



Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Modelagem e Simulação de Sistemas a
Eventos Discretos Utilizando Redes de
Petri Coloridas: Uma Aplicação para o
Sistema da Ferrovia Norte Sul**

Diego Rodrigues Andrade Simão

Dissertação de Mestrado

Belo Horizonte

2020

Universidade Federal de Minas Gerais

Diego Rodrigues Andrade Simão

**Modelagem e Simulação de Sistemas a Eventos Discretos
Utilizando Redes de Petri Coloridas: Uma Aplicação
para o Sistema da Ferrovia Norte Sul**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: *Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha*
Coorientador: *Prof. Dr. Carlos A. Maia, Dr. Lucas S. M. Guedes*

Belo Horizonte
2020

S588m

Simão, Diego Rodrigues Andrade.

Modelagem e simulação de sistemas a eventos discretos utilizando redes de Petri coloridas [recurso eletrônico] : uma aplicação para o sistema da Ferrovia Norte Sul / Diego Rodrigues Andrade Simão. – 2020.
1 recurso online (xiv, 56 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodney Rezende Saldanha.

Coorientadores: Carlos Andrey Maia, Lucas Sirimarco Moreira Guedes.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 52-56.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Logística ferroviária - Teses. 3. Redes de petri - Teses. 4. Simulação (Computadores) - Teses. I. Saldanha, Rodney Resende. II. Maia, Carlos Andrey,. III. Guedes, Lucas Sirimarco Moreira. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. V. Título.

CDU: 621.3(043)

*Dedico este trabalho à minha família, pelo suporte e afeto
constante.*

Agradecimentos

Agradeço à toda minha família e amigos. Meus pais, Cláudio e Téia, pelo carinho e apoio. As minhas irmãs Camilla, Marcelle pelo suporte, amizade e encorajamento constante. Lu, agradeço sempre por acreditar que esse trabalho seria possível e por me motivar sempre. Jé, nossas conversas e divagações contribuíram muito na minha caminhada. André, sua confiança no meu potencial sempre me motivou a ir além. Pedro, aqui está o registro do meu amor por você, você me incentiva a ser melhor e me faz mais completo. Flávio, você me inspirou a trilhar esse caminho e a vencê-lo.

Os amigos, antigos e novos. Vocês também fazem parte desta conquista.

O meu orientador Prof. Dr. Rodney pela dedicação, motivação e suas ideias geniais . Os co-orientadores Prof. Dr. Carlos Andrey e Dr. Lucas, por toda assistência e conhecimento compartilhado. Todos os colegas da VLI pelos momentos desafiadores e de alegrias, em especial a Supervisão de Pesquisa Operacional e Simulação. Tenho orgulho de fazer parte desse time! Espero que a jornada não pare por aqui. . . .

“Without deviation from the norm, progress is not possible.”

—FRANK ZAPPA

Resumo

O aumento da complexidade nos processos que envolvem a interação de muitos recursos entre si nas ferrovias faz com que pesquisas relacionadas à modelagem e simulação no transporte ferroviário de cargas tornem-se cada vez mais relevantes. O que desperta a necessidade de simuladores que ajudam a compreender o comportamento dos trens diante das diferentes situações. A aplicação das Redes de Petri para modelar e simular um fluxo de transporte ferroviário é vista como uma alternativa interessante para abordar tal problema. Com um viés diferente de grande parte dos trabalhos encontrados na literatura, apoiando o planejamento de longo prazo (+10 anos). Uma rede de Petri pode ser representada por um grafo bipartido direcionado, fornecendo uma base matemática padrão e consistente, com simulação fácil e com baixo custo computacional. A aplicação demonstrou ser consistente com a realidade da Ferrovia Norte Sul e com excelente desempenho computacional, as simulações foram feitas utilizando o GPenSIM em ambiente Matlab. Simplicidade, rapidez e capacidade de modelagem fazem com que esse método seja uma alternativa promissora nesse contexto.

Palavras-chave: Logística Ferroviária, Redes de Petri Coloridas, Simulação de Sistemas a Eventos Discretos.

Abstract

The increase in complexity in the processes that involve the interaction of many resources with each other on the railroads makes research related to modeling and simulation in rail freight transportation increasingly relevant. What arouses the need for simulators that help to understand the behavior of trains in different situations. The application of Petri Nets to model and simulate a flow of rail transport is seen as an interesting alternative to address such a problem. With a different bias from most of the works found in the literature, supporting long-term planning (+10 years). A Petri net can be represented by a directed bipartite graph, providing a standard and consistent mathematical basis, with easy simulation and low computational cost. The application proved to be consistent with the reality of the Norte Sul Railway and with excellent computational performance, the simulations were made using GPenSIM in a Matlab environment. Simplicity, speed and modeling capabilities make this method a promising alternative in this context.

Keywords: Railway Logistics, Colored Petri Nets, Discrete Event System Simulation.

Sumário

Lista de Abreviaturas	x
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Justificativa	3
1.3 Contribuições	3
1.4 Metodologia	3
1.5 Organização do trabalho	5
2 Referencial Teórico	6
2.1 Simulação	6
2.1.1 Pontos positivos e negativos da simulação computacional	9
2.1.2 Tipos de simulação	10
2.1.2.1 Simulação a Eventos Discretos	11
2.2 Rede de Petri	12
2.2.1 Conceitos e Blocos Funcionais	13
2.2.2 Definição Formal	14

2.2.3	Lógica de simulação em uma Rede de Petri	16
2.2.4	Características de uma Rede de Petri	17
2.2.4.1	Propriedades Funcionais	17
2.2.4.2	Propriedades Estruturais	19
2.2.5	Classificação Geral de Redes de Petri	20
2.2.5.1	Rede de Petri Temporizada	21
2.2.5.2	Rede de Petri Hierárquica	21
2.2.5.3	Rede de Petri Colorida	21
3	Estudo de Caso	24
3.1	Descrição	24
4	Modelo da Ferrovia Norte Sul	27
4.1	Modelo Conceitual Básico	28
4.2	Rede de Petri - Modelo básico	29
4.2.1	Modelo Conceitual - Expandido	32
4.3	Rede de Petri Expandida	33
4.3.1	Modelo de terminais próprios	33
4.3.2	Modelo do porto	36
4.3.3	Fluxo de retorno	37
5	Resultados	40
5.1	Parâmetros do modelo	40
5.2	Análise e resultados do Modelo básico	41
5.3	Análise e resultados do Modelo Expandido	42
5.3.1	Validação do modelo expandido	43
5.3.2	Análise de sensibilidade: trens de celulose	44
5.3.3	Análise de sensibilidade: tempo de descarga de grãos	48

6 Conclusão	50
6.1 Trabalhos futuros	51
Referências Bibliográficas	52

Lista de Abreviaturas

<i>EFC</i>	Estrada de Ferro Carajás
<i>FIFO</i>	First in First Out
<i>FNS</i>	Ferrovia Norte Sul
<i>MATOPIBA</i>	(Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia)
<i>RdP</i>	Rede de Petri
<i>RdPc</i>	Rede de Petri colorida
<i>SED</i>	Simulação de Eventos Discretos
<i>UML</i>	Linguagem de Modelagem Unificada

Lista de Figuras

2.1	Fluxo de desenvolvimento de um modelo de simulação	7
2.2	Evolução do custo por fases do projeto, <i>Harrell et al. (2000)</i>	8
2.3	Comparativo da evolução dos custos do sistema com e sem aplicação da simulação, <i>Harrell et al. (2000)</i>	9
2.4	Representação da estrutura básica de uma Rede de Petri	14
2.5	Rede de Petri marcada	16
2.6	Dinâmica de disparo	16
2.7	Condição pós disparo de uma rede	17
2.8	Classificação de Redes de Petri	20
2.9	Exemplo de uma Rede de Petri Colorida	23
3.1	Malha ferroviária do Norte do Brasil.	25
3.2	Volume de carga transportada (<i>ANTT, 2019</i>)	26
4.1	Modelo conceitual do fluxo de transporte ferroviário simplificado - FNS.	28
4.2	Rede de Petri: sistema simplificado.	30
4.3	Descrição das transições T14 / T15.	31
4.4	Modelo conceitual do fluxo de transporte ferroviário completo - FNS.	33
4.5	Carregamento, descarregamento e composição - FNS	34
4.6	Processo de carga e descarga - porto.	36
4.7	Processo volta - porto/origens.	38
4.8	Rede de Petri do sistema expandido	39

LISTA DE FIGURAS

xii

5.1	Validação de resultados: modelo básico.	42
5.2	Validação de volume transportado por origem: modelo expandido.	43
5.3	Evolução dos tokens em GRAO e P30.	44
5.4	Variação de trens de celulose no sistema.	45
5.5	Volume por tipo de produto: variação de trens de celulose.	47
5.6	Volume por tipo de produto: redução de tempo de descarga em QPM.	48

Lista de Tabelas

4.1	Estrutura básica dos modelos	27
4.2	Siglas básicas	29
5.1	Volume por origem.	46
5.2	Volume por origem: redução de tempo de descarga em PSU.	47
5.3	Volume transportado: variação em QPM.	49

CAPÍTULO 1

Introdução

Na sociedade moderna o transporte de cargas tem desempenhado um papel cada vez mais importante. Consequentemente, esta tendência gera um ambiente onde há crescentes pressões competitivas envolvendo diferentes modais (ferroviário, rodoviário, aeroviário, aquaviário e dutoviário). Os sistemas de transporte são responsáveis por movimentar cargas, pessoas e um conjunto de objetos que contribuem decisivamente no desenvolvimento econômico do país. Desse modo, os transportes têm sido um desafio contínuo às economias que participam do mercado internacional (Rodrigue *et al.*, 2016).

Com o avanço na tecnologia da informação, o planejamento da cadeia de suprimentos se tornou linha de frente das práticas de negócios da maioria das organizações de manufatura e serviços. Na disputa pelo transporte de cargas as empresas que oferecem um conjunto maior de facilidades ao cliente tenderá a atrair maior volume de carga.

Entre esses modais, o transporte ferroviário é um dos que apresentam maiores vantagens devido à sua capacidade e segurança, sobretudo no transporte de cargas de longa distância ou grande escala (Ribeiro e Ferreira, 2002).

Nesse contexto, é desejável que o planejamento da empresa se ajuste às mudanças nas condições econômicas e regulatórias, ofereça serviços confiáveis, de alta qualidade e baixo custo aos seus clientes e que ainda gere lucro para as empresas. Diante disso, muita das vezes as áreas de planejamento se deparam com a necessidade de fazer escolhas entre: adquirir vagões e locomotivas, investir em infraestrutura de um trecho específico da ferrovia, por exemplo, avaliar qual o ganho de volume a empresa teria se o número de vagões de uma composição aumentar em cinco unidades, são vários estudos para possibilitar a tomada de decisão pelos administradores da empresa.

Desta forma vários estudos são necessários, a dinâmica de uma ferrovia é um sistema onde existem interações entre diversos agentes. Tal interação, quando mal

sucedida pode impactar fortemente o volume transportado, *output* de empresas deste segmento. Sistemas com tal complexidade envolvem incertezas, que são tratadas, na maioria das vezes, por meio de simulações de eventos discretos (SED).

Dessa forma, são vários os desafios desse segmento, podemos mencionar: identificação de gargalos na cadeia logística e alocação de ativos com maior assertividade garantindo melhor desempenho do sistema como um todo.

Na literatura há vários métodos de simulação a eventos discretos que podem ser aplicados na dinâmica ferroviária e que buscam cenários diversos para oferecer apoio na tomada de decisão (Assad, 1980; Cavone *et al.*, 2018; Gaied *et al.*, 2018). Nesse trabalho foram utilizadas as Rede de Petri como forma de apresentar essa ferramenta que busca solucionar os desafios desse segmento em um projeto de pesquisa em parceria com a VLI Multimodal.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é aplicar Rede de Petri Colorida na logística ferroviária de um trecho no Norte do Brasil e apresentar *insights* que contribuam para melhor planejamento das empresas desse segmento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar operação ferroviária e definir melhor abordagem utilizando Rede de Petri para o problema;
- Modelar o sistema e validar a lógica de simulação;
- Analisar resultados e realizar análise de sensibilidade;

1.2 Justificativa

Uma justificativa para escolha da abordagem utilizando Rede de Petri é o fato de que se trata de uma ferramenta bastante promissora no campo da modelagem de sistemas dinâmicos que, além de possuir uma abordagem matemática, gráfica e formal, permite que se faça a modelagem, a análise, o controle e a supervisão de sistemas dinâmicos (Murata, 1989). Outros benefícios da Rede de Petri a serem mencionados são: a capacidade de modelar aspectos de sincronismo, alocação de recursos e concorrência - o que pode ser utilizado de maneira apropriada no cenário logístico ferroviário.

