Simulation Modeling and Analysis (McGraw-Hill Series in Industrial Engineering and Management)*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Lemos, K. (2020). Transporte aquaviário DAQ/DNIT. Disponível em: [https://www.ep1.gov.br/html/objects/\\_downloadblob.php?cod\\_blob=7382](https://www.ep1.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=7382) (Acesso em: 03/08/2021)
- Lisboa, A., Souza, F., Ribeiro, C., Maia, C., Saldanha, R., Castro, F., e Vieira, D. (2019). On modelling and simulating open pit mine through stochastic timed petri nets. *IEEE Access*, PP, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934718>
- Liu, X., Bai, Y., e Chen, J. (2017). An intermodal transportation geospatial network modeling for containerized soybean shipping. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2017.05.001>
- Lopes, H. e Lima, R. (2017). Alternatives for the soybean exportation in Brazil: A cost based analysis for transport via the Tocantins-Araguaia waterway. *Custos e Agronegocio*, 13, 239–261.
- Lopes, H., Lima, R., e Leal, F. (2020). Simulation Project for Logistics of Brazilian Soybean Exportation. *International Journal of Simulation Modelling*, 19, 571–582. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM19-4-529>
- Lopes, H., Lima, R., Leal, F., e Nelson, A. (2017). Scenario analysis of Brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of Mato Grosso State. *Research in Transportation Business & Management*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.09.002>
- Luc, D. (2015). *Multiobjective linear programming: An introduction*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21091-9>
- Maia, C. (2022). Stochastic timed discrete-event systems: Modular modeling and performance evaluation through markovian jumps. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213697>

- Maia, C., Andrade, C., e Hardouin, L. (2011). On the control of max-plus linear system subject to state restriction. *Automatica*, 47, 988–992. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.01.047>
- Maia, C. A. (2021). *Sistemas a eventos discretos: Modelos básicos*. Departamento de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia - UFMG.
- Mako, P., Dávid, A., Bohm, P., e Savu, S. (2021). Sustainable transport in the danube region. *Sustainability*, 13, 6797. <https://doi.org/10.3390/su13126797>
- Marie, R. (2011). Disappointments and delights, fears and hopes induced by a few decades in performance evaluation. *Perf. Eval. of Comp. and Communication Systems. Milestones and Future Challenges*. Springer, 17, 1–9. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25575-5>
- Martins, E. (1984). On a special class of bicriterion path problems. *European Journal of Operational Research*, 17, 85–94. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(84\)90011-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(84)90011-0)
- Martins, F. F. (2012). *Cabotagem como Alternativa no Transporte Doméstico de Cargas: Uma Avaliação Hierárquica de seus Entraves*. IME - Instituto Militar de Engenharia.
- Martins, M. F. (2017). *Introdução à programação linear multiobjetivo*. Universidade de Coimbra - PT.
- Melo, I. C., Júnior, P. N. A., Perico, A. E., Guzman, M. G. S., e Rebelatto, D. A. N. (2018). Benchmarking de corredores e rotas de transporte de mercadorias com análise de envelope de dados (DEA). *Benchmarking: An International Journal*, 25, 713–742. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2016-0175>
- Microsoft (2020). Microsoft Bing Maps Platform APIs Terms of Use. Disponível em: <https://www.microsoft.com/en-us/maps/product> (Acesso em: 05/03/2021)
- Minfra (2021). Novos projetos ferroviários. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/novos-projetos-ferroviarios> (Acesso em: 20/09/2021)
- Ministério da Infraestrutura (2021). Tarcísio sobre investimentos em infraestrutura no Mato Grosso: "Este estado merece logística". *Assessoria Especial de Comunicação*. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/noticias/tarcisio-sobre-investimentos-em-infraestrutura-no-mato-grosso/-este-estado-merece-logistica> (Acesso em: 03/10/2021). Notícias do Ministério da infraestrutura
- Monteiro, M., Brisola, M., Leitão, F., e Silva, W. (2021). Limitações e problemas no transporte da soja no Brasil. *Informe GEPEC*, 25, 261–283. <https://doi.org/10.48075/igepec.v25i1.25650>

- Morais, A. e Maia, C. (2023). Modelling and closed-loop control of admissions in a vaccination center through tropical algebra. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 34. <https://doi.org/10.1007/s40313-023-01004-6>
- Morais, G., Calil, Y., Oliveira, G., e Maia, C. (2023). A sustainable location model of transshipment terminals applied to the expansion strategies of the soybean intermodal transport network in the state of mato grosso, brazil. *Sustainability*, 15, 1063. <https://doi.org/10.3390/su15021063>
- Morales, P. R. G. D., D'Agosto, M. d. A., e Souza, C. D. R. (2013). Otimização de rede intermodal para o transporte de soja do norte do mato grosso ao porto de santarém. *Journal of Transport Literature*, 7(2), 29–51.
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541–580.
- MVO (2011). Fact sheet soy. Disponível em: [https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Culture-plantes-alimentaires/FICHES\\_PLANTES/soja/MVO-Fact\\_sheet\\_Soy-2011.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Culture-plantes-alimentaires/FICHES_PLANTES/soja/MVO-Fact_sheet_Soy-2011.pdf) (Acesso em: 19/07/2021)
- Nascimento, A. P. d. (2008). Hidrovias: uma aposta para o futuro. Disponível em: <https://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/2-hidrovias-uma-aposta-para-o-futuro/> (Acesso em: 01/09/2021)
- Nemethy, S., Ternell, A., Bornmalm, L., Lagerqvist, B., e Szemethy, L. (2022). Environmental viability analysis of connected european inland–marine waterways and their services in view of climate change. *Atmosphere*, 13, 951. <https://doi.org/10.3390/atmos13060951>
- OECD e FAO (2019). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028*. OECD Publishing, Paris. [https://doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2019-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2019-en)
- OECD e FAO (2021). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/19428846-en>
- Oliveira, A. e Cicolin, L. (2016). Evaluating the logistics performance of brazil's corn exports: A proposal of indicators. *African Journal of Agricultural Research*, 11, 693–700. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10653>
- Oliveira, A., Filassi, M., Lopes, R., e Braga Marsola, K. (2020a). Logistical transportation routes optimization for Brazilian soybean: an application of the origin-destination matrix. *Ciência Rural*, 51. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190786>

- Oliveira, A. e Yamakami, A. (2006). Modelo de programação quadrática para análise da movimentação logística e comercialização da soja brasileira. *Engenharia Agrícola*, 26. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000200025>
- Oliveira, G. F. (2021). *Alocação e Dimensionamento de Terminais de Transbordo de Soja no Estado do Mato Grosso via Otimização e Simulação em Rede de Petri P-Temporizada*. PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Oliveira, G. F., Morais, G. R., e Saldanha, R. R. (2020b). Brazilian Soybean Logistics Bottleneck: A Proposal for Allocation and Dimensioning of Intermodal Terminals in the State of Mato Grosso. *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*. Austin-Texas, USA.
- Oliveira, G. L. T. e Schneider, M. (2016). The politics of flexing soybeans: China, Brazil and global agroindustrial restructuring. *The Journal of Peasant Studies*, 43(1), 167–194. <https://doi.org/10.1080/03066150.2014.993625>
- PAM e IBGE (2020). PAM - Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e> (Acesso em: 02/09/2021)
- Panagakos, G. (2016). *Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions*, volume 226, (Chapter Green Corridors Basics, 81–121). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_3)
- Pang, C. e Le, K. C. V. (2014). Optimization of Total Energy Consumption in Flexible Manufacturing Systems Using Weighted P-Timed Petri Nets and Dynamic Programming. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11. <https://doi.org/10.1109/TASE.2013.2265917>
- Pasin, J. (2007). A logística de exportação da soja em grãos de Mato Grosso. *Revista do BNDES - Rio de Janeiro*, 14(27), 195–212
- Pauli, G. (2016). *Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solutions*, (Chapter Emissions and Inland Navigation, 479–515). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_14)
- Pera, T., Bartholomeu, D., Su, C., e Caixeta-Filho, J. (2019). Evaluation of green transport corridors of Brazilian soybean exports to China. *International Journal of Operations & Production Management*, 16, 398–412. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a4>

- Pera, T., Caixeta-Filho, J., e Salin, D. (2021). Brazil Modal Share Analysis for Corn and Soybeans: 2010-19. *University of São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Brazil (ESALQ/USP)*. <https://doi.org/10.9752/TS310.02-2021>
- Pereira, C. S. e Hespanhol, A. N. (2015). Região e regionalizações no Estado de Minas Gerais e suas vinculações com as políticas públicas. *Revista Formação*, 22, 42–70. <https://doi.org/10.33081/formacao.v1i22.3510>
- Pereira, L. e Ferreira, W. (2013). Redes de Transportes e Comércio Internacional: os fluxos das exportações do setor siderúrgico-metalúrgico no norte de Minas Gerais. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, 29, 64. <https://doi.org/10.5380/raega.v29i0.29752>
- Petri, C. (1962). *Communication with automata (Kommunikation mit Automaten)*. Technischen Hochschule Darmstadt.
- PlantProject (2018). Infográfico: As principais hidrovias do Brasil. Disponível em: <https://plantproject.com.br/2018/04/as-principais-hidrovias-do-brasil/> (Acesso em: 05/09/2021)
- Plaza, C. V., Ribeiro, G. M., e Bahiense, L. (2020). Localização de centros de integração logística (cil): Aplicação de uma abordagem multiperíodo considerando critérios econômicos e ambientais. *34<sup>o</sup> Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, 1724–1735.
- Pontes, H., Carmo, B., e Porto, A. (2009). Problemas Logísticos na Exportação Brasileira da Soja em Grão. *Sistemas & Gestão*, 4 (2), 155–181.
- Prata, B., Arruda, J., e Barroso, G. (2005). Movimentação otimizada de contêineres de cargas agroindustriais em pátios portuários: um modelo baseado em redes de Petri. *XII Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru-SP*.
- Profozich, D. e Sturrock, D. (1994). Introduction to SIMAN/Cinema. *Simulation Conference Proceedings, Winter*, 427–430. <https://doi.org/10.1109/WSC.1994.717223>
- Prudêncio da Silva Jr, V., van der Werf, H., Spies, A., e Soares, S. (2010). Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *Journal of environmental management*, 91, 1831–9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.001>
- Périco, A. e Silva, G. (2020). Port Performance in Brazil: A Case Study Using Data Envelopment Analysis. *Case Studies on Transport Policy*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.01.002>

- Ramamoorthy, C. e Ho, G. (1980). Performance Evaluation of Asynchronous Concurrent Systems Using Petri Nets. *IEEE Trans. Software Eng.*, 6, 440–449. <https://doi.org/10.1109/TSE.1980.230492>
- Ramchandani, C. (1974). Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri Nets. *Technical Report, n° 120, Laboratory for Computer science, MIT, Cambridge.*
- Rebelo, J. (2019). Logística de carga no brasil: “como reduzir custos logísticos e melhorar eficiência?”. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1323121030855/JorgeRebelo.pdf?resourceurlname=JorgeRebelo.pdf> (Acesso em: 01/07/2021)
- Reenberg, A. e Fenger, N. (2011). Globalizing land use transitions: The soybean acceleration. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 111, 85–92. <https://doi.org/10.1080/00167223.2011.10669524>
- Reis, S. e Leal, J. (2015). A deterministic mathematical model to support temporal and spatial decisions of the soybean supply chain. *Journal of Transport Geography*, 43, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.01.005>
- Ribeiro, C. M. (2015). *Modelagem e Simulação de Sistemas a Eventos Discretos via Redes de Petri Estocásticas: Aplicação em Mineração*. PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Ribeiro, R. G. (2018). *Performance evaluation of stochastic DES through analytical models and simulation: an open-pit mine study*. PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.
- Rocha, F. V. e Filho, J. V. C. (2018). Ferrogrão: Impactos Econômicos e a Localização Ótima do Terminal de Transbordo. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, vol. 10, 108–127. <https://doi.org/10.4322/P0Des.2018.008>
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., e Slack, B. (2020). *The Geography of Transport Systems* (fifth edition ed.). New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429346323>
- Rosito, T. (2020). Bases para uma estratégia de longo prazo do brasil para china. Disponível em: <https://www.cebc.org.br/2020/11/26/bases-para-uma-estrategia-de-longo-prazo-do-brasil-para-a-china/> (Acesso em: 13/07/2021)
- Salin, D. (2023). Brazil soybean transportation. *Department of Agriculture - Agricultural Marketing Service*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.9752/TS052.06-2023>
- Salin, D. L. (2021). Soybean transportation guide - brazil 2020. *United States Department of Agriculture*. <https://doi.org/10.9752/TS048.08-2021>