A hipótese base da proposta é que o uso de uma Rede de Petri pode possibilitar análises rápidas de um sistema complexo e substituir métodos de simulação comumente utilizados no mercado.

1.3 Contribuições

O presente trabalho pretende aplicar as propriedades existentes em uma Rede de Petri colorida e explorar possibilidades para auxiliar empresas que atuam com logística ferroviária no planejamento das operações a longo prazo. A quantidade de trabalhos que aplicam Rede de Petri colorida à modelagem e simulação de ferrovias é pequena. Desta forma, este trabalho traz importante contribuição para a área de planejamento e se destaca dos demais trabalhos existentes sobre o tema. Como fruto dessa pesquisa, uma contribuição a esse tema pertinente é apresentada em Simão *et al.* (2019)

1.4 Metodologia

De acordo com Silva e Menezes (2001) uma pesquisa pode ser classificada quanto a sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos.

Do ponto de vista da sua natureza, uma pesquisa pode ser **básica** se objetivar

gerar novos conhecimentos que contribuam para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista. E ser **aplicada**, se buscar gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigida à solução de problemas específicos.

No que tange à forma de abordagem do problema, a pesquisa pode ser **quantitativa**, considerando que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números as opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. E **qualitativa**, quando há uma relação dinâmica entre o mundo real e o objeto, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números, além de não requerer o uso de métodos e técnicas estatísticas.

Quanto aos objetivos, pode ser classificada como **exploratória, descritiva e explicativa** (Gil, 2002). A **exploratória** visa proporcionar maior familiaridade com o problema para torná-lo explícito ou construir hipóteses, o que envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas e análise de exemplos que estimulem a compreensão. Assume, em geral, as formas de pesquisas bibliográficas e estudos de caso.

A **descritiva**, busca descrever as características de determinada população, fenômeno ou o estabelecimento de relações entre as variáveis. Para tanto, envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como questionário e observação sistemática.

E a **explicativa**, identifica os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão e o “porquê” das coisas. Quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental, e nas ciências sociais requer o uso do método observacional.

Por fim, quanto aos procedimentos técnicos, uma pesquisa pode ser classificada como (Gil, 2002): **bibliográfica**, quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na Internet; **Documental**, se elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico; **Experimental**, determina um objeto de estudo e seleciona as variáveis que seriam capazes de influenciá-la; **Levantamento**, envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer; **Estudo de caso**,

utiliza o estudo profundo e exaustivo de um ou mais objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento; **Pesquisa Expost-Facto**, quando o “experimento” se realiza depois dos fatos; **Pesquisa-Ação**, é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo; e por fim, **Pesquisa Participante**, sendo aquela desenvolvida a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas.

A partir das classificações expostas, podemos afirmar que este trabalho se enquadra dentro dos seguintes aspectos: quanto a natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada; sobre a forma de abordagem, considera-se quantitativa; em relação aos objetivos, explicativa e quanto aos procedimentos técnicos, estudo de caso.

1.5 Organização do trabalho

Essa dissertação está dividida da seguinte forma:

- no capítulo 2 é apresentado ao leitor conceitos e abordagens da simulação e suas aplicações com maior enfoque no contexto logístico explorando a Rede de Petri e suas variações;
- no capítulo 3, o contexto em que a simulação será aplicada é detalhado;
- no capítulo 4, o modelo de simulação é descrito de forma minuciosa explorando suas características;
- no capítulo 5, os resultados do modelo apresentado são abordados;
- no capítulo 6, é exposta a conclusão do estudo, bem como uma discussão breve de trabalhos futuros a serem realizados.

Referencial Teórico

Este capítulo apresenta uma análise teórica sobre simulação, especialmente suas variações e aplicações. Apresenta-se inicialmente um breve resumo sobre conceitos, tipos de simulação, vantagens e desvantagens, dentre outros. Posteriormente, será dado maior enfoque em Rede de Petri, definições matemáticas, características e exemplos. Em seguida, uma apresentação sobre Rede de Petri colorida e seu funcionamento.

2.1 Simulação

A simulação computacional é a técnica de construção de modelos que descrevem computacionalmente de forma abstrata sistemas reais ao longo do tempo, com o intuito de inferir características operacionais dos sistemas reais a serem estudados (Banks *et al.*, 2005).

Para Law e Kelton (2000), a simulação era considerada como última opção e só seria utilizada caso outras técnicas falhassem, pois seu uso carecia de alto tempo de treinamento aos usuários, uma vez que não possuíam conhecimentos prévios sobre o tema, assim a construção dos modelos e animações era demorada. No entanto, na década de 50, a disponibilidade de computadores aumentou e com isso, houve maior utilização das técnicas de simulação e suas aplicações aumentaram em diferentes contextos (Goldsmann *et al.*, 2010). Outro fator a ser destacado que influenciou o aumento no uso das técnicas de simulação, foi a evolução dos *hardwares* e o aprimoramento dos *softwares* de simulação (Giannasi *et al.*, 2001).

Segundo Albright e Winston (2012) a simulação tem sido, por muitos anos, uma das técnicas mais utilizadas para auxílio à decisão. Um fator que subsidia a populari-

dade é a possibilidade de simular a operação de um processo ou sistema de forma realística, uma vez que lida com dados aleatórios interdependentes e discretos (Chwif e Medina, 2010).

A construção de um modelo de simulação obedece o que é proposto no método científico, ou seja, uma hipótese é formulada, é realizado um planejamento experimental, validação das hipóteses através do experimento e avaliação dos resultados obtidos. Este processo é mostrado na Figura 2.1.

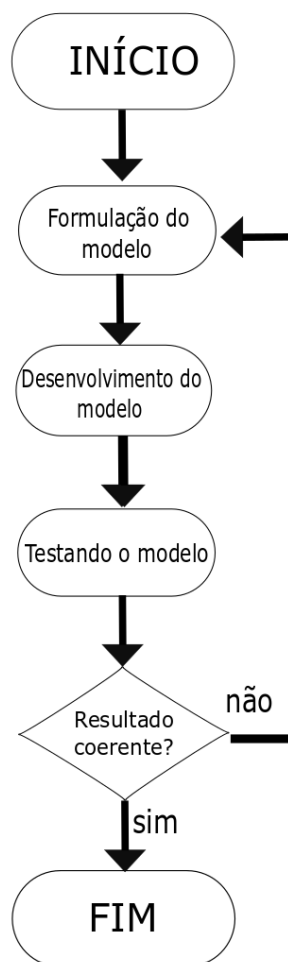


Figura 2.1: Fluxo de desenvolvimento de um modelo de simulação

Um ganho a ser destacado na simulação é a possibilidade de identificar e eliminar problemas e ineficiência de processos e/ou operações, uma vez que em análises de cenário a inviabilidade do projeto é evidente, antes mesmo de sua implantação. Assim, a economia está presente na eliminação de desvios nos projetos e diminuição nos fatores de risco quando há incerteza nas projeções.

Diversas empresas relatam a economia de centenas de milhares de dólares com a identificação de correções, eliminação de investimentos não necessários e utilizando a simulação como ferramenta de auxílio a tomada de decisão (Harrell *et al.*, 2000).

Conforme exposto, o desenvolvimento de um projeto é composto por diferentes etapas com características distintas entre si. A Figura 2.2 explora de forma intuitiva a relação entre as etapas do projeto e o custo. Mudanças no escopo de projeto que realizadas com o decorrer do tempo se tornam mais onerosas, essas alterações tendem a ser evitadas.

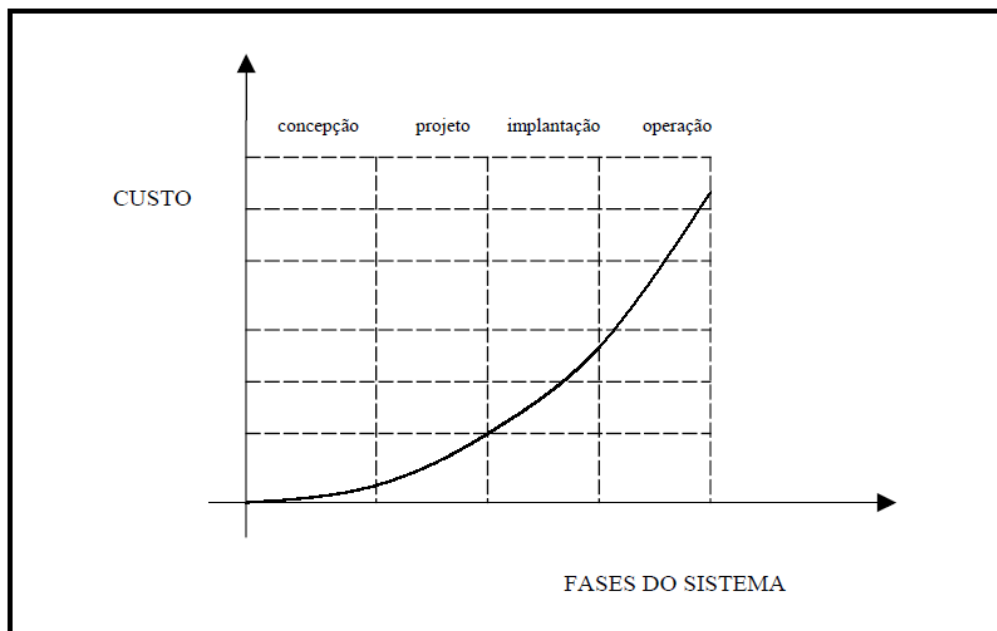


Figura 2.2: Evolução do custo por fases do projeto, Harrell *et al.* (2000)

A simulação de um projeto ou sistema propõe antecipar cenários visando a redução de custos, com isso há uma mudança na curva entre custo e as fases do projeto

conforme a Figura 2.3 . No entanto, a fase de concepção do projeto ou sistema não sofre nenhum impacto, pois a aplicação da simulação é realizada após esta etapa.

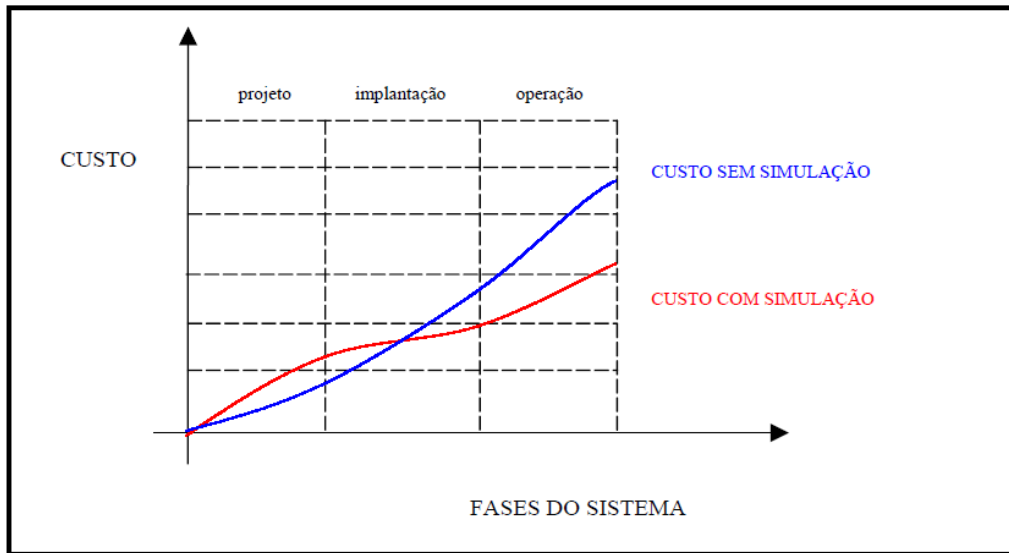


Figura 2.3: Comparativo da evolução dos custos do sistema com e sem aplicação da simulação, Harrell *et al.* (2000)

2.1.1 Pontos positivos e negativos da simulação computacional

Diversos autores na literatura citam pontos positivos da SED e também a possibilidade de ganhos, o que de certa forma tem ajudado na popularização desse tipo de análise. Banks *et al.* (2005) destaca como ponto positivo a facilidade de gerar cenários com diferentes recursos sem oneração de custo, estudos de diferentes layouts, maior entendimento entre a interação entre as variáveis no sistema, análises de gargalo, etc. Já para Pinho (2008) a SED tem característica de fácil compreensão se comparados a abordagens envolvendo modelos matemáticos. Para Chwif e Medina (2010), um modelo de simulação pode permitir que um mesmo comportamento do sistema real seja reproduzido computacionalmente em ambiente controlado.

Ainda assim, alguns autores mencionam algumas desvantagens dessa abordagem. Banks *et al.* (2005) destacam a necessidade de capacitação especial de pessoal

para construir modelos robustos. Outro ponto levantado, é que os resultados podem ser de difícil interpretação, pois são compostos essencialmente por variáveis aleatórias e/ou determinísticas.