- Santos, A., Sproesser, R., e Batalha, M. (2018). Exploring strategic characteristics of intermodal grain terminals: Empirical evidence from Brazil. *Journal of Transport Geography*, 66, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.11.022>
- Santos, G. (2017). Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 59, 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.06.007>
- Schaffer-Smith, D., Tomscha, S., Jarvis, K., Maguire, D., Treglia, M., e Liu, J. (2018). Network analysis as a tool for quantifying the dynamics of metacoupled systems: An example using global soybean trade. *Ecology and Society*, 23, 3. <https://doi.org/10.5751/ES-10460-230403>
- Schalch, E. (2016). *Os gargalos logísticos das principais rotas de escoamento de grãos de soja do estado do Mato Grosso: um estudo de caso do complexo portuário Miritituba-Barcarena no Pará*. FZEA, Universidade de São Paulo - USP.
- Sefaz-MT (2021). MT lidera retomada da economia brasileira com PIB de 4,1%, aponta IBGE. Disponível em: <https://www5.sefaz.mt.gov.br/-/17159934-mt-lidera-retomada-da-economia-brasileira-com-pib-de-4-1-aponta> (Acesso em: 01/09/2021)
- Seleme, R., Zattar, I. C., de Assis Silva, W., Schaker, F. R. C., e Silva de Oliveira Nery, V. F. (2017). Alternativas para melhoria de indicadores logísticos da soja brasileira com base no Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT). *Custos e Agronegócio on line*, 13.
- Sifakis, J. (1977a). Etude du comportement permanent des réseaux de Petri temporisés. *Journées AFCET sur les Réseaux de Petri, Paris*.
- Sifakis, J. (1977b). Use of Petri Nets for Performance Evaluation in Measuring Modelling and Evaluating Computer systems. *North Holland, Publ. Co.*, 75–93.
- Silva, M. e D'Agosto, M. (2013). A model to estimate the origin–destination matrix for soybean exportation in Brazil. *Journal of Transport Geography*, 26, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.08.011>
- Silva, M. e Marujo, L. (2012). Análise de modelo intermodal para escoamento da produção da soja no centro oeste brasileiro. *Journal of Transport Literature*, 6, 90–106. <https://doi.org/10.1590/S2238-10312012000300006>
- Simão, D. R. A. (2020). *Modelagem e Simulação de Sistemas a Eventos Discretos Utilizando Redes de Petri Coloridas: Uma Aplicação para o Sistema da Ferrovia Norte Sul*. PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

- Soares, L. e Dos Santos, M. (2021). Aplicação do método das p-medianas para otimização da localização dos hospitais de campanha na cidade do Rio de Janeiro em uma possível segunda onda de contágio do Covid-19. *XIII Congresso de Administração, Sociedade e Inovação - CASI*.
- Souza, R., Cremasco, C., e Filho, L. (2016). Análise dos valores de frete da soja a granel nos sistemas unimodal e multimodal de transporte. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 9, 819. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2016v9n4p819-837>
- Souza, S. e Uchôa, A. (2019). Modal ferroviário em análise comparativa de custo: Estudo de caso Manaus-Porto Velho. *UFAM Business Review - UFAMBR*, 1, 108–125. <https://doi.org/10.47357/ufambr.v1i2.6902>
- Sun, J., Wenbin, W., Tang, H., e Liu, J. (2015). Spatiotemporal patterns of non-genetically modified crops in the era of expansion of genetically modified food. *Scientific reports*, 5, 14180. <https://doi.org/10.1038/srep14180>
- U.S. Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service (2016). Brazil soybean transportation indicator reports. <https://doi.org/10.9752/TS052.05-2016>
- USDA (2017). Brazil soybean transportation. Disponível em: <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/BrazilSoybeanTransportationReport032017.pdf> (Acesso em: 08/08/2021)
- USDA (2020). Oilseeds: World markets and trade. Disponível em: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/tx31qh68h?locale=en> (Acesso em: 08/03/2021)
- van der Vorst, J., Da Silva, C., e Trienekens, J. (2007). *Agro-industrial Supply Chain Management: Concepts and Applications*. Number 17 in Agricultural management, marketing and finance occasional paper. FAO Agricultural management, Marketing and Finance.
- Vidotte Plaza, C., de Almeida Guimarães, V., Ribeiro, G., e Bahiense, L. (2020). Economic and environmental location of logistics integration centers: the brazilian soybean transportation case. *TOP*, 28. <https://doi.org/10.1007/s11750-020-00566-x>
- Vieira Filho, J. E. (2019). *Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) - Rio de Janeiro.
- Wang, J. (1998). *Timed Petri nets: Theory and application*, volume 9. Springer Science & Business Media.



- Wanke, P. F. (2013). Physical infrastructure and shipment consolidation efficiency drivers in Brazilian ports: A two-stage network-DEA approach. *Transport Policy*, 29, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.05.004>
- Wanke, P. F. e Fleury, P. F. (2006). *Transporte de cargas no Brasil: estudo exploratório das principais variáveis relacionadas aos diferentes modais e às suas estruturas de custos*. In: DE NEGRI, J. A.; KUBOTA, L. C. (Org.). *Estrutura e Dinâmica do Setor de Serviços no Brasil*. Brasília: IPEA.
- William, W., Dahl, B., e Hertsgaard, D. (2019). Soybean Quality Differentials, Blending, Testing and Spatial Arbitrage. *Journal of Commodity Markets*, 18, 100095. <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2019.100095>
- Zimmer, Y. e Marques, G. (2021). Energy Cost to produce and transport Crops – The Driver for Crop Prices? Case study for Mato Grosso, Brazil. *Energy*, 225, 120260. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120260>
- Zucchi, J., Zeng, A., e Caixeta-Filho, J. (2011). Optimum location for export-oriented slaughterhouses in Mato Grosso, Brazil: A dynamic mathematical model. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 14, 135–148. <https://doi.org/10.1080/13675567.2011.608653>

## APÊNDICE A – Modelos e parâmetros da rede de Petri

### A.1 Modelos e parâmetros da rede de Petri P-temporizada estocástica utilizados nos cenários

A seguir, são apresentadas as figuras ilustrativas das redes de Petri utilizadas para simular cada cenário bem como seus parâmetros, de forma a melhorar a compreensão dos SEDs abordados neste estudo.

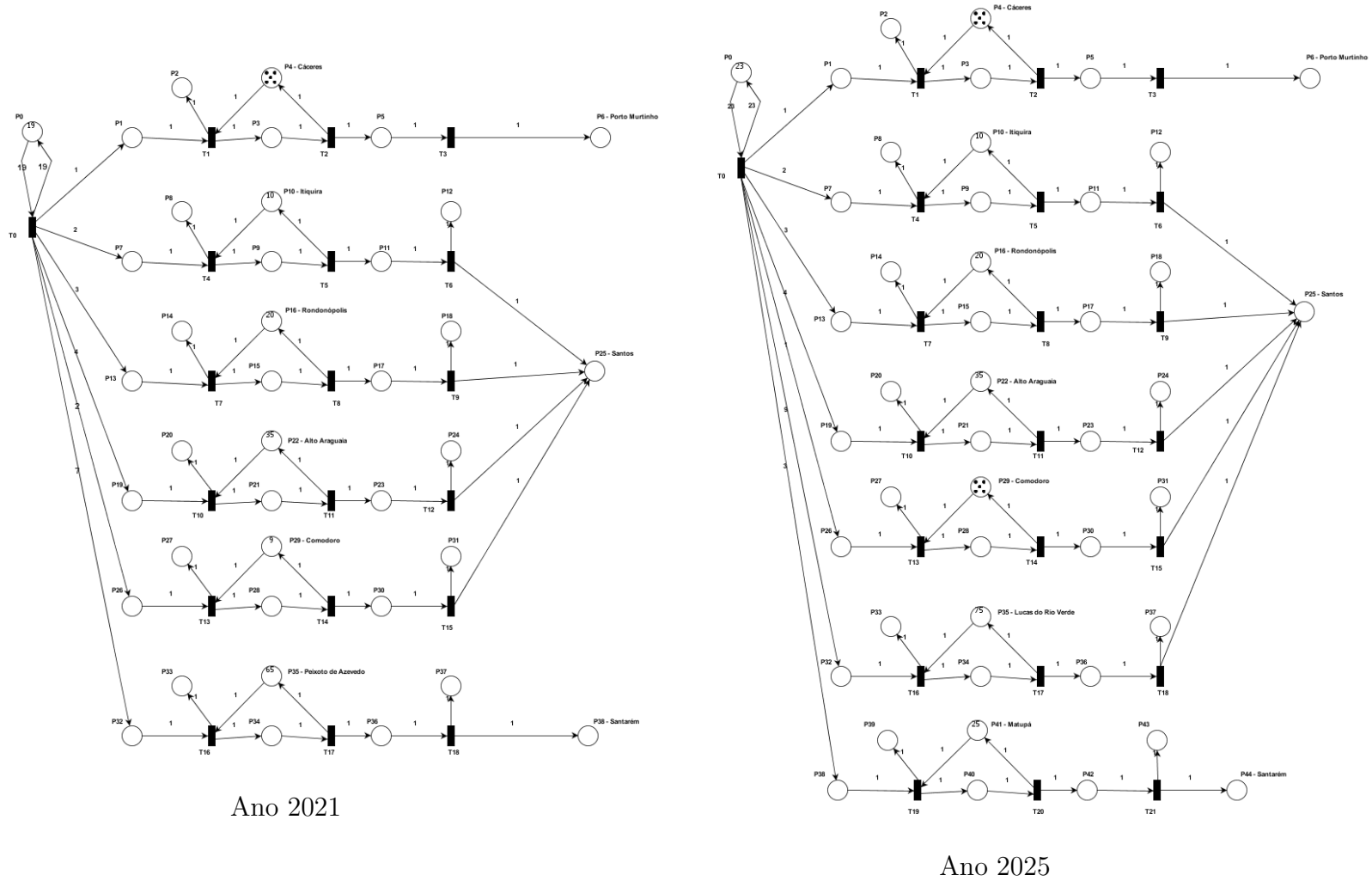


Figura 86 – Modelo de rede de Petri do cenário 1a para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 89 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2021 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2021             | 2021         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | expo(0,9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.51)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.51)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6/2)  |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 9                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6/2)  |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.8/7)  |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 65               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.8/7)  |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 90 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1a para o ano de 2025 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2025             | 2025         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 23               | expo(0,9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.53)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.53)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6)    |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)    |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/9) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 75               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.84/9) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.3/3)  |
| P39   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P40   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P41   | Capacidade do terminal                             | 25               | 1            |
| P42   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.3/3)  |
| P43   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P44   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