Law e Kelton (2000) entende que modelos de simulação geralmente são caros e consomem um elevado tempo para o seu desenvolvimento, além de tornar necessário, por parte do modelador, um treinamento especial em um *software* e/ou linguagem de programação específica.

Para Shannon (1998) como o modelo de simulação se baseia em dados coletados ou estimados de processos reais, esse processo pode consumir grande quantidade de tempo e ainda assim os resultados podem ser questionáveis. Outro aspecto é que como uma grande quantidade de dados são gerados como resultado de uma simulação as pessoas passam a confiar mais no modelo do que deveriam. Caso um modelo não apresente o nível de abstração devida para a análise desejada, não importa o tipo de informação que será obtida, já que não haverá utilidade.

2.1.2 Tipos de simulação

Na literatura há diversos tipos de simulação, Chwif e Medina (2010) menciona três categorias: simulação de Monte de Carlo, simulação contínua e SED. Será introduzido no tópico abaixo mais um tipo de simulação descrita por Bernhardt (2007):

- Monte Carlo: faz uso de geradores de números pseudo aleatórios e de distribuições de probabilidade acumulativas do sistema de interesse e não considera a variável tempo em sua análise e também pode ser chamada de simulação estática (Mooney, 1997).
- Simulação contínua: utilizada quando há a necessidade de modelar sistemas que mudam continuamente as suas variáveis de estado ao longo do tempo. É comum, nesse tipo de simulação, o uso de equações diferenciais para calcular as alterações das variáveis de estados. Um exemplo seria a simulação do enchimento de um reservatório de água (Shannon, 1998).

- Simulação a eventos discretos: abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos de tempo, ou seja, a ocorrência de um evento causa uma transição ou mudança de estado no sistema, sendo que essa será abordada em detalhes no tópico seguinte por ser o tipo de simulação utilizada nesse trabalho (Cassandras, 2008).
- Simulação baseada em agentes: tem como objetivo expandir a teoria tradicional de simulação e insere o entidades cujos comportamentos podem ser alterados ao longo do tempo de acordo com as características do ambiente (Fu-gui *et al.*, 2012; Samuelson, 2005).

2.1.2.1 Simulação a Eventos Discretos

Segundo Cassandras (2008), um sistema de eventos discretos é definido como um sistema cujo espaço de estados é discreto e a dinâmica é orientada a eventos, ou seja, a evolução dos seus estados depende inteiramente da ocorrência de eventos discretos assíncronos e instantâneos. A simulação a eventos discretos tem como objetivo primário representar sistemas reais que se comportam dessa forma. A simulação é realizada através de experimentos computacionais com o intuito de criar *insights* e gerar cenários de forma representativa (Albright e Winston, 2012).

Uma grande vantagem dessa técnica que pode ser mencionada, é a tratativa de dados aleatórios interdependes e discretos provenientes do sistema real ou de premissas factíveis.

De acordo com Sakurada *et al.* (2009), o foco da SED são os modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em períodos específicos de tempo, de forma contrária aos modelos contínuos, nos quais as variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo. Em sistemas contínuos, a análise é feita utilizando equações diferenciais, no contexto de sistemas discretos a efetividade de tal análise é pouco efetiva.

Desse modo, outros modelos formais foram desenvolvidos. Os principais modelos utilizados que fornecem informações estruturais para um sistema a eventos discretos

são:

- Álgebra Max-Plus
- Cadeias de Markov
- Redes de Petri
- Teoria de Filas
- Teoria de Linguagens e Autômatos

Entre as diversas aplicações possíveis da SED em sistemas reais estão: hospitais (Ahalt *et al.*, 2018), logística de alimentos (Mittal e Krejci, 2015), comportamento humano (Greasley e Owen, 2018), estoque de diversos produtos (Jackson *et al.*, 2018) entre outros.

Nos últimos 3 anos, segundo *Web of Science*, as aplicações da SED estão divididas nas categorias de Engenharia Eletrônica, Teoria de métodos, Pesquisa operacional, Automação de sistemas e Aplicações interdisciplinares. Dessas pesquisas, mais de 40% estão focadas na área de engenharia.

Dentre os modelos citados acima, a Rede de Petri foi utilizada como forma de representação nessa dissertação. Na seção seguinte, o tópico será abordado de forma mais profunda para maior compreensão.

2.2 Rede de Petri

A Rede de Petri como o próprio nome sugere, foi criada por Carl Adam Petri em 1962, fruto do seu trabalho de doutorado intitulado *Kommunikationmit Automaten* (Comunicação com Autômatos). Uma característica importante da Rede de Petri a ser mencionada, é a capacidade de modelar sistemas que tenham atividades paralelas, concorrentes, assíncronas e não determinísticas (Murata, 1989).

Segundo Salmon (2017), a capacidade de modelagem gráfica e formal com sólida base matemática facilita a análise e a verificação de um número expressivo de propriedades do sistema e também possibilita a descrição e o estudo de sistemas dinâmicos discretos.

Essa técnica de modelagem considerada de certa forma ainda recente, vem sendo aplicada em diferentes contextos com variações do modelo proposto inicialmente, apresentando resultados positivos em diferentes campos da ciência. Na aplicação do comportamento de clientes e provedores por exemplo, foi elaborada uma estrutura capaz de representar o comportamento de uma rede de Internet e realizar a sua simulação utilizando Rede de Petri, com o auxílio do uso de *profiles* (Souza, 2012).

Enquanto Dotoli *et al.* (2014) modelou terminais de transporte de mercadorias intermodais avaliando o nível de eficiência dos terminais e identificação de seus gargalos por índices de desempenho através de Rede de Petri Temporizada. Já Edhlund e Lee (2019) utilizaram Rede de Petri para realizar a modelagem toxicocinética de base fisiológica para prever concentrações internas de tecido.

Por conseguinte, Santos *et al.* (2019) mostrou em sua abordagem que utilizando Rede de Petri Estocástica, em combinação com a simulação de Monte Carlo, é uma abordagem poderosa, flexível, eficiente e intuitiva para modelar e otimizar estratégias de manutenção em sistemas complexos. Naybour *et al.* (2019) avaliou a confiabilidade e a eficiência de um processo de dispensação de farmácia comunitária através das Rede de Petri colorida. E Clemente *et al.* (2013) propõe uma solução baseada no usuário para o problema de realocação de veículos em sistemas de compartilhamento de carros a fim de mostrar e comparar a eficácia das estratégias de gestão adotadas que são descritas pela Linguagem de modelagem Unificada (UML) e modeladas em uma estrutura de Rede de Petri Temporizada.

2.2.1 Conceitos e Blocos Funcionais

Uma Rede de Petri é um grafo bipartido e direcionado. A principal ideia é que objetos, chamados de fichas (*tokens*), percorram o grafo orientado por eventos. O grafo bipartido de uma rede possui dois tipos de nós: lugares (*places*) e transições (*transiti-*

ons). Os lugares representam a condição das variáveis e variam de acordo com o propósito da modelagem. As transições representam ações que fazem com que as variáveis mudem de estado. Fichas são associadas aos lugares e mudam de lugar de acordo com o acontecimento dos eventos. A quantidade de fichas em um lugar é representada por um número inteiro não negativo e representa a condição verdadeira da variável, de forma prática, pode-se dizer que esse número também representa a quantidade de recurso.

A cada transição, é atribuída uma função de disparo, regra que define a condição para que ocorra a ativação da transição e a execução do evento (disparo da transição). Uma transição torna-se habilitada quando existem fichas suficientes em cada lugar conectado a ela através de um arco. Um peso é associado a cada arco para indicar o número de fichas necessárias e suficientes para habilitar a respectiva transição. Por outro lado, os arcos que partem de uma transição indicam quantas fichas são geradas no lugar de destino, quando a respectiva transição é disparada. Sendo assim, as fichas circulam na direção dos arcos e lugares e só se conectam a outros lugares através de transições, e vice-versa. Usualmente, uma Rede de Petri considera que lugares são representados por círculos e transições por retângulos, conforme mostrado na Figura 2.4.

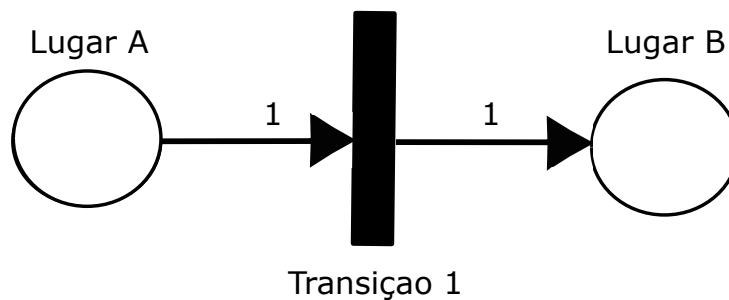


Figura 2.4: Representação da estrutura básica de uma Rede de Petri

2.2.2 Definição Formal

A seguir uma definição formal da rede *Place/Transition* (P/T). Segundo Murata (1989) a estrutura é uma quintupla $PN = (P, T, F, w, M_o)$, sendo:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares não nulos,

- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições não nulos,
- F é o conjunto finito de arcos $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$, que é um conjunto de arcos que ligar as transições T aos lugares P e dos lugares P para as transições T ;
- $w : A \rightarrow \{0, 1, 3, \dots\}$ é uma função de peso dos arcos.
- M_o : é a marcação inicial

A Rede de Petri que não apresenta marcações iniciais comumente são apresentadas como $N = (P, T, F, w)$. E uma rede que apresenta marcação inicial é representada da seguinte forma, (N, M_o)

Uma Rede de Petri pode ser representada matricialmente através de duas matrizes. A primeira indicando os lugares que servem de entrada para cada transição da rede, onde (Pre_N) denota as condições de uma localidade, (Pos_N) as pós-condições. A matriz de incidência C é resultado da soma $(Pre_N) + (Pos_N)$, onde $[c_{ij}] = w(i, j)^+ + w(i, j)^-$, isto é, a soma dos pesos dos arcos de entrada e dos arcos de saída. A marcação do lugar $P(k)$ é dado por um vetor coluna M_k , onde a j -ésima entrada representa o número de *tokens* no lugar j . Nesse estado, um vetor de habilitação u_k $n \times 1$, cuja função é a de definir se uma transição está habilitada ou não. Para cumprir essa função um elemento qualquer j indica a condição da transição de forma binária da i -ésima $[u_k]_j = 1$ ou $[u_k]_j = 0$.

A equação de estado então é dada por $M_{k+1} = M_k + C^T u_k$ onde k é um inteiro positivo.

A Figura 2.5 abaixo representa tal estrutura:

$$P = P1, P2,$$

$$T = T1,$$

$$A = (P1, T1), (T1, P2),$$

$$w(P1, T1) = 1, w(T1, P2) = 1,$$

$$x = \begin{bmatrix} 3 & 0 \end{bmatrix}.$$

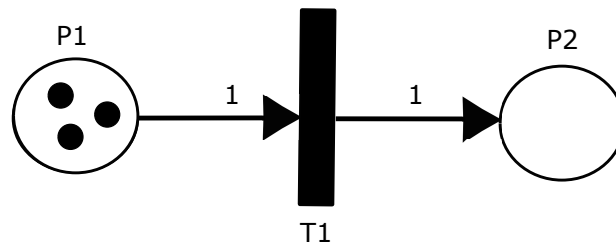


Figura 2.5: Rede de Petri marcada

2.2.3 Lógica de simulação em uma Rede de Petri

Para representar computacionalmente o comportamento e a dinâmica de um sistema, um estado ou recurso muda de acordo com as seguintes regras de transição:

- Uma transição t está habilitada se cada lugar p da transição estiver marcado com pelo menos $w(p,t)$ *token*, onde $w(p,t)$ é o peso do arco que conecta p até t .
- Uma transição habilitada pode ou não ser disparada, caso os eventos dependentes ocorram ou não nesse instante de tempo.
- Uma transição habilitada t remove $w(p,t)$ *token* a cada lugar de saída p de t , onde $w(p,t)$ é o peso do arco e a quantidade de recursos a serem removidos.

O que sustenta algebricamente essa lógica são as equações de estado (Cassandras, 2008). As equações de estado aplicadas em uma RdP marcada com apresentado na Figura 2.6 analisa o fluxo de *tokens*. Assim, é possível entender o funcionamento das transições.

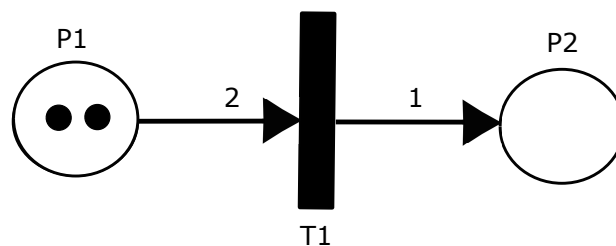


Figura 2.6: Dinâmica de disparo

A RdP da Figura 2.6 é marcada com $x = [2 \ 0]$ e possui matriz de incidência $M = [-2 \ 1]$, é possível perceber que após o disparo de $T1$ o que acontecerá algebricamente será $x' = x + uM$, assim sendo, $x' = [2 \ 0] + (1 \times [-2 \ 1]) = [0 \ 1]$, como ilustrado na Figura 2.7.

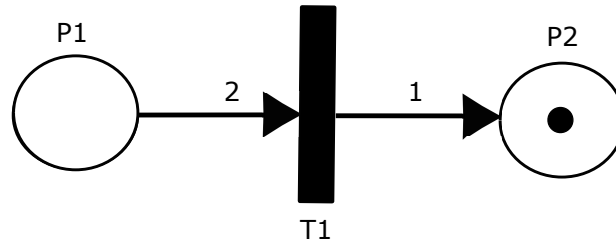


Figura 2.7: Condição pós disparo de uma rede

A marcação de uma RdP pode atribuir significados aos lugares, tokens e às transições. Essa atribuição depende do propósito do modelo. Por exemplo, na situação anterior, o lugar $P1$ poderia representar uma origem onde há dois trens, o lugar $P2$ o destino e a transição $T1$ o advento da composição de dois trens.

2.2.4 Características de uma Rede de Petri

A formalidade matemática presente nas RdP possibilitam verificar propriedades dos sistemas modelados como será apresentado em seguida (Lino e Sztajnberg, 2007). Segundo Murata (1989) existem dois tipos de propriedades podem ser estudados nas Redes de Petri: funcionais e estruturais.

2.2.4.1 Propriedades Funcionais

O primeiro tipo de propriedades é referido como propriedades de marcação dependentes ou funcionais, são as que dependem da marcação inicial, as propriedades mais comumente utilizadas serão descritas abaixo.

- Alcançabilidade (*Reachability*): a alcançabilidade é a base fundamental para estudar propriedades dinâmicas de qualquer sistema. Uma sequência de disparos

resulta em uma sequência de marcações, processo em que os *tokens* se movimentam ao longo da rede. Uma marcação M , é considerada alcançável a partir de uma marcação M_o se existe uma sequência de disparos que transforme M_o em M . O problema da alcançabilidade resume-se em determinar se uma marcação M_n pertence ou não ao conjunto de marcações que podem ser alcançadas desde a marcação inicial $R(M_o)$. O problema a análise de alcançabilidade ser factível, um grande impasse é a complexidade do cálculo, podendo atingir um limite exponencial.

- Limitação (*Boundedness*): uma Rede de Petri (N, M_o) é considerada limitada ou k -limitada se o número de marcações em cada lugar não exceder um número finito k para qualquer marcação alcançável a partir de M_o , isto é, $M(p) \leq k$ para todo lugar p e para toda marcação $M_n \in R(M_o)$. Se a Rede de Petri é 1-limitada, então pode-se dizer que a rede é segura (*safe*). Segurança é um caso especial da propriedade de limitação.
- Vivacidade (*Liveness*): vivacidade de uma Rede de Petri está diretamente ligada com a ausência de bloqueios (*deadlocks*). Estando uma rede impossibilitada de disparar pelo menos uma transição, ela estará bloqueada ou em *deadlock*. A vivacidade é uma propriedade ideal para muitos sistemas. Contudo, é impraticável e com elevado custo computacional verificar essa propriedade para alguns sistemas, como o sistema operacional de um grande computador. Assim, flexibiliza-se a condição de vivacidade e defini-se em diferentes níveis .

Uma transição t_i de uma rede $R(N, M_o)$ pode ser caracterizada como:

- Morta (L0-viva): se t nunca puder ser disparado em qualquer sequência de disparo em $L(M_o)$;
- L1-viva: se t_i pode ser disparada pelo menos uma vez em alguma sequência de $L(M_o)$;
- L2-viva: se, dado qualquer inteiro positivo k , t puder ser disparado pelo menos k vezes em alguma sequência de disparo em $L(M_o)$;
- L3-viva: se t aparecer infinitamente, muitas vezes em alguma sequência de disparo em $L(M_o)$;

- L4-viva ou viva: se t é L1-viva para cada marcação em $R(M_0)$.
- Reversibilidade (*Reversibility*): Uma Rede de Petri (N, M_0) é reversível se, para cada marcação M em $R(M_0)$, M_0 for alcançável a partir de M . Assim, em uma rede reversível, pode-se sempre retornar à marcação ou estado inicial. Em muitos casos, não é necessário voltar para o estado inicial, desde que se possa voltar a algum estado. Portanto, flexibiliza-se a condição de reversibilidade e defini-se um estado inicial. Uma marcação M' é considerada um estado de inicial se, para cada marcação M em $R(M_0)$, M' for alcançável a partir de M .
- Cobertura (*Coverability*): Uma marcação M em uma Rede de Petri (N, M_0) é dita ser coberta se existe uma marcação M' em $R(M_0)$ tal que $M'(p) \leq M(p)$ para cada p na rede. Cobertura está intimamente relacionada com a vivacidade L1-viva. Seja M a marcação mínima necessária para ativar uma transição t . Então t está morto (não é L1-vivo) se e somente se M não for coberta. Isto é, t é L1-vivo se e somente se M é coberto.

Uma Rede de Petri é estruturalmente limitada se está limitada para qualquer marcação inicial M_0 .

2.2.4.2 Propriedades Estruturais

São ditas propriedades estruturais:

- Conservação: Uma rede é conservativa se existe um vetor de ponderação de marcas x , onde $x(p)$ é um número inteiro positivo para todo lugar p , de modo que para cada marcação o produto escalar do vetor de marcação pelo vetor de ponderação é constante, isto é, $\forall M, M_0^T x$. Caso a rede apresente essa característica apenas para alguns lugares, será classificada como parcialmente conservativa. A conservatividade existirá, se e somente se, existir um n-vetor y de inteiros positivos, tal que: $A^T x = 0$, onde A é a matriz de incidência e $y \neq 0$ (Murata, 1989).
- Controlabilidade : Uma Rede de Petri é completamente controlável se qualquer marcação é alcançável a partir de uma dada marcação.

- **Vivacidade estrutural** : Uma rede é estruturalmente viva se existe uma marcação inicial viva.
- **Consistência** : A consistência existe quando há uma marcação M_0 e uma sequência de disparos σ de M_0 a M_D , tal que cada transição ocorre pelo menos uma vez em σ . Uma rede é consistente, se e somente se, existem um n -vetor y de inteiros positivos tal que se cumpra que: $Ay = 0$, onde A é a matriz de incidência e $y \neq 0$.
- **Invariantes** : Estas propriedades representam os elementos conservativos e repetitivos da rede. Existem os invariantes de lugar e os invariantes de transição.

2.2.5 Classificação Geral de Redes de Petri

As variações das redes de Petri surgiram com a necessidade de adaptação da RdP clássicas à especificidade da aplicação para as quais a sua utilização era desejada. O modelo original da RdP falha na representação de duas importantes características: aspectos funcionais complexos, tais como, condições que determinam o fluxo de controle, e os aspectos de temporização (Morasca *et al.*, 1991). Para contornar tais limitações três classes de extensões às RdP foram desenvolvidas: as RdP temporizadas, as RdP Hierárquicas e as RdP Coloridas.

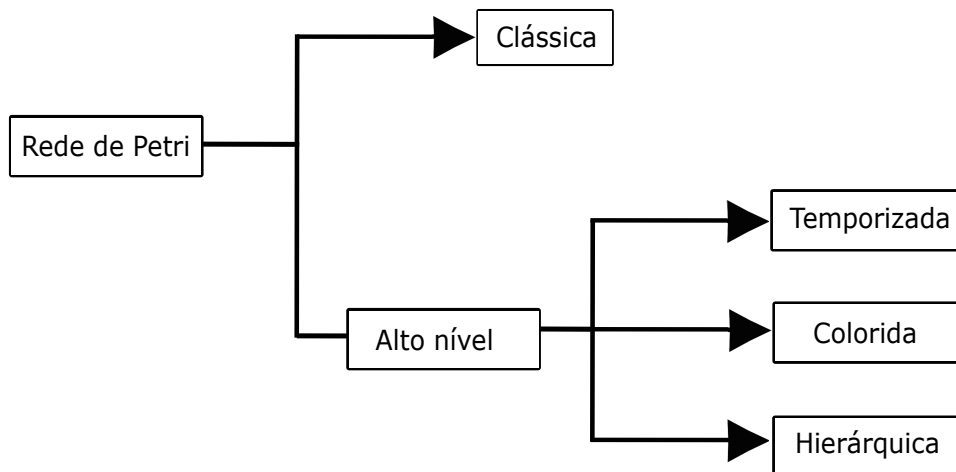


Figura 2.8: Classificação de Redes de Petri

2.2.5.1 Rede de Petri Temporizada

As RdP temporizadas foram criadas como extensão da RdP original com a intenção de ser mais representativa ao acrescentar análises no domínio do tempo (Holloway *et al.*, 1997). Os tempos podem ser também determinísticos ou estocásticos (regidos por distribuições de probabilidades que representam pseudo aleatoriedades do sistema real). A abordagem temporal normalmente está associada aos lugares (rede p-temporizada) ou às transições (rede t-temporizada).

- Rede de Petri P-Temporizada: quando a informação de tempo está associada aos lugares. Usualmente, corresponde a uma indicação do tempo que o recurso deve permanecer naquele lugar antes de ser utilizada para a habilitação das transições sucessoras do lugar em questão.
- Rede de Petri T-Temporizada: quando o tempo é associado as transições a indicação refere-se, de modo geral, ao tempo em que uma atividade/ação leva para ser executada.

2.2.5.2 Rede de Petri Hierárquica

O conceito de hierarquia em rede de Petri permite o refinamento de lugares e transições, possibilitando a modelagem de sistemas de grandes dimensões. Do ponto de vista teórico, a hierarquia é apenas um conveniência gráfica que não adiciona nenhum poder computacional. Contudo, para a modelagem segura de grandes sistemas, é necessário o uso de ferramentas com esses mecanismos. Nessa classe de rede, os lugares e as transições de um nível superior podem ser refinados, ou seja, podem ser sub-redes da sua rede global.

2.2.5.3 Rede de Petri Colorida

Em uma RdP convencional todos os *tokens* possuem as mesmas características. Isso faz com que não seja possível diferenciar recursos. Entre a década de 70 e 80, as

RdP foram estendidas considerando o conceito de dados e hierarquia, surgindo assim, a rede de Petri colorida e hierárquica (Van der Aalst, 1998).

A rede de Petri colorida (RdPc) incorpora tipos de dados (conjunto finito de cores) aos *tokens* para representar diferentes tipos de recurso e podem utilizar decomposição hierárquica, sem perder a consistência lógica/matemática da RdP formal, além de reduzir expressivamente o número de lugares e transições de uma rede por representar processos ou recursos distintos em uma mesma sub-rede (Jensen, 2013).

Inicialmente, os tokens da RdPc eram representados por cores ou mesmo por padrões que possibilitam a distinção de cada uma, e atualmente as representações de cor foram substituídas por estruturas de dados complexas não relacionando cores, a não ser pelo fato de que estes são distinguíveis. Desse modo, os *tokens* podem conter informações de diversas formas.

Entende-se que para compreender a definição formal de uma RdPc é necessário compreender os conceitos de: multiconjunto e expressões.

A estrutura de uma Rede de Petri Colorida é composta por:

- um conjunto finito $P = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ de lugares;
- um conjunto finito de transições $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ não nulo;
- um conjunto (possivelmente vazio) $E' \subset E$ de transições imediatas;
- um conjunto U finito de cores com uma enumeração fixa;
- uma função de incidência de entrada w^- e uma função de incidência de saída w^+ , cada um definido em $(\{e\} \times U_E(e) \times \{d\} \times U_D(d))$ assumindo valores inteiros não negativos.
- domínio das cores $U_d(d) \subseteq U$ para $d \in D$ e $U_E(e) \subseteq U$ para $e \in E$;

A Figura 2.9 apresenta um exemplo simplificado de uma Rede de Petri Colorida, onde os *tokens* são identificados apenas por cores. Entretanto, estas podem ser estruturas mais complexas. Na Figura 2.9 os arcos são rotulados com cores (a, b e c). Para

que uma transição desta rede esteja habilitada, é necessário que um lugar de entrada orientado a uma transição tenha fichas coloridas de acordo com a especificação do arco para que a transição consuma esses recursos e dispare uma ficha colorida obedecendo a cor estipulada no arco de saída. A transição $T1$ está habilitada porque existem fichas suficientes nos lugares $P1$ e $P2$ que satisfazem o peso do arco, no caso duas fichas em ambos lugares. O disparo desta transição retira as fichas de cores associadas aos arcos dos lugares de entrada e adiciona fichas da cor associada ao arco que liga a transição aos lugares de saída. Desse modo, uma ficha de cor amarela é acrescentada ao lugar $P3$.