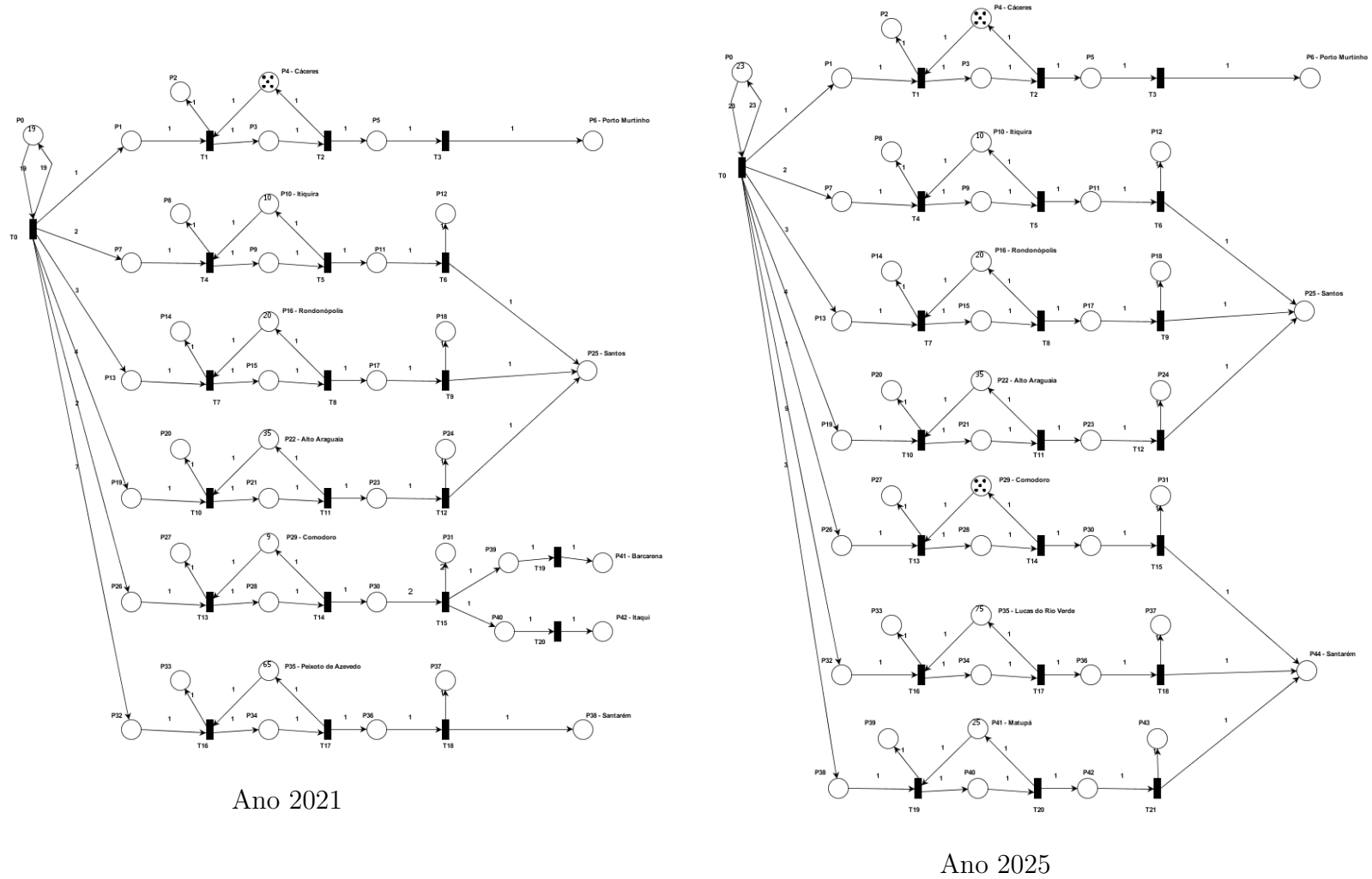


Figura 87 – Modelo de rede de Petri do cenário 1b para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 91 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1b para o ano de 2021 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2021             | 2021         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | expo(0.9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.51)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.51)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6/2)  |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 9                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6/2)  |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.8/7)  |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 65               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.8/7)  |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P39   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)    |
| P40   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)    |
| P41   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P42   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 92 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1b para o ano de 2025 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2025             | 2025         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 23               | expo(0,9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.53)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.53)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6)    |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)    |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/9) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 75               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.84/9) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.3/3)  |
| P39   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P40   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P41   | Capacidade do terminal                             | 25               | 1            |
| P42   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.3/3)  |
| P43   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P44   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor



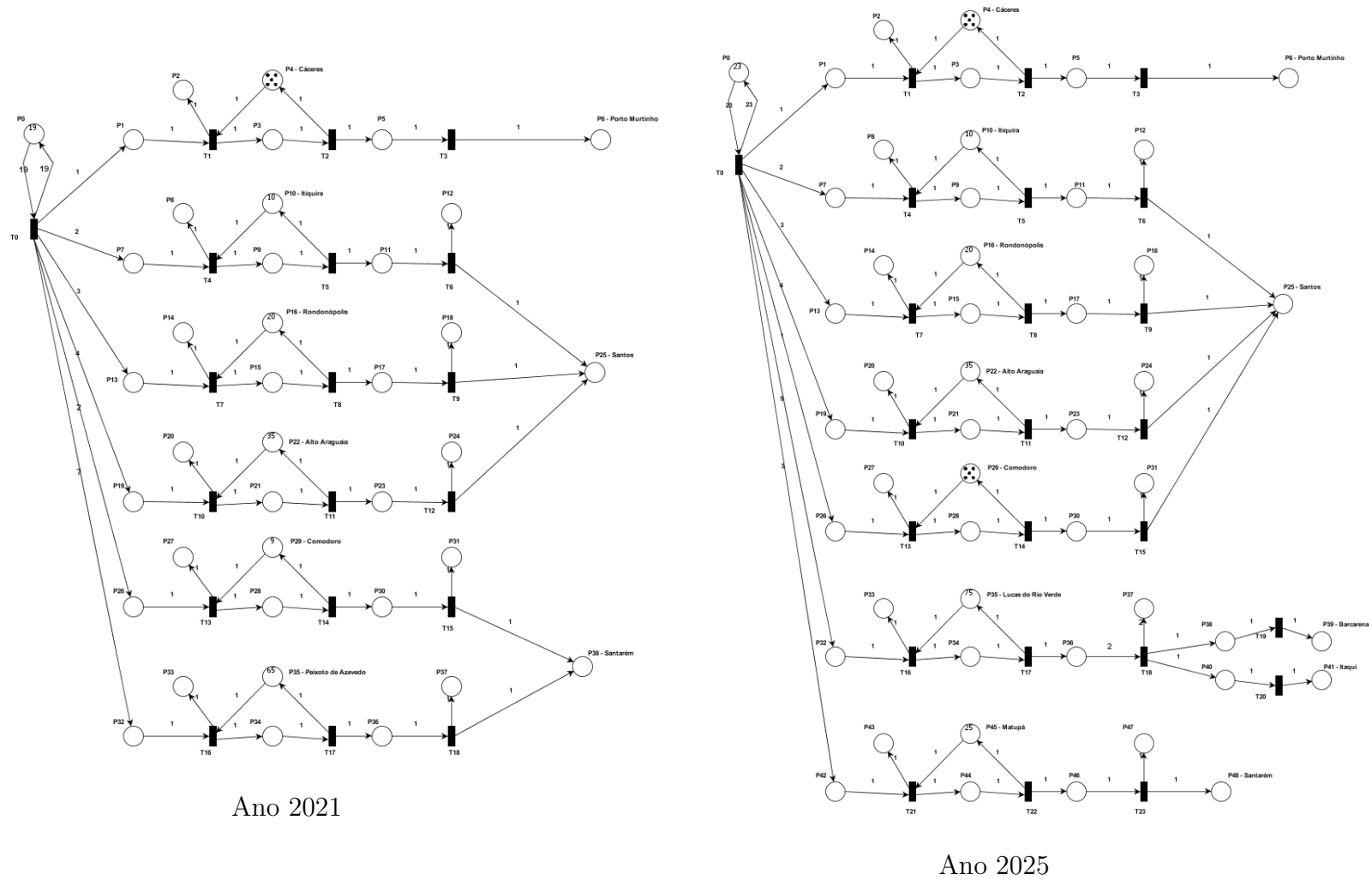


Figura 88 – Modelo de rede de Petri do cenário 1c para os anos de 2021 e 2025 - 100% ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 93 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1c para o ano de 2021 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização |
|-------|--|------------------|--------------|
|       |  | 2021             | 2021         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | expo(0,9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.51)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.51)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6/2)  |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 9                | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6/2)  |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.8/7)  |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0            |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)    |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 65               | 1            |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.8/7)  |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0            |
| P38   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 94 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 1c para o ano de 2025 - 100% ferroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial | Temporização   |
|-------|--|------------------|----------------|
|       |  | 2025             | 2025           |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 23               | expo(0.9)      |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.53)     |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 1              |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.53)     |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0              |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.5/2)    |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 1              |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.5/2)    |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.13/3)   |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 1              |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.13/3)   |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.86/4)   |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 1              |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.86/4)   |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0              |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(1.6)      |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 1              |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.6)      |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/9)   |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 75               | 1              |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(0.84/9)   |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P38   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/4.5) |
| P39   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0              |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | expo(0.84/4.5) |
| P41   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0              |
| P42   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.3/3)    |
| P43   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P44   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | norm(6,2)      |
| P45   | Capacidade do terminal                             | 25               | 1              |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | expo(1.3/3)    |
| P47   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0              |
| P48   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0              |