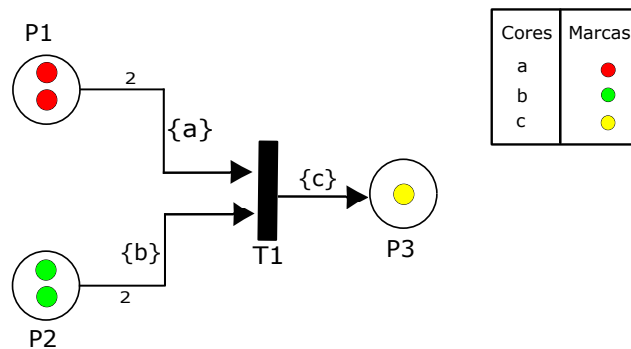


Figura 2.9: Exemplo de uma Rede de Petri Colorida

Diversas técnicas de análise têm sido desenvolvidas na área teórica de Rede de Petri e na maioria das vezes essas técnicas são baseadas no modelo básico de uma Rede de Petri. Muitas delas foram estendidas para analisar redes de alto nível, como por exemplo, o grafo de alcançabilidade. Contudo, é válido ressaltar que, essas análises são possíveis desde que o número de cores seja pequeno, pois uma rede de alto nível pode ser modelada em uma rede de Petri equivalente, mas muito maior, sem cores. Essa conversão de uma rede colorida em uma rede comum foi estudada para ver como os métodos de análise para redes de alto nível devem funcionar (Li *et al.*, 2012).

CAPÍTULO 3

Estudo de Caso

Neste capítulo, o panorama de onde o estudo foi realizado será descrito para maior compreensão do problema abordado nesse trabalho.

3.1 Descrição

A subconcessionária Ferrovia Norte Sul, atualmente controlada pela VLI, com extensão de 720 km de linha férrea está localizada entre Açailândia (MA) e Porto Nacional (TO). Apresenta-se como uma importante rota de exportação de cargas das regiões Centro-Oeste e Nordeste, por sua conexão com a Estrada de Ferro Carajás, de propriedade da Vale. Compreendendo os estados do Tocantins e Maranhão, o corredor possibilita o escoamento da produção de grãos do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) e região do Mato Grosso, Pará e Goiás, pelo Terminal Portuário São Luís. Em 2018 e 2019, cerca de 10% das exportações brasileiras de soja passaram pelo porto de São Luís, MA (ANTAC, 2020).

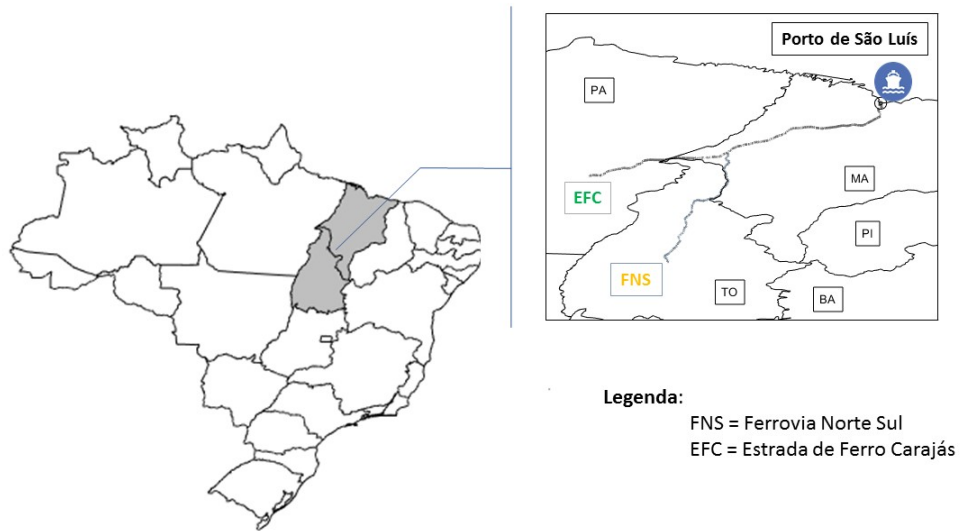


Figura 3.1: Malha ferroviária do Norte do Brasil.

Os destinos das cargas transportadas nesse trecho são: Terminal Marítimo de Ponta da Madeira e o Porto do Itaqui, ambos em São Luís (MA). Dentre as principais cargas transportadas encontram-se soja, celulose, milho, álcool e gasolina.

O Terminal Marítimo de Ponta da Madeira possui 4 berços, possui píer do tipo discreto e tem capacidade para armazenar 9281000 toneladas, os canais possuem equipamentos com capacidade de 56000 toneladas/hora para graneis sólidos. Já o Porto de Itaqui possui oito berços operacionais com profundidades que variam de 12 a 19 metros, permitindo a atracação de navios de grande porte. Tem vocação para movimentação de graneis sólidos e líquidos.

A abordagem deste trabalho será concentrada no transporte de soja, celulose e combustível. A escolha dos três produtos se deu baseada na representatividade em termos percentuais de volume transportado em 2018, 87,3% de toda carga transportada (ANTT, 2019). Outro fator que subsidia a escolha dos produtos a serem analisados é a evolução histórica e importância estratégica, como mostrado na Figura 3.1.

Soja e celulose são exemplos de sucesso brasileiro no comércio mundial. O Brasil ultrapassou o Canadá em volume exportado de celulose para papel em 2013,

tornando-se o maior exportador do mundo, atingindo 24% do total exportado em 2018 (FAO, 2020). Desde 2017, o Brasil é o maior exportador mundial de soja (Departamento de Agricultura dos EUA, 2019), com a China como destino principal recebendo 66% da soja brasileira exportada em 2019 (FAO, 2020).

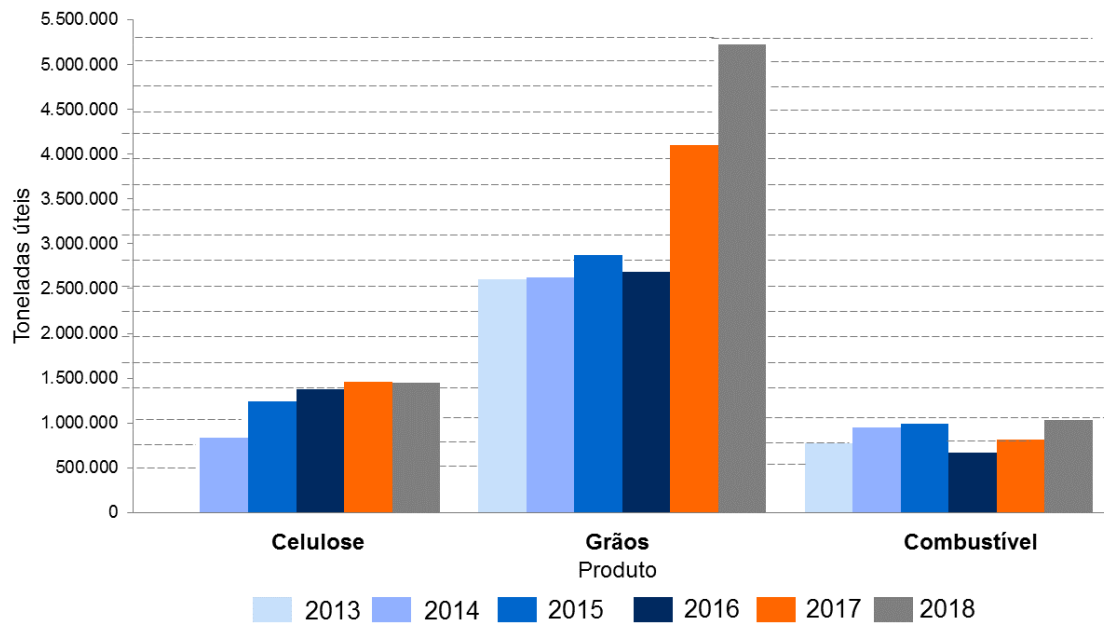


Figura 3.2: Volume de carga transportada (ANTT, 2019)

O planejamento de operação de uma ferrovia é feito a longo prazo, considerando investimento em ativos pesados e de alto valor agregado, como por exemplo: construção de terminais de carga, compra de vagões e/ou locomotivas, melhoria de infraestrutura da malha ferroviária etc. Grãos e celulose trafegam no sentido de exportação e o combustível no sentido de importação, sendo assim em fluxos opostos, o que aumenta a complexidade de operação na região Norte do país.

Modelo da Ferrovia Norte Sul

Este capítulo apresenta modelos conceituais e de rede de Petri construídos para descrever o ambiente de transporte ferroviário de carga. Foram desenvolvidos durante o trabalho, dois modelos diferentes para reproduzir os processos. A Tabela 4.1 resume os dois modelos: básico e estendido com suas diferentes estruturas. Em números absolutos o número de lugares, transições e arcos não aumentaram proporcionalmente a complexidade do modelo mas a codificação das transições se tornaram muito mais complexas como será descrito no decorrer do trabalho, importante mencionar que a rede desse trabalho é T-Temporizada, ou seja, os tempos são atribuídos as transições.

Os modelos seguiram uma ordem cronológica na evolução do trabalho, apresentando um crescimento na complexidade e acurácia. O primeiro modelo (básico) tratou os processos de forma macro para validar a ideia inicial. Enquanto o segundo modelo (estendido), acrescentou um tipo de produto ao modelo inicial. Assim, o segundo modelo é o mais completo, pois, através de um nível maior de abstração foi possível realizar análises mais elaboradas do ambiente simulado. As condições de disparo serão explicitadas decorrer do texto, uma vez que em uma RdPc relações de dependência, condições específicas são codificadas nas transições e podem não ser claras observando o modelo visual de uma RdP.

Modelo	Lugares	Transições	Arcos
Básico	15	17	35
Estendido	40	52	102

Tabela 4.1: Estrutura básica dos modelos

4.1 Modelo Conceitual Básico

Inicialmente, foi desenvolvido um modelo conceitual simplificado a fim de validar a proposta de utilizar uma rede de Petri colorida, somente grãos e celulose foram representados.

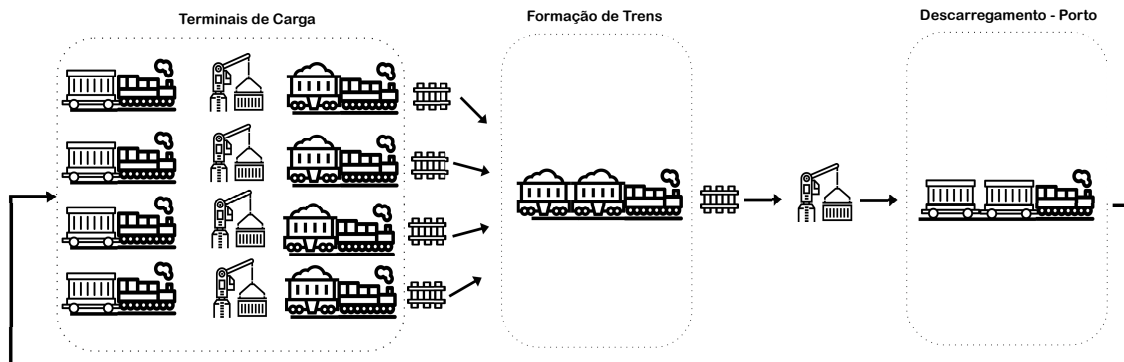


Figura 4.1: Modelo conceitual do fluxo de transporte ferroviário simplificado - FNS.

A Figura 4.1 ilustra o primeiro modelo adotado. Neste modelo, há três terminais de origem que carregam grãos e um que carrega celulose. Após o carregamento, os trens passam por um processo de composição onde se juntam para adentrar na ferrovia Estrada de Ferro Carajás (EFC). Em seguida, a composição chega até ao porto onde ocorre a separação dos trens e posteriormente descarga. Quando vazios, os trens se juntam novamente em direção as suas respectivas origens e ao chegar se separam, esse fluxo acontece obedecendo a disponibilidade de trens para o transporte das cargas existentes.

Os trens de grãos são compostos por 80 vagões e os trens de celulose por 72 vagões. O giro nos terminais representa o tempo de execução de uma série de atividades que ocorrem no intervalo entre a chegada do trem vazio no terminal de carga e a saída do trem carregado ou o contrário. Denominamos de *transit time* o tempo de deslocamento de um trem ou uma composição entre dois pontos, incluindo qualquer outro processo ocorrido durante o deslocamento.

A Tabela 4.2 contém a descrição das principais siglas do modelo para melhor compreensão.

Sigla	Significado
PIN	Grão - Porto Nacional
PIP	Grão - Palmeirante
COMB	Combustível
PSU	Celulose
PPF	Grão - Porto Franco

Tabela 4.2: Siglas básicas

4.2 Rede de Petri - Modelo básico

De forma geral, cada *token* na rdP representa um tipo de trem, alguns lugares representam localizações geográficas e outros são apenas artifícios na modelagem para manipular os trens e garantir determinadas condições, as transições coordenam os movimentos dos trens. O giro no terminal de carregamento é representado pelas transições t1, t2, t3 e t4. Dentro do giro há diversas atividades, como por exemplo: recepção de trem, inspeção de vagões, carregamento, dentre outros.

As transições mencionadas, são habilitadas quando há trens nos terminais de origem e disparam segundo o tempo estimado em orçamento pela equipe técnica que tomou como base os históricos de tempo, de forma determinística. Os terminais PIN, PIP, PPF transportam grãos e o terminal PSU celulose, essa distinção é de suma importância para compreensão do modelo, considerando que as transições serão ativadas ou não baseadas nas cores dos *tokens*, nesse caso, nome de cada origem. A quantidade de trens em cada origem é definida mediante a demanda informada pela área comercial a partir de demandas mensais dos cliente.

Conforme se observa na Figura 4.2, as transições t10, t11, t12 e t13 são habilitadas caso haja *tokens* suficientes nos lugares que as antecedem, os estados C_PIN, C_PIP, C_PPF e C_PSU são estados que representam os trens carregados. Após executar todos os processos de giro os trens estarão aptos para seguir em direção à PIZ (Imperatriz - MA), os tempos de disparo são tempos de *transit time*. Por sua vez, em PIZ haverá formação de fila, dado que, a composição necessita de dois trens, respeitando as regras de formação que serão expostas abaixo.

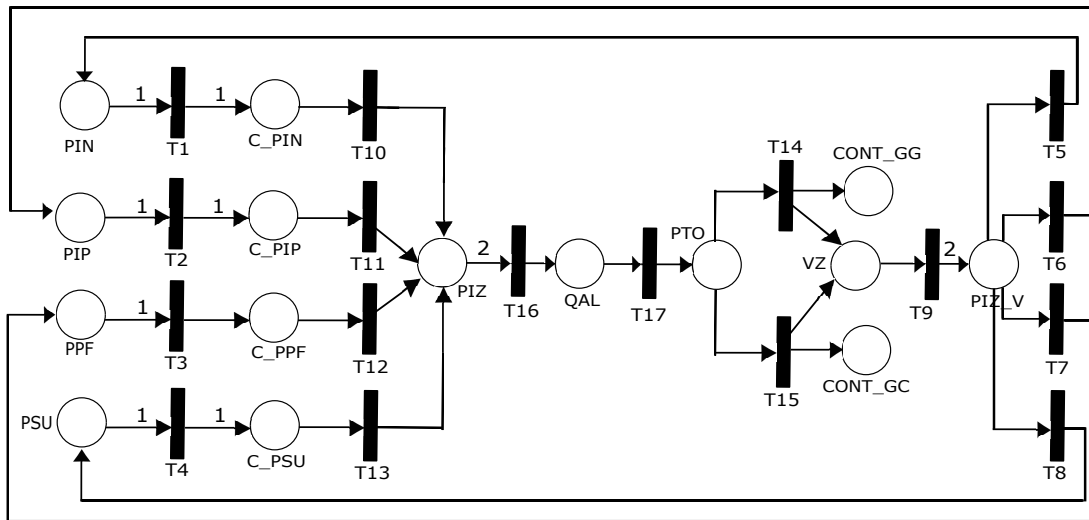


Figura 4.2: Rede de Petri: sistema simplificado.

Para adentrar na EFC em direção ao porto é necessário que os trens se juntem, formando uma composição. Assim, trens advindos da Ferrovia Norte Sul (FNS) se conectam e formam conjuntos de 160 ou 152 vagões, essa variação se dá pelas diferentes condições que serão detalhadas abaixo.

Em sequência, a transição t16 representa o tempo de *transit time* entre PIZ e QAL. Por conseguinte, a transição t17 demonstra a dinâmica do fluxo ferroviário prosseguindo para o Porto segundo a política de FIFO (*First in First Out*), onde um trem é enviado por vez para o Porto, de acordo com a disponibilidade dos mesmos em QAL. As transições t14 e t15 representam o tempo de descarregamento no porto, a diferença entre ambas existe uma vez que o tempo de descarregamento dos trens de grãos é diferente dos trens de celulose.

Importante ressaltar que, explorando uma característica da rede de Petri colorida, as transições são ativadas de acordo com o mix de cores especificadas *a priori*. Na Figura 4.3, será detalhado quais os critérios utilizados pelas transições t14 e t15.

A composição de trens que transporta celulose, é encaminhada para a transição t15. De outra forma a composição formada puramente por trens que transportam grãos é direcionada para a transição t14. É válido ressaltar que, uma das premissas do modelo é que cada origem fornece somente um tipo de produto sendo grão ou celulose, por

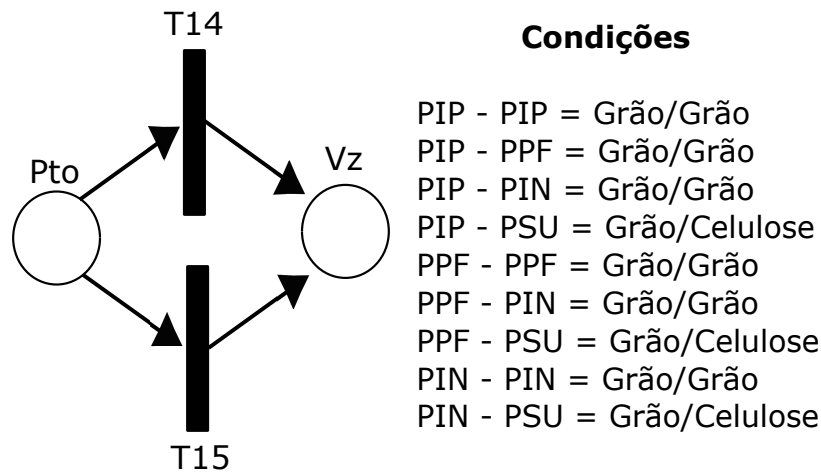


Figura 4.3: Descrição das transições T14 / T15.

exemplo, PIP é uma origem apenas de grão e PSU apenas de celulose.

Em sequência, após o disparo de uma das duas transições mencionadas na Figura 4.3, um *token* será armazenado em CONT_GG ou CONT_GC, seguindo a mesma regra das transições citadas anteriormente. Esses lugares são criados com o intuito de registrar a quantidade de trens que descarregaram no porto e sua respectiva origem. A mesma composição registrada, segue em direção a VZ, lugar que recebe os trens vazios após descarregamento no porto.

Posteriormente, após disponível em VZ, a transição t9 é ativada e a composição segue em direção a PIZ_V. Ao chegar em PIZ_V a composição é segregada para se recompor e adentrar na FNS.

É válido ressaltar que, a transição t9 descreve o *transit time* do porto até Imperatriz e desmembramento dos trens que anteriormente estavam compostos (160/152 vagões) em dois trens, como no formato original quando saíram de suas origens.

As transições t5,t6,t7 e t8 por sua vez, representam o retorno dos trens vazios após o descarregamento no porto para as origens. Assim, finalizando o ciclo, essas transições disparam caso haja tokens disponíveis em PIZ_V cuja cor esteja vinculada à sua origem. Um exemplo seria: *token* disponível em PIZ_V com cor PIP e outro com cor PPF, as transições t6 e t7 serão habilitadas de acordo com a cor do *token* e sua respectiva origem, assim, será atribuído tempo de transporte do trem vazio partindo de

Imperatriz até seu destino correspondente.

Diante do exposto, percebe-se que a modelagem do sistema ainda que pequena, requer muito cuidado, pois para os resultados representarem exatamente o que os analistas ferroviários descreviam, todas as transições deveriam manipular as cores de forma precisa para que eventos infactíveis não ocorressem. Por esse motivo, se faz necessário analisar todas as etapas do sistema de forma específica e modular, evitando erros nesta fase.

4.2.1 Modelo Conceitual - Expandido

Dando sequência a esse trabalho, foi incorporado ao modelo inicial da Figura 4.2 o fluxo do transporte de combustível, visando agregar maiores detalhes no transporte ferroviário da FNS. Para tanto, processos antes agrupados serão representados de forma individual, garantindo uma análise mais real e efetiva.

Em termos gerais, foi adicionado um novo produto a ser transportado que opera em fluxo contrário aos demais, ou seja, em sentido de importação. Conforme será apresentado na Figura 4.4, o combustível transportado é carregado no porto de São Luís - MA e tem como destino os estados vizinhos. Nesse tipo de transporte, os vagões são específicos e um trem é composto por um número menor de vagões em relação aos trens de grãos e celulose.

É válido ressaltar que antes desse trabalho ser realizado, não era sabido como o transporte de combustível poderia interferir no volume de grãos, o principal produto da companhia. Esse questionamento é pertinente e nada trivial, visto que há muitos processos envolvidos simultaneamente e os modelos de simulação existentes só permitem compreender terminais e pontos específicos no decorrer da malha ferroviária, onde há cruzamento de trens.

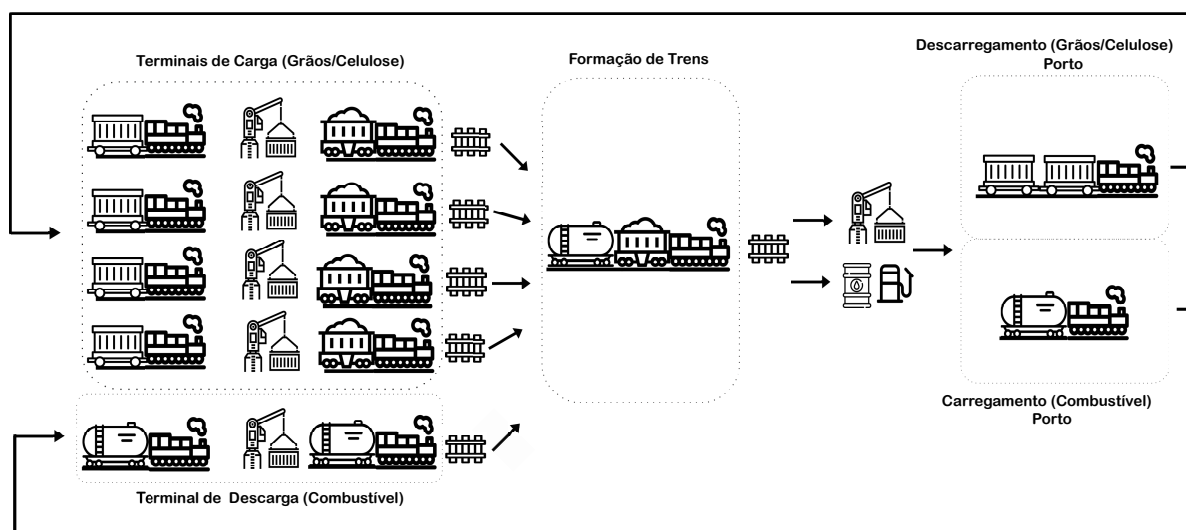


Figura 4.4: Modelo conceitual do fluxo de transporte ferroviário completo - FNS.

4.3 Rede de Petri Expandida

Esta seção apresenta de forma detalhada o modelo expandido. A descrição será feita em etapas para facilitar o entendimento do mesmo.

4.3.1 Modelo de terminais próprios

A Figura 4.5 representa o modelo de terminais próprios da companhia em estudo e também premissas de processos importantes. Sendo que, os lugares COMB, PSU, PIN, PIP e PPF são terminais de carga e em cada um deles há um número de trens alocados para atender a demanda esperada. O terminal de PSU armazena celulose e PIN/ PIP/ PPF grãos. Diferente dos outros lugares citados, COMB é um terminal que tem como produto o combustível, onde há descarregamento para posterior distribuição no Norte do país.