Fonte: Elaborado pelo autor

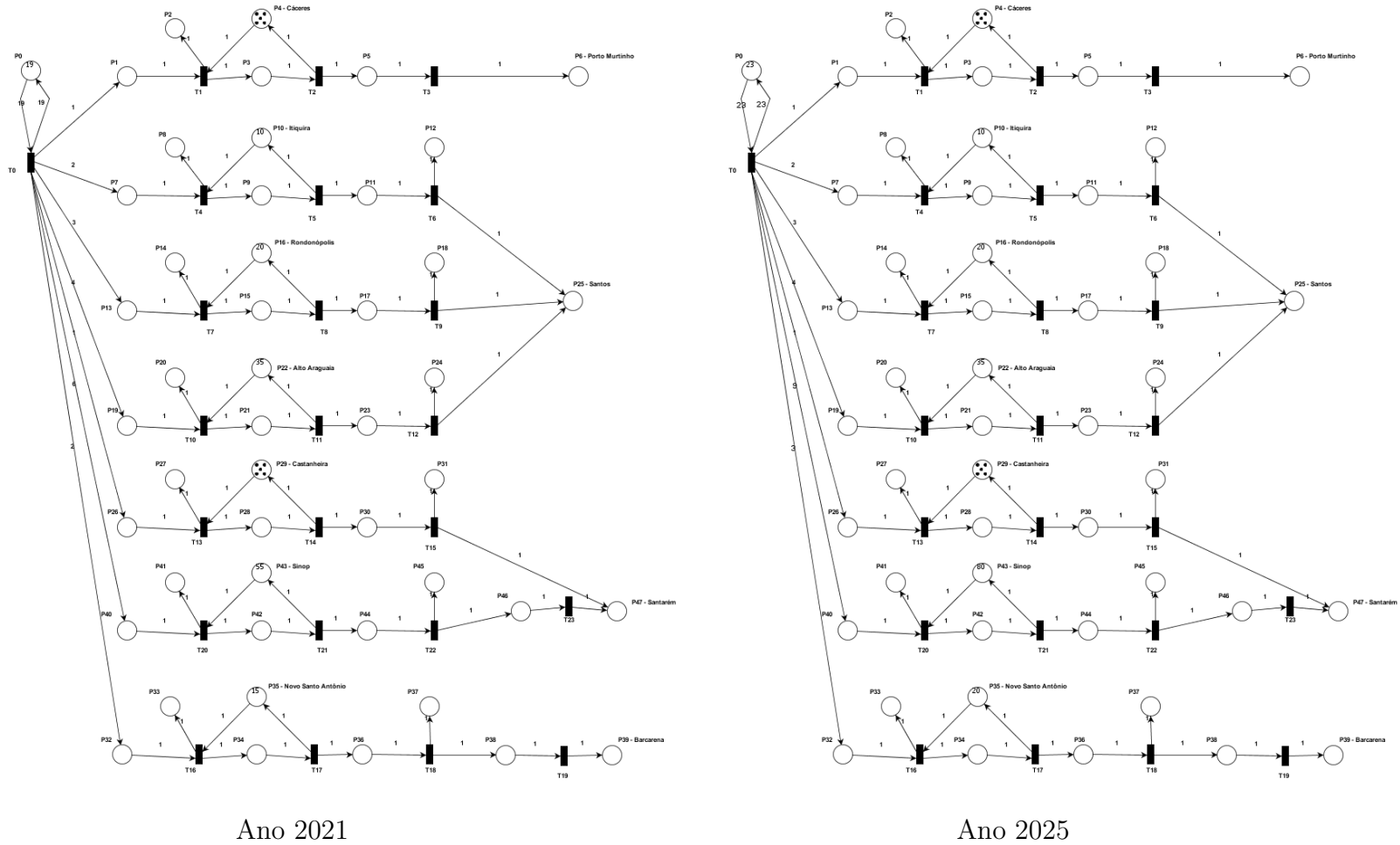


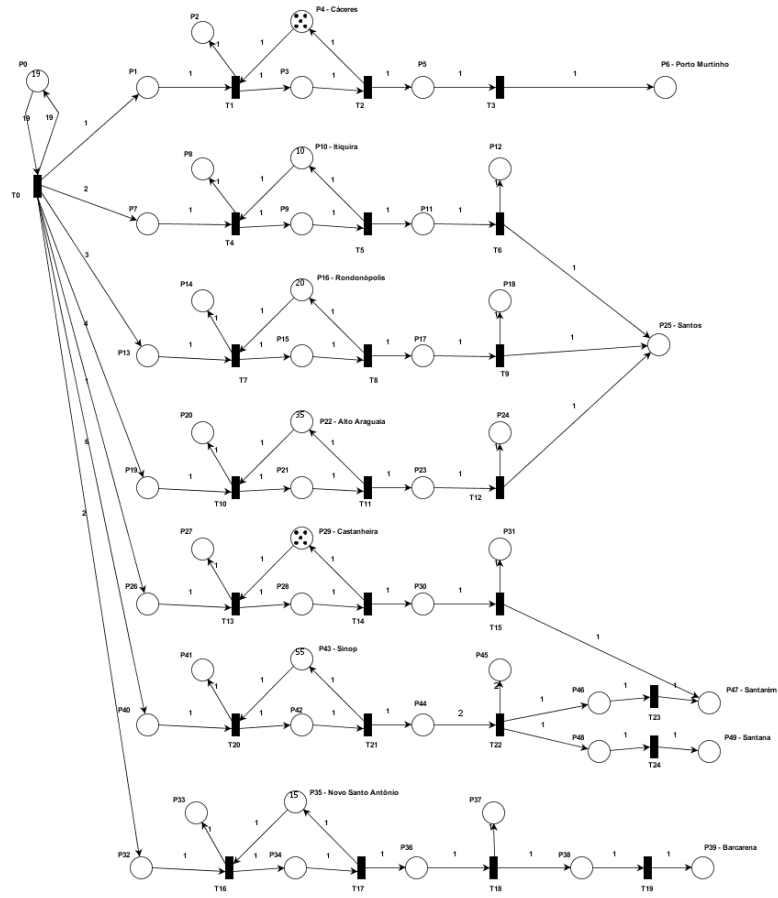
Figura 89 – Modelo de rede de Petri do cenário 2a para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

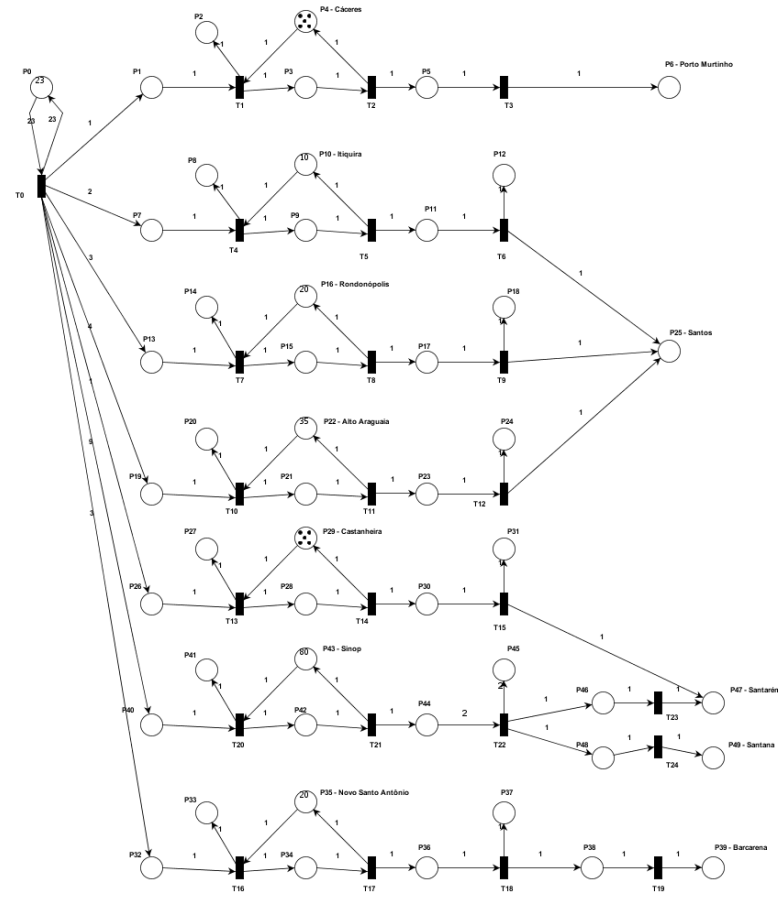
Tabela 95 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 2a para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |             |
|-------|--|------------------|------|--------------|-------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025        |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)   |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1           |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1           |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1           |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1           |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P41   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P42   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P43   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1           |
| P44   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P45   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P47   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |

Fonte: Elaborado pelo autor



Ano 2021



Ano 2025

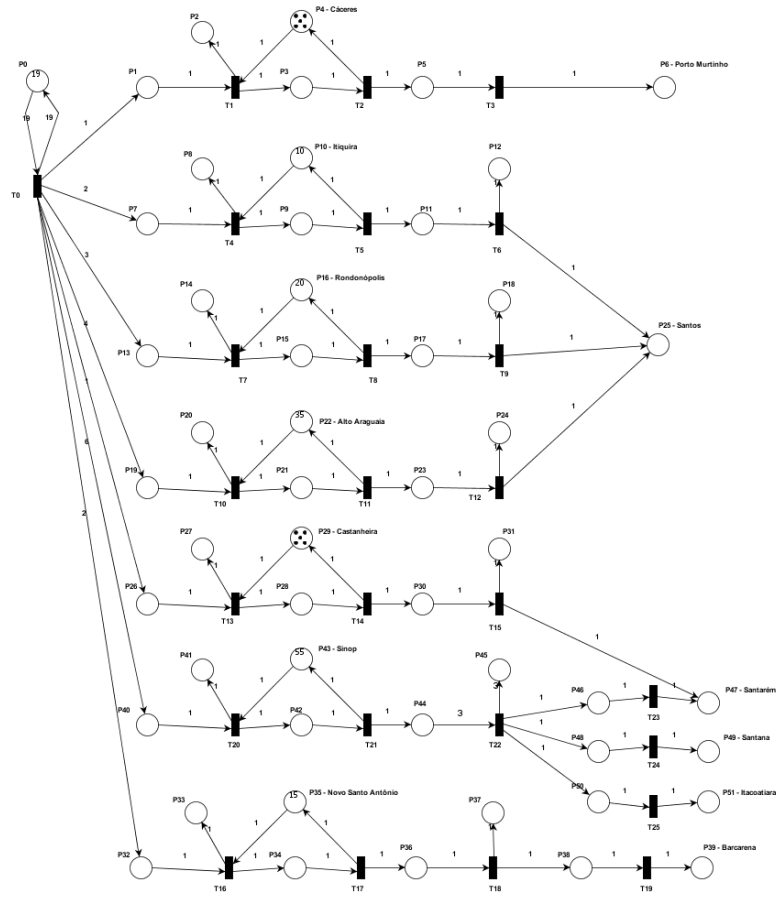
Figura 90 – Modelo de rede de Petri do cenário 2b para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

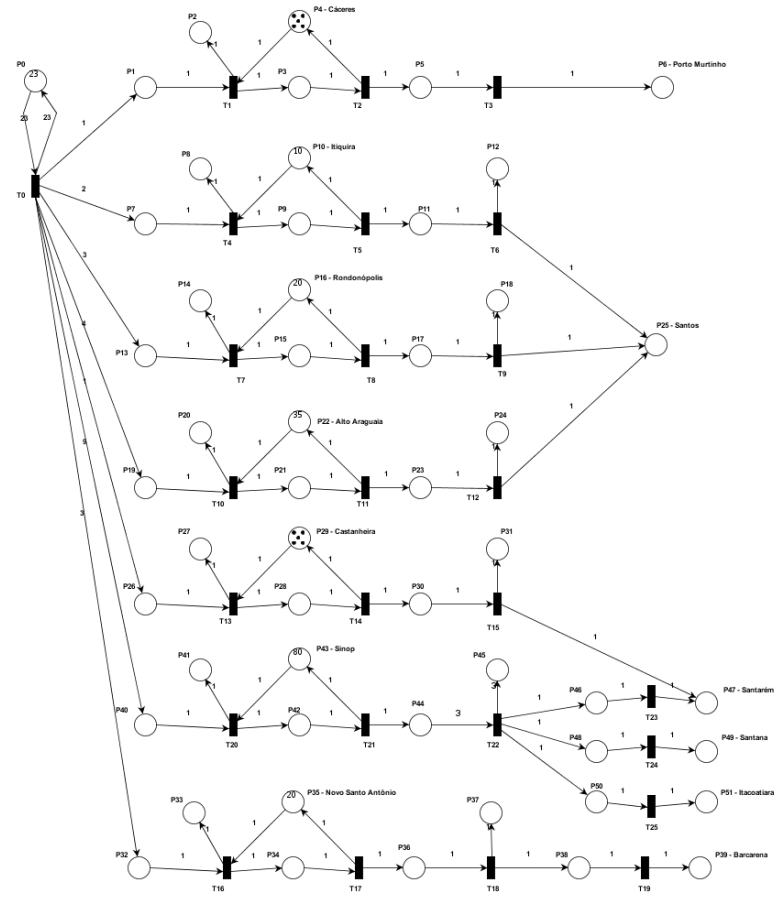
Tabela 96 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 2b para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |               |
|-------|--|------------------|------|--------------|---------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025          |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)     |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)     |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)     |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2)   |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1             |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2)   |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1             |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1             |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1             |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9)   |
| P41   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P42   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P43   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1             |
| P44   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9)   |
| P45   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/3)  | expo(0.8/4.5) |
| P47   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/3)  | expo(0.8/4.5) |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |

Fonte: Elaborado pelo autor



Ano 2021



Ano 2025

Figura 91 – Modelo de rede de Petri do cenário 2c para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor



Tabela 97 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 2c para os anos de 2021 e 2025 - 100% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |             |
|-------|--|------------------|------|--------------|-------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025        |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)   |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1           |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1           |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1           |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1           |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P41   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P42   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P43   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1           |
| P44   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P45   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.8/3) |
| P47   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.8/3) |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P50   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.8/3) |
| P51   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |

Fonte: Elaborado pelo autor

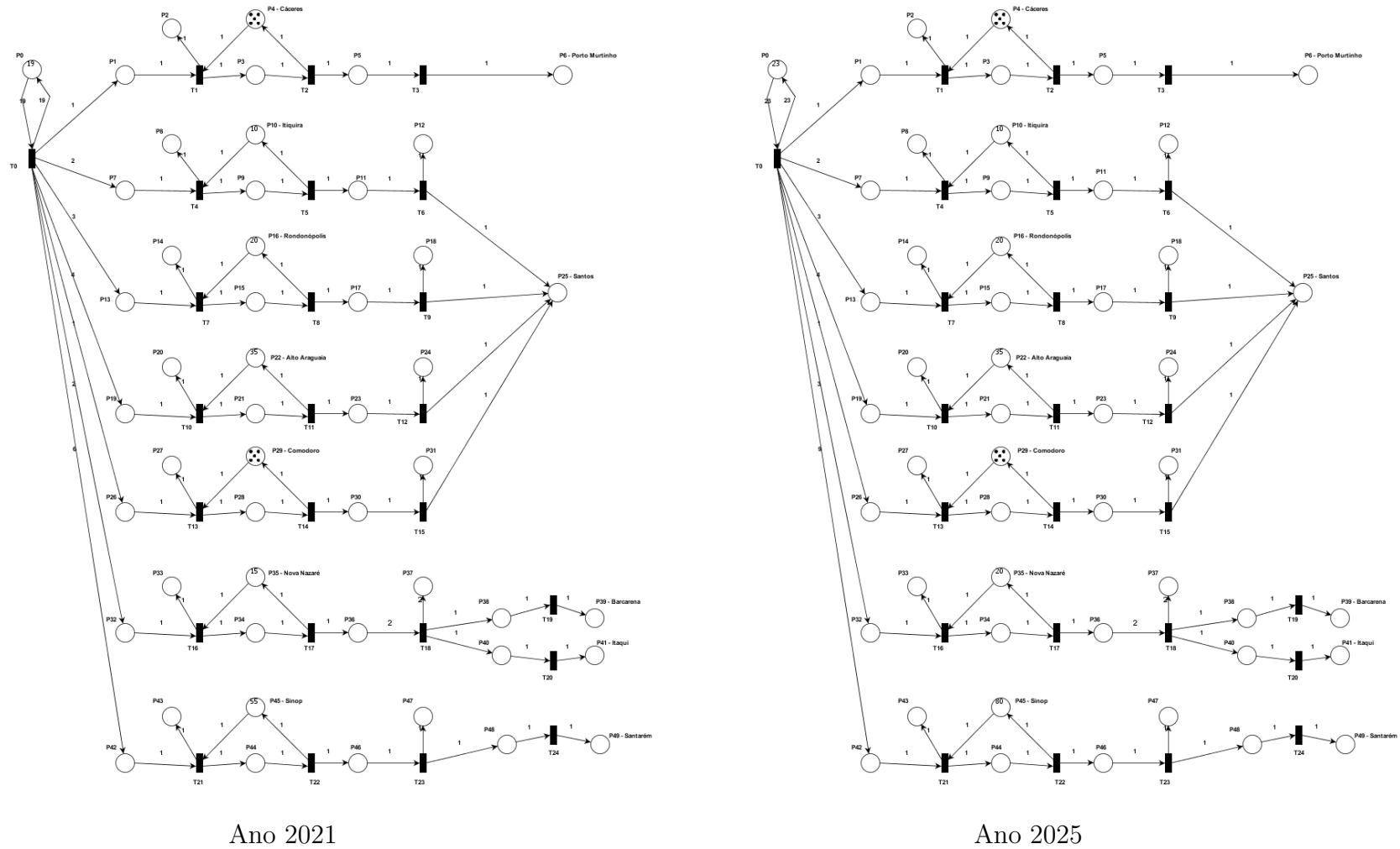


Figura 92 – Modelo de rede de Petri do cenário 3a para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 98 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 3a para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |               |
|-------|--|------------------|------|--------------|---------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025          |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)     |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.9)    | expo(1.5)     |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.9)    | expo(1.5)     |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.6)     |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1             |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.6)     |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1             |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2/4)  | norm(6,2)     |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1             |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1             |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1)      | expo(1.1/1.5) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P40   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1)      | expo(1.1/1.5) |
| P41   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P42   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P43   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P44   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P45   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1             |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P47   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |

Fonte: Elaborado pelo autor

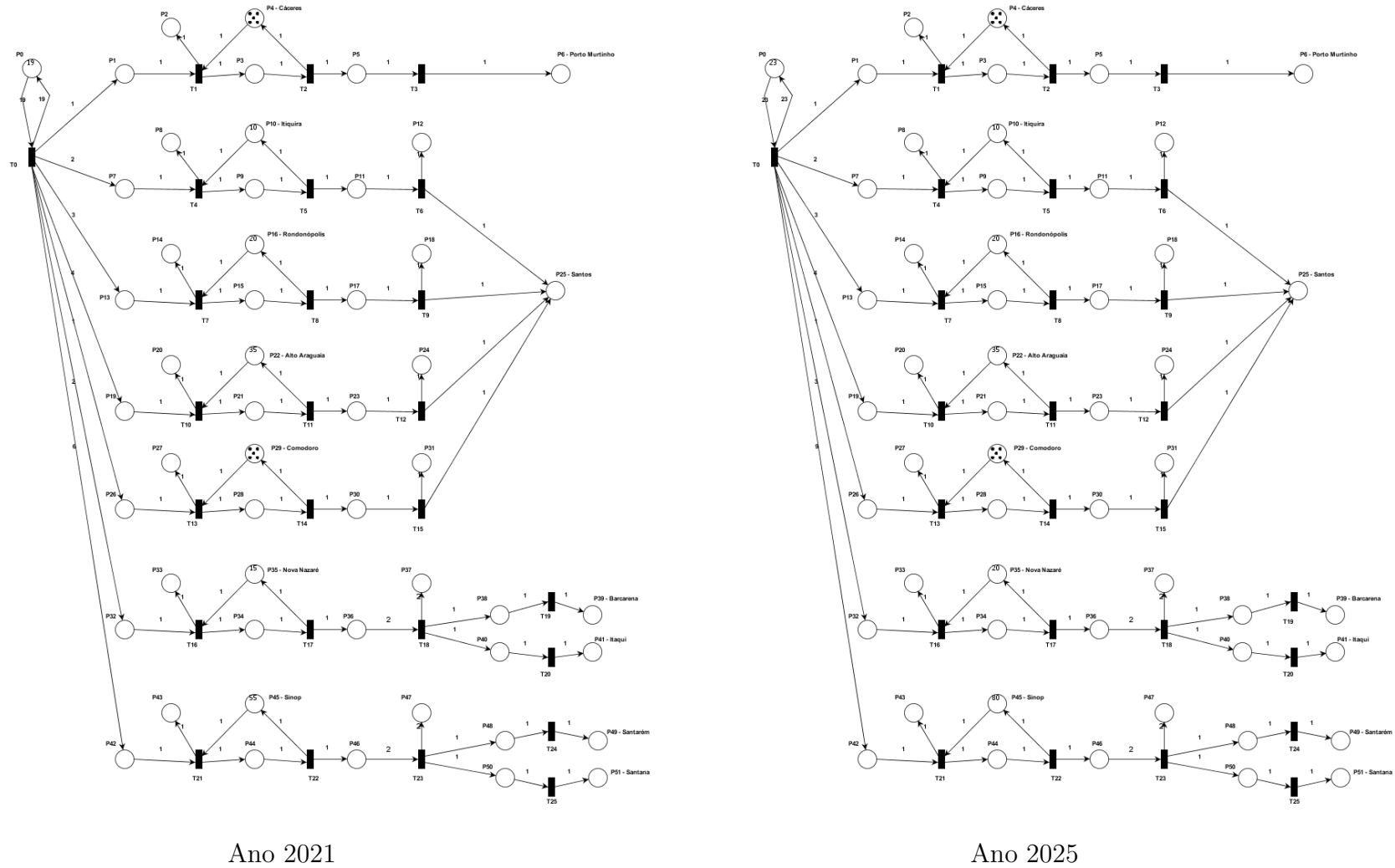


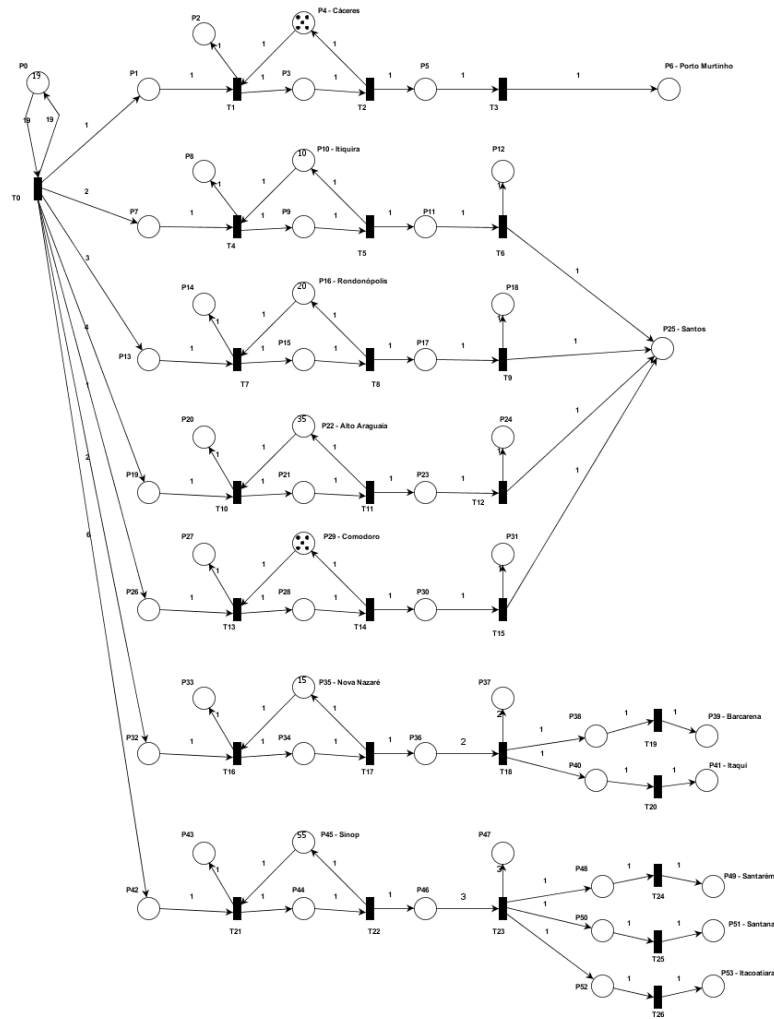
Figura 93 – Modelo de rede de Petri do cenário 3b para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

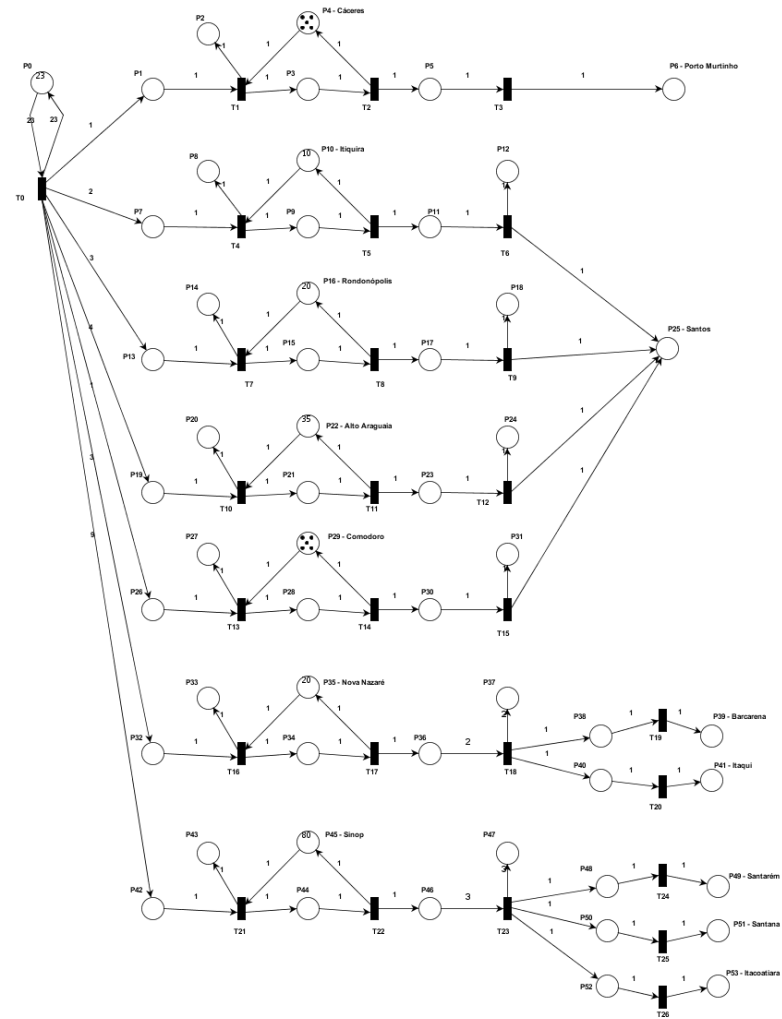
Tabela 99 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 3b para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |               |
|-------|--|------------------|------|--------------|---------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025          |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)     |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.9)    | expo(1.5)     |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.9)    | expo(1.5)     |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5/2)  | expo(1.6/2)   |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1             |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5/2)  | expo(1.6/2)   |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1             |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1             |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1             |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1)      | expo(1.1/1.5) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P40   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1)      | expo(1.1/1.5) |
| P41   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P42   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P43   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P44   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P45   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1             |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P47   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/3)  | expo(0.9/4.5) |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P50   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/3)  | expo(0.9/4.5) |
| P51   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |

Fonte: Elaborado pelo autor



Ano 2021



Ano 2025

Figura 94 – Modelo de rede de Petri do cenário 3c para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 100 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 3c para os anos de 2021 e 2025 - 50% ferroviário e 50% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |               |
|-------|--|------------------|------|--------------|---------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025          |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)     |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.9)    | expo(1.5)     |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.9)    | expo(1.5)     |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5/2)  | expo(1.6/2)   |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1             |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5/2)  | expo(1.6/2)   |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1             |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1             |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1             |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1)      | expo(1.1/1.5) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P40   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1)      | expo(1.1/1.5) |
| P41   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P42   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P43   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P44   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P45   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1             |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.9/9)   |
| P47   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.9/3)   |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P50   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.9/3)   |
| P51   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P52   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.9/3)   |
| P53   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |

Fonte: Elaborado pelo autor

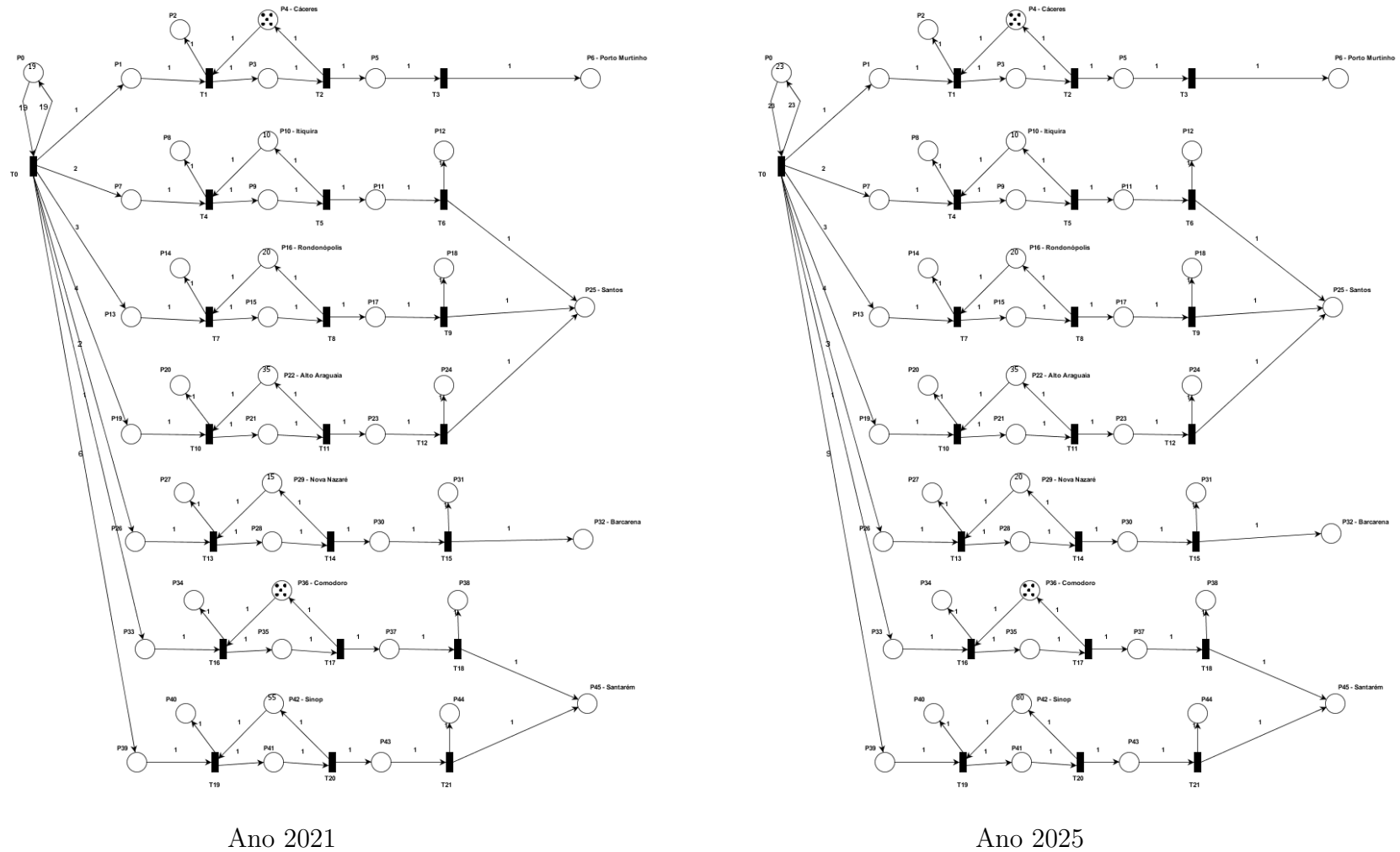


Figura 95 – Modelo de rede de Petri do cenário 4 para os anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor



Tabela 101 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 4 para os anos de 2021 e 2025 - 75% ferroviário e 25% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |              |
|-------|--|------------------|------|--------------|--------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025         |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)    |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.67)   | expo(1.51)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1            |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.67)   | expo(1.51)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2)  |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1            |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2)  |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)  |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1            |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)  |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.85/4) | expo(0.8/4)  |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1            |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.85/4) | expo(0.8/4)  |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.14/3) |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1            |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.14/3) |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P32   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P33   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.7)    |
| P34   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P35   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P36   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1            |
| P37   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.7)    |
| P38   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P39   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9)  |
| P40   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P41   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)    |
| P42   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1            |
| P43   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9)  |
| P44   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0            |
| P45   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0            |