As transições t_1, t_2, t_3 e t_4 representam os tempos de giro em seus respectivos terminais, esse tempo de giro é composto por uma série de atividades (recepção, retenção em fila, carregamento e formação do trem). Cada terminal possui capacidade de carregar somente um trem por vez. Na transição t_4 que representa o tempo de giro do

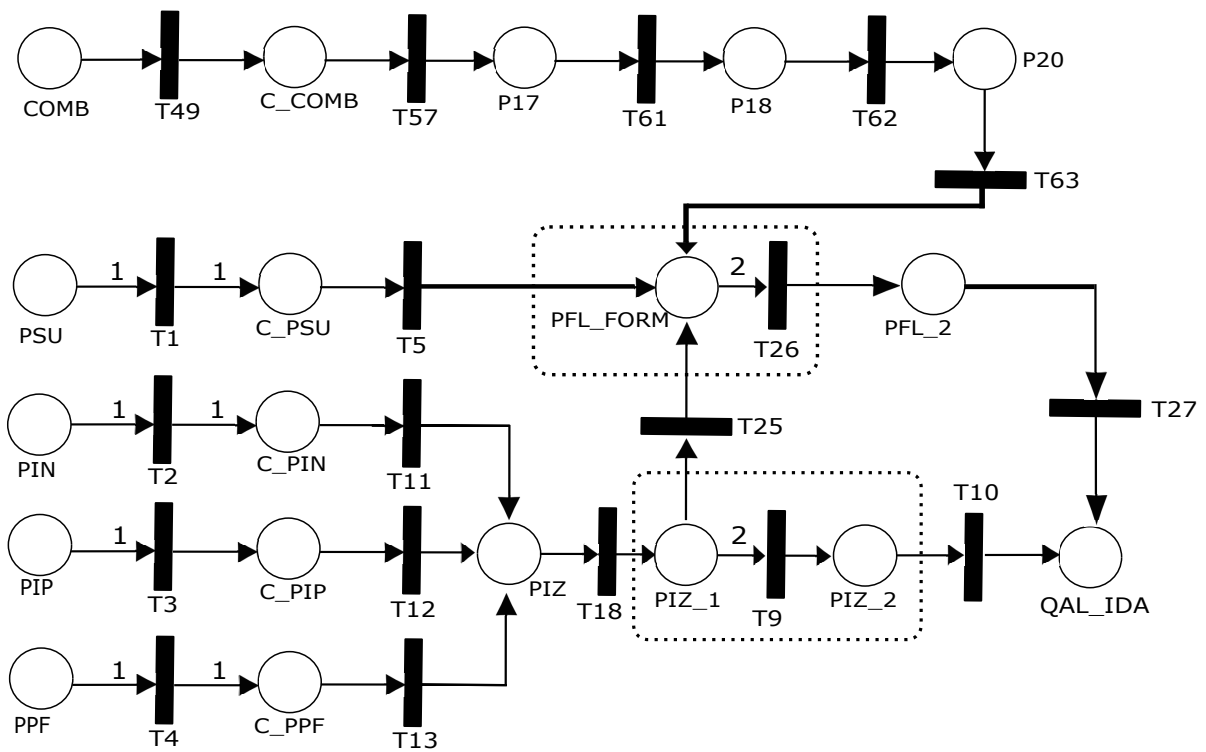


Figura 4.5: Carregamento, descarregamento e composição - FNS

combustível, as atividades são semelhantes, contudo, ocorre o descarregamento e assim como nos outros terminais, apenas um tipo de produto é operado.

É importante lembrar que, cada *token* possui a cor de sua origem, apesar de existirem três origens que carregam o mesmo produto (grão) o recurso é cativo e não atende outros terminais, ainda que vazios, seguindo uma premissa do modelo.

Em sequência, as transições t11, t12 e t13 representam o *transit time* somado à troca de maquinistas, que ocorre entre as origens e PIZ. Ao chegar em PIZ, os trens são abastecidos (T18) e os trens de grão ficam disponíveis em PIZ_1. A transição t5 é o *transit time* entre PSU e PFL_FORM.

Enquanto que no transporte de combustível, as transições t57, t61, t62, t63 e t69 retratam o *transit time* entre pátios de cruzamento localizados ao longo da ferrovia, os tempos estão discriminados separadamente a fim de evitar gargalos inexistentes no dia a dia operacional e que poderiam inviabilizar o modelo.

Em continuidade ao modelo, é preciso esclarecer as regras utilizadas pela empresa para a composição dos trens.

Primeiramente a transição t_9 só será disparada caso haja dois trens de grão disponíveis em PIZ_1 independente da cor do *token*. Na hipótese de haver apenas um trem de grão disponível em PIZ_1 . A transição t_{25} será ativada, desde que haja trem de celulose ou combustível disponível em PFL_FORM para formar a composição. Essa transição representa o *transit time* entre PIZ_1 e PFL_FORM .

Sendo possível a formação da composição após o disparo de t_{25} , a transição t_{26} poderá disparar e ocorrerá a formação da composição, que poderá ser grão/celulose ou grão/combustível. Sendo que, a composição de grãos (t_9) pode ocorrer paralelamente a uma composição de celulose e combustível (t_{26}).

É importante ressaltar que, a transição t_{26} também poderá ser disparada caso haja dois trens em PFL_FORM sendo um de celulose e outro de combustível. Contudo, não será disparada se houver apenas dois trens de celulose ou dois trens de combustível.

Por fim, as transições t_{10} e t_{27} são temporizadas de acordo com o *transit time* entre os locais de formação e QAL_IDA .

4.3.2 Modelo do porto

Para melhor compreensão da dinâmica do processo de carregamento e descarregamento no porto, vejamos a Figura 4.6.

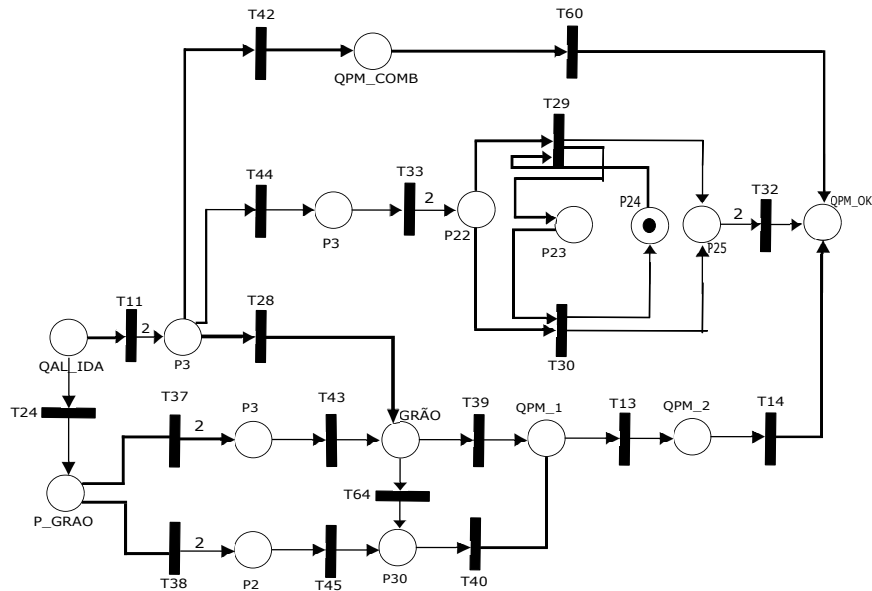


Figura 4.6: Processo de carga e descarga - porto.

Ao chegar em QAL_IDA, os trens estão conectados entre si, formando uma composição. A transição t24 é disparada somente se, a composição estiver transportando grão. Enquanto que a transição t11 é disparada apenas quando a composição não é formada apenas por grãos.

As transições t37 e t38 são randomizadas com um peso de 80% para t37 e 20% para t38, essa etapa foi implementada para capturar o envio de cargas para terminais diferentes ou para o mesmo terminal, os pesos foram definidos com base no histórico de destino dos trens adotado pela empresa.

É importante mencionar que, quando uma composição de trem de grãos é sorteada na transição t37 e chega no lugar GRÃO, existe a possibilidade de paralelamente descarregar em terminais diferentes, por isso, as transições t39 e t40 contêm tempos de descarga diferentes nos terminais sediados em São Luís - MA. Caso a transição sorteada seja a t38, a composição de grãos será segregada e direcionada para um terminal que

possui capacidade de carregamento de apenas um trem, gerando assim fila em P30.

Em sequência, as transições t13 e t14 representam processos pós descarregamento, manobra e inspeção dos trens de grão. A partir daí, os trens ficam disponíveis em QPM_OK, esperando outros trens para formar uma nova composição e assim regressar às origens.

Por conseguinte, a transição t28 é disparada após o trem de grão se separar do trem de combustível ou celulose. A transição t44 é disparada apenas com o trem de celulose e a t42 apenas combustível. Essa separação no porto ocorre porque o processo de carga e descarga é diferente por tipo de produto.

O carregamento dos trens de combustível é temporizado pela transição t60. Após o carregamento, o trem de combustível está disponível para se juntar a qualquer outro em QPM_OK.

Em contrapartida, o fluxo da celulose no porto se dá quando a transição t33 é disparada e divide o trem de celulose de 72 vagões em dois lotes de 36, considerando que o terminal de descarga só comporta 36 vagões por vez. Nesse modelo, foi implementado uma estrutura de controle para garantir que um lote descarregue e o segundo só comece o descarregamento após o primeiro terminar totalmente e assim se juntar novamente em um trem de 72 vagões, seguindo posteriormente para QPM_OK.

4.3.3 Fluxo de retorno

Seguindo o modelo, os trens disponíveis em QPM_OK se juntam para adentrar na Estrada de Ferro Carajás seguindo a política de FIFO. A transição t15 representa o *transit time* entre QPM e QAL, enquanto que, a transição t16 é o *transit time* entre QAL e PFL.

Em PFL caso haja na composição existente algum trem de celulose, o mesmo é separado e a transição t36 é disparada com o *transit time* entre PFL e PSU e o trem de celulose retorna à sua origem inicial para carregar novamente. O trem que anteriormente estava conectado a um trem de celulose se desloca em direção a PIZ_VOLTA. Se o mix de cargas que passa por PFL não conter celulose a transição t34 é ativada e o tempo de

deslocamento é computado, essa operação é apresentada na Figura 4.7.

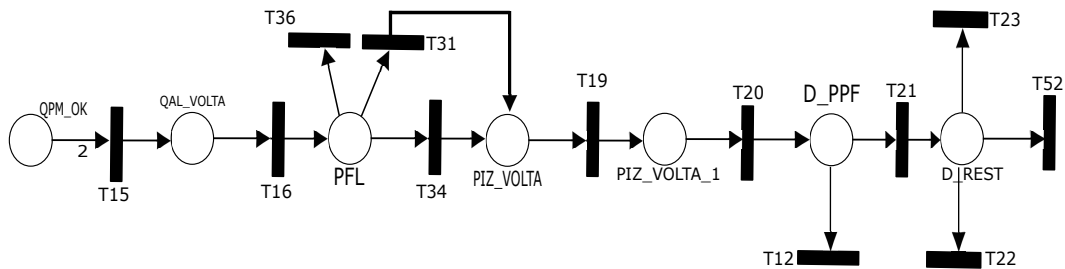


Figura 4.7: Processo volta - porto/origens.

Um processo necessário para manutenção da ferrovia é feito em t19. Em seguida o tempo de deslocamento entre PIZ e PPF é atribuído a t20. Caso exista trem pertencente a PPF, o mesmo é direcionado à origem através da transição t12. De outra forma, o trem ou a composição que continuam seu trajeto com os tempos de *transit time* são desmembrados em P_REST de acordo com a sua cor, assim termina um ciclo de transporte que ocorre diversas vezes em um mês.

Ressalta-se que, todas as regras de funcionamento são implementadas via linha de código através do simulador GPenSIM. Assim, saídas importantes para o planejamento de logo prazo são: volume estimado, gargalos relevantes e alocação de ativos para possíveis aquisições para melhor performance de transporte. A Figura 4.8 apresenta a rede modelada como um todo para melhor compreensão.