Fonte: Elaborado pelo autor

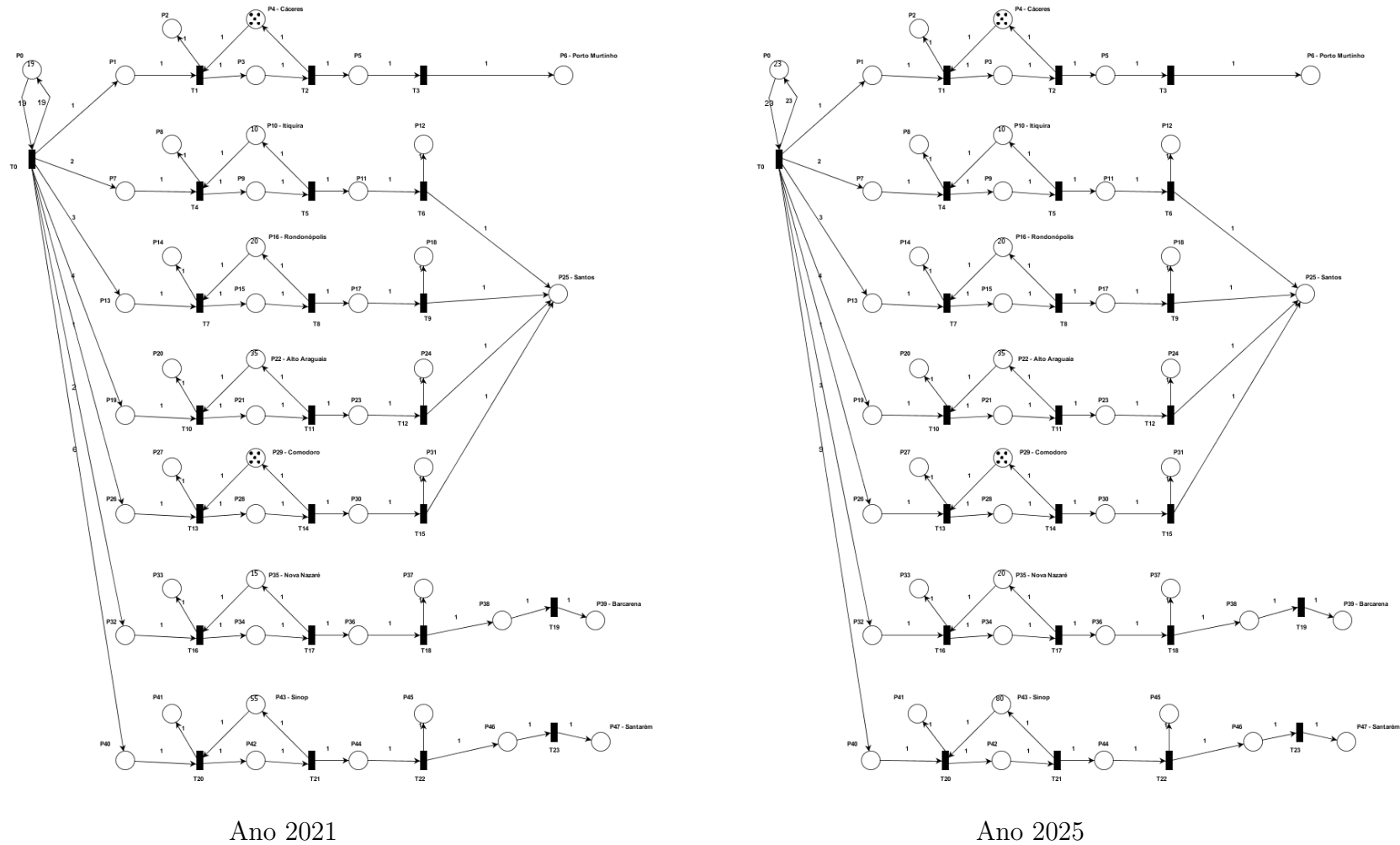


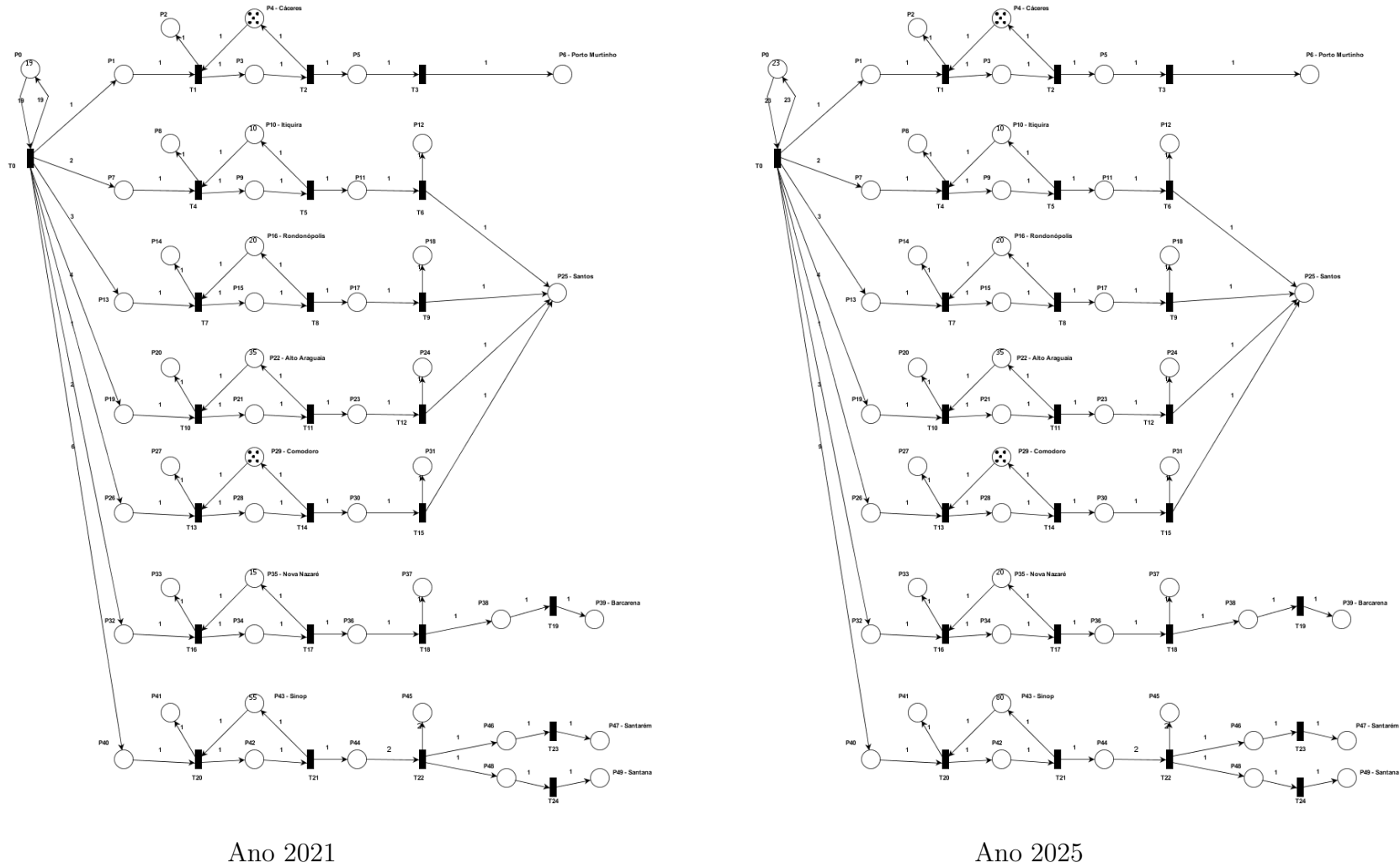
Figura 96 – Modelo de rede de Petri do cenário 5a para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 102 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 5a para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |             |
|-------|--|------------------|------|--------------|-------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025        |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)   |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1           |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1           |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1           |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1           |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P41   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P42   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P43   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1           |
| P44   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P45   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P47   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |

Fonte: Elaborado pelo autor



Ano 2021

Ano 2025

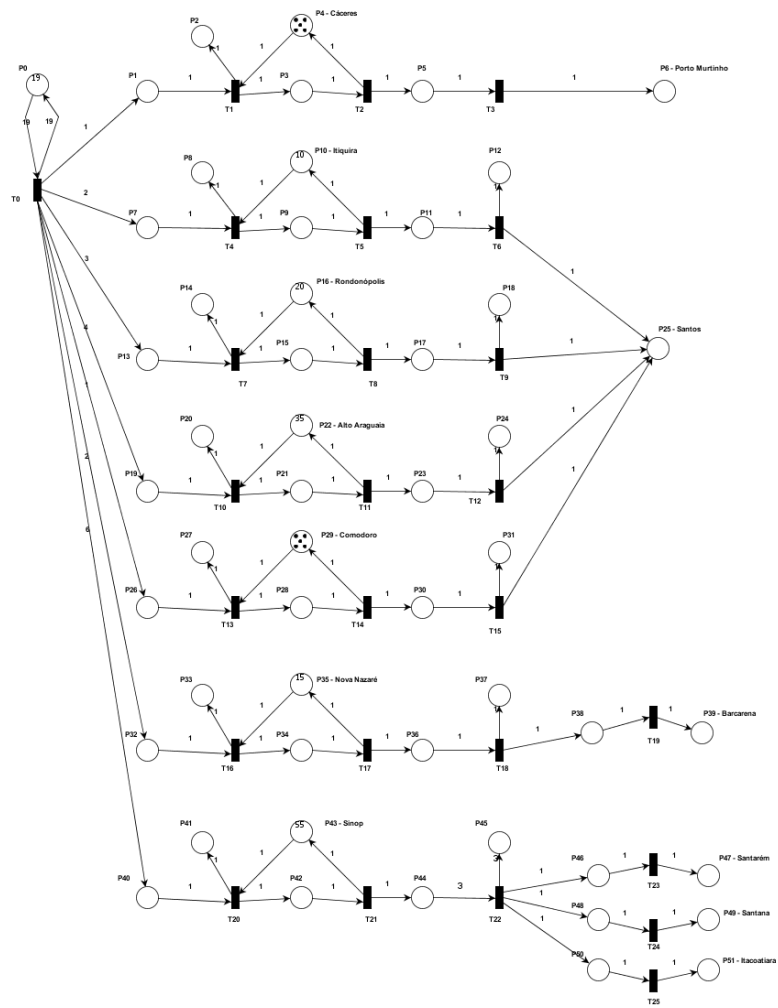
Figura 97 – Modelo de rede de Petri do cenário 5b para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

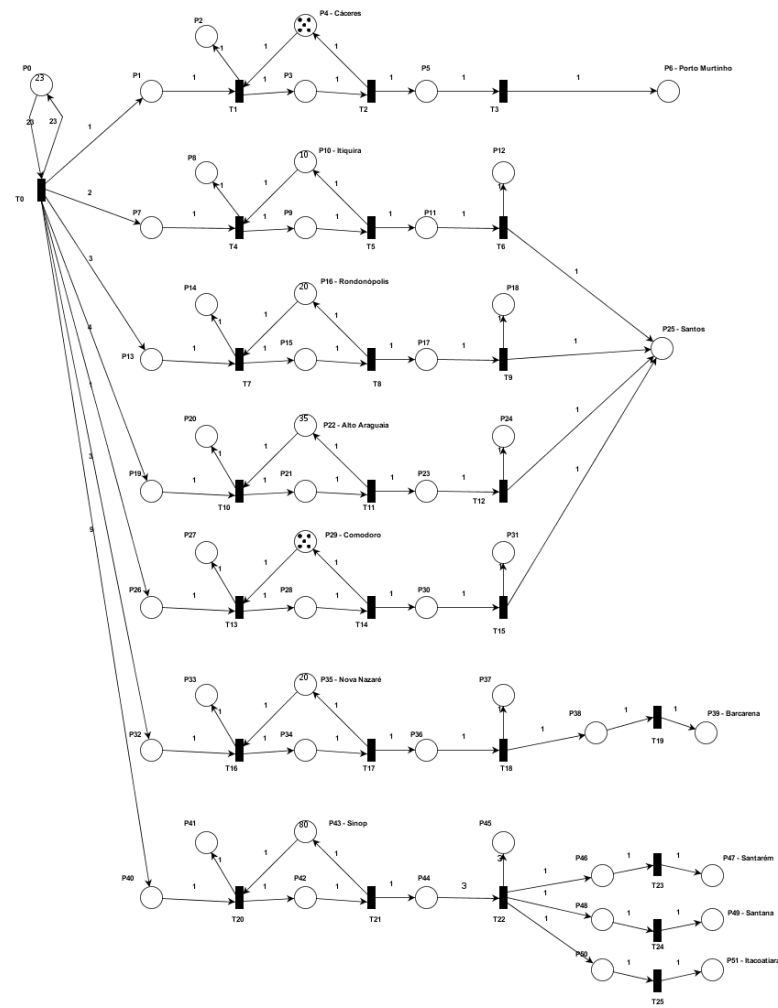
Tabela 103 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 5b para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |               |
|-------|--|------------------|------|--------------|---------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025          |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)     |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)     |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)     |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2)   |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1             |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2)   |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1             |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3)   |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1             |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4)   |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1             |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)     |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1             |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3)   |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9)   |
| P41   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P42   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)     |
| P43   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1             |
| P44   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9)   |
| P45   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/3)  | expo(0.8/4.5) |
| P47   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/3)  | expo(0.8/4.5) |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0             |

Fonte: Elaborado pelo autor



Ano 2021



Ano 2025

Figura 98 – Modelo de rede de Petri do cenário 5c para os anos de 2021 e 2025 - 25% ferroviário e 75% hidroviário

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 104 – Parâmetros do modelo da rede de Petri P-temporizada estocástica do cenário 5c para os anos de 2021 e 2025 - 25%ferroviário e 75% hidroviário

| Lugar | Descrição  | Marcação inicial |      | Temporização |             |
|-------|--|------------------|------|--------------|-------------|
|       |  | 2021             | 2025 | 2021         | 2025        |
| P0    | Produção/despacho de soja no estado                | 19               | 23   | expo(0.9)    | expo(0.9)   |
| P1    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P2    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P3    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P4    | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P5    | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.7)    | expo(1.5)   |
| P6    | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P7    | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P8    | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P9    | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P10   | Capacidade do terminal                             | 10               | 10   | 1            | 1           |
| P11   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.6/2)  | expo(1.6/2) |
| P12   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P13   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P14   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P15   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P16   | Capacidade do terminal                             | 20               | 20   | 1            | 1           |
| P17   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.1/3)  | expo(1.1/3) |
| P18   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P19   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P20   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P21   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P22   | Capacidade do terminal                             | 35               | 35   | 1            | 1           |
| P23   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/4)  | expo(0.8/4) |
| P24   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P25   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P26   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P27   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P28   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P29   | Capacidade do terminal                             | 5                | 5    | 1            | 1           |
| P30   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1.5)    | expo(1.7)   |
| P31   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P32   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P33   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P34   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P35   | Capacidade do terminal                             | 15               | 20   | 1            | 1           |
| P36   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P37   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P38   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(1/2)    | expo(1.1/3) |
| P39   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P40   | Fluxo de soja por cada rota                        | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P41   | Quantidade de viagens de caminhões até o terminal  | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P42   | Permanência da soja no terminal                    | 0                | 0    | norm(6,2)    | norm(6,2)   |
| P43   | Capacidade do terminal                             | 55               | 80   | 1            | 1           |
| P44   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/6)  | expo(0.8/9) |
| P45   | Quantidade de viagens por comboio/trem até o porto | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P46   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.8/3) |
| P47   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P48   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.8/3) |
| P49   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |
| P50   | Fluxo de soja no modo hidroviário/ferroviário      | 0                | 0    | expo(0.8/2)  | expo(0.8/3) |
| P51   | Quantidade de soja no porto                        | 0                | 0    | 0            | 0           |

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE B – Identificação Numérica das Cidades do Estado do Mato Grosso

Tabela 105 – Tabela com o número de identificação, cidade, produção de soja para o ano de 2021 e coordenadas georreferenciadas do estudo

| #  | Cidade                | Prod. (ton.) | Latitude | Longitude |
|----|-----------------------|--------------|----------|-----------|
| 1  | Água Boa              | 609.000      | -14.051  | -52.1601  |
| 2  | Alta Floresta         | 104.755      | -9.86674 | -56.0867  |
| 3  | Alto Araguaia         | 145.052      | -17.3153 | -53.2181  |
| 4  | Alto Boa Vista        | 105.628      | -11.6732 | -51.3883  |
| 5  | Alto Garças           | 320.550      | -16.9462 | -53.5272  |
| 6  | Alto Paraguai         | 23.609       | -14.5137 | -56.4776  |
| 7  | Alto Taquari          | 201.852      | -17.8241 | -53.2792  |
| 8  | Araguaiana            | 13.187       | -15.7291 | -51.8341  |
| 9  | Araguainha            | 4.317        | -16.857  | -53.0318  |
| 10 | Arenápolis            | 12.402       | -14.4472 | -56.8437  |
| 11 | Aripuanã              | 10.272       | -10.1723 | -59.4568  |
| 12 | Barra do Bugres       | 4.787        | -15.0702 | -57.1878  |
| 13 | Barra do Garças       | 123.750      | -15.8804 | -52.264   |
| 14 | Bom Jesus do Araguaia | 400.583      | -12.1706 | -51.5032  |
| 15 | Brasnorte             | 851.453      | -12.1474 | -57.9833  |
| 16 | Cáceres               | 25.466       | -16.0764 | -57.6818  |
| 17 | Campinápolis          | 91.200       | -14.5162 | -52.893   |
| 18 | Campo Novo do Parecis | 1.304.958    | -13.6587 | -57.8907  |
| 19 | Campo Verde           | 846.000      | -15.545  | -55.1626  |
| 20 | Campos de Júlio       | 735.075      | -13.7242 | -59.2858  |
| 21 | Canabrava do Norte    | 103.262      | -11.0556 | -51.8209  |
| 22 | Canarana              | 1.053.000    | -13.5515 | -52.2705  |
| 23 | Carlinda              | 43.989       | -9.94912 | -55.8417  |
| 24 | Chapada dos Guimarães | 114.621      | -15.4643 | -55.7499  |
| 25 | Cláudia               | 336.600      | -11.5075 | -54.8835  |
| 26 | Cocalinho             | 41.250       | -14.3903 | -51.0001  |
| 27 | Colíder               | 68.034       | -10.8135 | -55.461   |
| 28 | Comodoro              | 281.641      | -13.6614 | -59.7848  |
| 29 | Confresa              | 200.912      | -10.6437 | -51.5699  |

Continua na próxima página



**Tabela 105 – Continuação da página anterior**

| #  | Cidade                      | Prod. (ton.) | Latitude | Longitude |
|----|-----------------------------|--------------|----------|-----------|
| 30 | Conquista D'Oeste           | 29.696       | -14.5381 | -59.5444  |
| 31 | Cotriguaçu                  | 3.656        | -9.85656 | -58.4192  |
| 32 | Denise                      | 16.174       | -14.7324 | -57.0583  |
| 33 | Diamantino                  | 1.315.239    | -14.4037 | -56.4366  |
| 34 | Dom Aquino                  | 125.280      | -15.8099 | -54.9223  |
| 35 | Feliz Natal                 | 445.500      | -12.385  | -54.9227  |
| 36 | Gaúcha do Norte             | 589.669      | -13.2443 | -53.0809  |
| 37 | General Carneiro            | 194.040      | -15.7094 | -52.7574  |
| 38 | Guarantã do Norte           | 45.760       | -9.96218 | -54.9121  |
| 39 | Guiratinga                  | 236.640      | -16.346  | -53.7575  |
| 40 | Ipiranga do Norte           | 702.000      | -12.2408 | -56.1531  |
| 41 | Itanhangá                   | 349.440      | -12.2259 | -56.6463  |
| 42 | Itaúba                      | 162.600      | -11.0614 | -55.2766  |
| 43 | Itiquira                    | 615.600      | -17.2147 | -54.1422  |
| 44 | Jaciara                     | 174.000      | -15.9548 | -54.9733  |
| 45 | Jangada                     | 6.800        | -15.235  | -56.4917  |
| 46 | Juara                       | 180.000      | -11.2639 | -57.5244  |
| 47 | Juína                       | 48.578       | -11.3728 | -58.7483  |
| 48 | Juruena                     | 1.247        | -10.3178 | -58.3592  |
| 49 | Juscimeira                  | 123.192      | -16.0633 | -54.8859  |
| 50 | Lambari D'Oeste             | 6.287        | -15.3188 | -58.0046  |
| 51 | Lucas do Rio Verde          | 775.500      | -13.0588 | -55.9042  |
| 52 | Luciara                     | 1.856        | -11.2219 | -50.6676  |
| 53 | Marcelândia                 | 256.000      | -11.0463 | -54.4377  |
| 54 | Matupá                      | 144.585      | -10.1821 | -54.9467  |
| 55 | Mirassol d'Oeste            | 7.545        | -15.6759 | -58.0951  |
| 56 | Nobres                      | 153.397      | -14.7192 | -56.3284  |
| 57 | Nortelândia                 | 89.040       | -14.454  | -56.7945  |
| 58 | Nossa Senhora do Livramento | 9.243        | -15.772  | -56.3432  |
| 59 | Nova Bandeirantes           | 765          | -9.84977 | -57.8139  |
| 60 | Nova Brasilândia            | 17.057       | -14.9612 | -54.9685  |
| 61 | Nova Canaã do Norte         | 180.935      | -10.558  | -55.953   |
| 62 | Nova Guarita                | 43.500       | -10.312  | -55.4061  |
| 63 | Nova Lacerda                | 111.605      | -14.4727 | -59.6001  |
| 64 | Nova Marilândia             | 18.869       | -14.3568 | -56.9696  |
| 65 | Nova Maringá                | 648.000      | -13.0136 | -57.0908  |

Continua na próxima página

**Tabela 105 – Continuação da página anterior**

| #   | Cidade                  | Prod. (ton.) | Latitude | Longitude |
|-----|-------------------------|--------------|----------|-----------|
| 66  | Nova Monte Verde        | 27.691       | -9.99998 | -57.5261  |
| 67  | Nova Mutum              | 1.337.280    | -13.8374 | -56.0743  |
| 68  | Nova Nazaré             | 55.680       | -13.9486 | -51.8002  |
| 69  | Nova Santa Helena       | 102.400      | -10.8651 | -55.1872  |
| 70  | Nova Ubiratã            | 1.301.915    | -12.9834 | -55.2556  |
| 71  | Nova Xavantina          | 211.770      | -14.6771 | -52.3502  |
| 72  | Novo Horizonte do Norte | 18.162       | -11.4089 | -57.3488  |
| 73  | Novo Mundo              | 163.200      | -9.95616 | -55.2029  |
| 74  | Novo Santo Antônio      | 3.768        | -12.2875 | -50.9686  |
| 75  | Novo São Joaquim        | 257.400      | -14.9054 | -53.0194  |
| 76  | Paranaíta               | 52.156       | -9.65835 | -56.4786  |
| 77  | Paranatinga             | 742.560      | -14.4265 | -54.0524  |
| 78  | Pedra Preta             | 229.555      | -16.6245 | -54.4722  |
| 79  | Peixoto de Azevedo      | 121.600      | -10.2262 | -54.9794  |
| 80  | Planalto da Serra       | 118.734      | -14.6518 | -54.7819  |
| 81  | Poconé                  | 30.000       | -16.266  | -56.6261  |
| 82  | Pontal do Araguaia      | 7.277        | -15.9274 | -52.3273  |
| 83  | Ponte Branca            | -            | -16.7584 | -52.8369  |
| 84  | Pontes e Lacerda        | 112.215      | -15.2219 | -59.3435  |
| 85  | Porto Alegre do Norte   | 144.000      | -10.8761 | -51.6357  |
| 86  | Porto dos Gaúchos       | 588.770      | -11.533  | -57.4132  |
| 87  | Porto Esperidião        | 8.906        | -15.857  | -58.4619  |
| 88  | Poxoréu                 | 224.460      | -15.8299 | -54.4208  |
| 89  | Primavera do Leste      | 939.600      | -15.544  | -54.2811  |
| 90  | Querência               | 1.298.304    | -12.6093 | -52.1821  |
| 91  | Ribeirão Cascalheira    | 315.000      | -12.9367 | -51.8244  |
| 92  | Ribeirãozinho           | 67.284       | -16.4856 | -52.6924  |
| 93  | Rondonópolis            | 290.700      | -16.4673 | -54.6372  |
| 94  | Rosário Oeste           | 125.200      | -14.8259 | -56.4236  |
| 95  | Salto do Céu            | 7.389        | -15.1303 | -58.1317  |
| 96  | Santa Carmem            | 392.040      | -11.9125 | -55.2263  |
| 97  | Santa Cruz do Xingu     | 134.820      | -10.1532 | -52.3953  |
| 98  | Santa Rita do Trivelato | 546.960      | -13.8146 | -55.2706  |
| 99  | Santa Terezinha         | 108.000      | -10.4704 | -50.514   |
| 100 | Santo Afonso            | 52.579       | -14.4945 | -57.0091  |
| 101 | Santo Antônio do Leste  | 348.000      | -14.805  | -53.6075  |

Continua na próxima página

Tabela 105 – Continuação da página anterior

| #   | Cidade                           | Prod. (ton.) | Latitude  | Longitude |
|-----|----------------------------------|--------------|-----------|-----------|
| 102 | Santo Antônio do Leverger        | 134.865      | -15.8632  | -56.0788  |
| 103 | São Félix do Araguaia            | 724.826      | -11.615   | -50.6706  |
| 104 | São José do Rio Claro            | 405.000      | -13.4398  | -56.7218  |
| 105 | São José do Xingu                | 421.000      | -10.7982  | -52.7486  |
| 106 | São José dos Quatro Marcos       | 8.486        | -15.6276  | -58.1772  |
| 107 | São Pedro da Cipa                | 7.172        | -16.0109  | -54.9176  |
| 108 | Sapezal                          | 1.319.731    | -12.9892  | -58.7645  |
| 109 | Serra Nova Dourada               | 21.038       | -12.0896  | -51.4025  |
| 110 | Sinop                            | 574.200      | -11.8604  | -55.5091  |
| 111 | Sorriso                          | 2.010.960    | -12.5425  | -55.7211  |
| 112 | Tabaporã                         | 604.260      | -11.3007  | -56.8312  |
| 113 | Tangará da Serra                 | 713.811      | -14.6229  | -57.4933  |
| 114 | Tapurah                          | 572.400      | -12.695   | -56.5178  |
| 115 | Terra Nova do Norte              | 107.040      | -10.517   | -55.231   |
| 116 | Tesouro                          | 95.760       | -16.0809  | -53.559   |
| 117 | Torixoréu                        | 67.650       | -16.2006  | -52.5571  |
| 118 | União do Sul                     | 205.400      | -11.5308  | -54.3616  |
| 119 | Vera                             | 508.200      | -12.3017  | -55.3045  |
| 120 | Vila Bela da Santíssima Trindade | 134.025      | -15.0068  | -59.9504  |
| 121 | Vila Rica                        | 180.000      | -10.0137  | -51.1186  |
| 122 | Acorizal                         | -            | -15.1996  | -56.3667  |
| 123 | Apiacás                          | 2.228        | -9.56717  | -57.39527 |
| 124 | Araputanga                       | 4.832        | -15.47077 | -58.34572 |
| 125 | Barão de Melgaço                 | -            | -16.19674 | -55.96632 |
| 126 | Castanheira                      | 4.620        | -11.13726 | -58.60867 |
| 127 | Colniza                          | -            | -9.46366  | -59.22297 |
| 128 | Cuiabá                           | 1.176        | -15.60086 | -56.09682 |
| 129 | Curvelândia                      | -            | -15.60963 | -57.91939 |
| 130 | Figueirópolis D'Oeste            | -            | -15.44434 | -58.73966 |
| 131 | Glória D'Oeste                   | -            | -15.76802 | -58.30663 |
| 132 | Indiavaí                         | 4.787        | -15.49254 | -58.58066 |
| 133 | Jauru                            | -            | -15.33459 | -58.87277 |
| 134 | Nova Olímpia                     | 11.072       | -14.77922 | -57.28064 |
| 135 | Porto Estrela                    | 264          | -15.32395 | -57.22091 |
| 136 | Reserva do Cabaçal               | -            | -15.07464 | -58.45885 |
| 137 | Rio Branco                       | 214          | -15.23958 | -58.10674 |

Continua na próxima página

**Tabela 105 – Continuação da página anterior**

| #            | Cidade               | Prod. (ton.)      | Latitude  | Longitude |
|--------------|----------------------|-------------------|-----------|-----------|
| 138          | Rondolândia          | 87                | -10.84152 | -61.46013 |
| 139          | São José do Povo     | -                 | -16.46526 | -54.25357 |
| 140          | Vale de São Domingos | -                 | -15.294   | -59.06141 |
| 141          | Várzea Grande        | -                 | -15.64747 | -56.13497 |
| <b>TOTAL</b> |                      | <b>35.336.979</b> |           |           |

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de [IBGE \(2021\)](#) e [Microsoft \(2020\)](#)