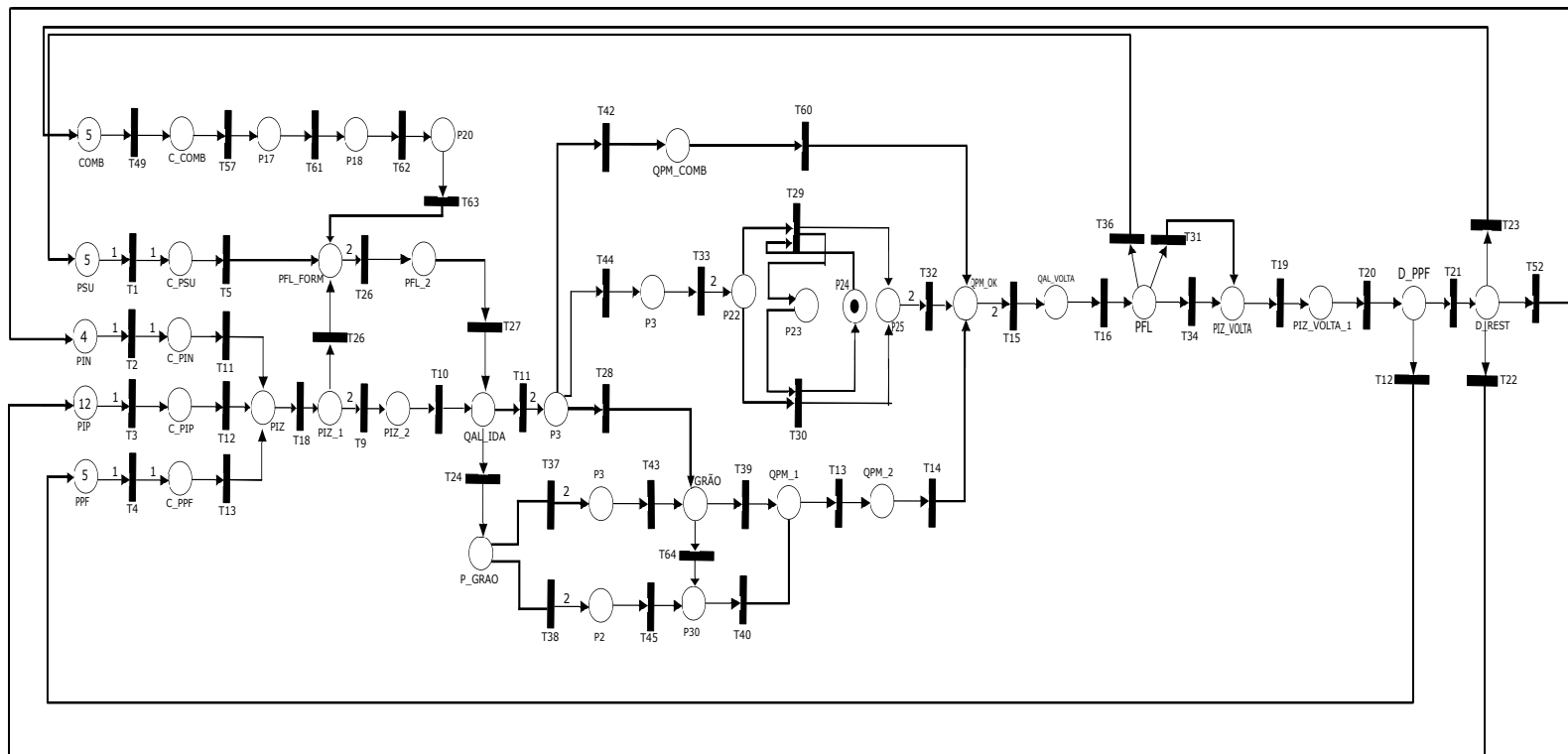


Figura 4.8: Rede de Petri do sistema expandido

CAPÍTULO 5

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados da simulação do modelo das redes de Petri criado para o transporte de diferentes cargas no modal ferroviário.

5.1 Parâmetros do modelo

Para realizar o experimento computacional foram analisados os históricos mensais de tempo nos terminais e na ferrovia e na simulação, foi considerado um período específico do ano onde há alta demanda de carga. Importante esclarecer que, os tempos não foram divulgados integralmente nesta seção por questões estratégicas e confidenciais da empresa em estudo. Outra premissa importante a ser considerada é que, os trens sempre tem como destino a sua origem.

A simulação foi realizada utilizando o simulador GPenSIM, um dos primeiros simuladores desenvolvidos em Matlab para Redes de Petri, facilitando o trabalho com o *toolbox* de estatística, codificação total de todas as transições, gratuito, documentação detalhada e já utilizado em outros contextos (Davidrajuh, 2017; Davidrajuh e Krenczyk, 2019). Os experimentos foram realizados em um computador com processador Intel Core I7, 7th e 8 Gb de Memória RAM. Foi considerado como aquecimento (*warm-up*) um mês de transporte.

5.2 Análise e resultados do Modelo básico

O *output* do modelo representa a produção mensal total de carga transportada. A soma da quantidade de carga transportada por cada trem de grãos N_{TG} , pelo conjunto de trens de celulose N_{TC} e trens de combustível N_{Tcomb} , resulta na seguinte equação de volume:

$$V = N_{TG} \times (PM_g \times QT_g) + N_{TC} \times (PM_c \times QT_c) + N_{Tcomb} \times (PM_{comb} \times QT_{comb}) \quad (5.1)$$

Onde:

- PM_{comb} = Peso médio - trem de combustível (toneladas);
- PM_c = Peso médio - trem de celulose (toneladas);
- PM_g = Peso médio - trem de grão (toneladas);
- QT_g = Quantidade de vagões de grãos (unidades);
- QT_c = Quantidade de vagões de celulose (unidades);
- QT_{comb} = Quantidade de vagões de combustível (unidades);
- N_{TG} = Número de trens de grãos (unidades);
- N_{TC} = Número de trens de celulose (unidades);
- N_{Tcomb} = Número de trens de combustível (unidades);

Para calcular o volume transportado foi verificado quantos *tokens* foram depositados nos lugares CONT_GG e CONT_GC, contadores que armazenam *tokens* coloridos, com suas respectivas origens, consequentemente, seus produtos transportados.

Os resultados da simulação são mostrados na Figura 5.1, o tempo de execução foi de 7 segundos e simulou 720 horas de transporte de carga. O desempenho computacional deste modelo inicial foi expressivo quando comparado a softwares comerciais

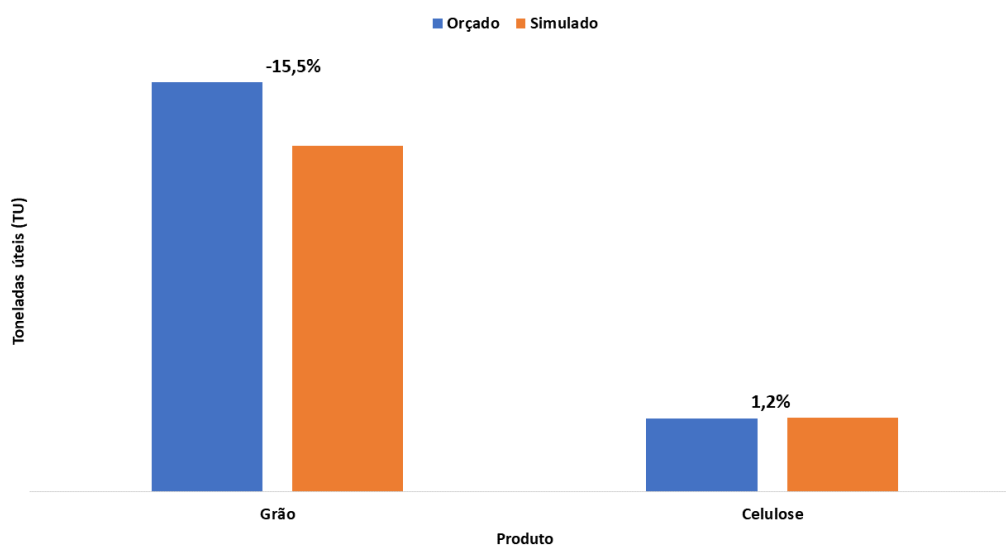


Figura 5.1: Validação de resultados: modelo básico.

de simulação, no entanto, houve uma diferença significativa no volume final de grãos transportado. Após investigar os motivos pelos quais os resultados não representavam o volume orçado, tendo em vista que as parcelas de tempo eram determinísticas e o número era idêntico ao praticado pela equipe técnica, chegou-se à conclusão que a rdP estava duplicando tempo de espera.

Assim, os dados que estavam sendo utilizados para definir os tempos das transições continham tempo de espera, durante a simulação ocorria filas, o que duplicava o tempo de espera e assim impedia os trens de transportarem a quantidade de grãos esperada. Optou-se então, por modelar o fluxo de transporte com maior nível de abstração para compreender cada etapa do processo para evitar sobreposição de tempo de espera nas transições temporizadas.

5.3 Análise e resultados do Modelo Expandido

Nesta seção será realizada uma análise de sensibilidade no tempo das transições para avaliar o impacto no volume transportado. É válido ressaltar que, as variações nos

testes a seguir foram realizadas com base nas premissas estipuladas pela empresa, uma vez que o modelo não é otimizado.

5.3.1 Validação do modelo expandido

Para validar a hipótese de que o modelo expandido teria melhores resultados ao detalhar melhor os processos, foi realizada uma análise de volume por origem como mostrado na Figura 5.2.

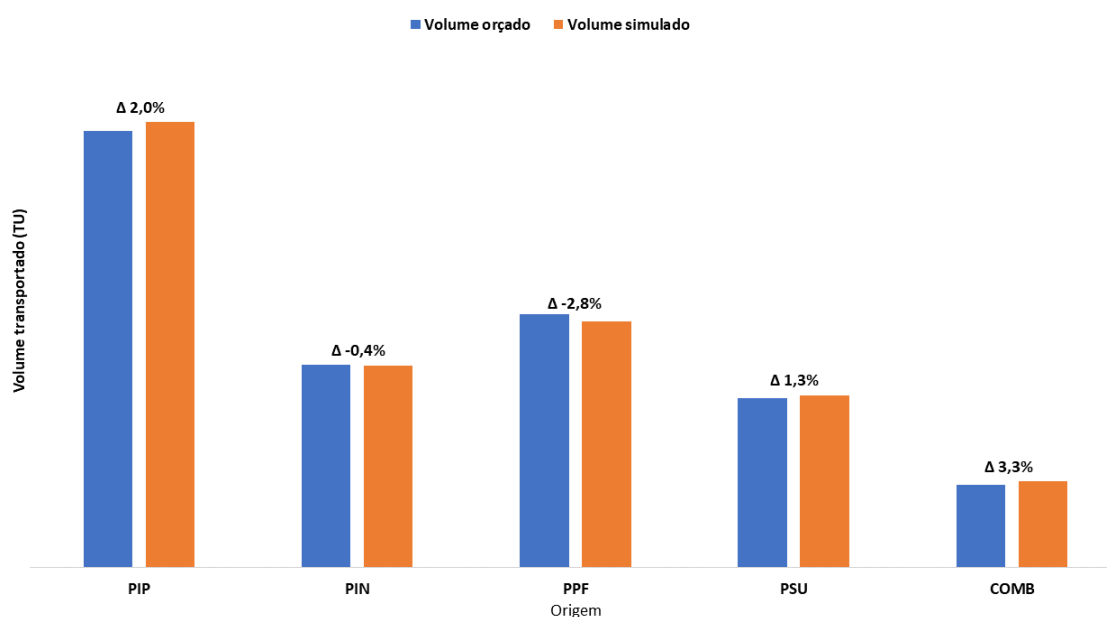


Figura 5.2: Validação de volume transportado por origem: modelo expandido.

Como pode ser observado, os resultados do modelo apresentaram uma excelente performance quando comparado ao volume planejado. O tempo de execução computacional do modelo foi de 163 segundos. Essa etapa foi fundamental, pois dado a assertividade do modelo, foi possível variar recursos e tempos, oferecendo importantes *insights*.

A Figura 5.3 apresenta de forma gráfica como o número de trens varia no decorrer da simulação em P30 e GRAO como mencionado anteriormente. Percebe-se que, após 300 horas de simulação o sistema já se comporta de forma mais regular.

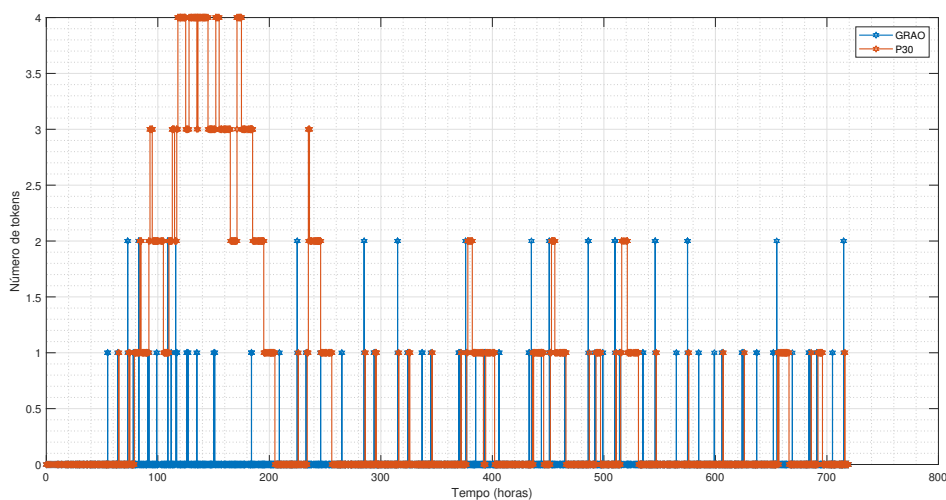


Figura 5.3: Evolução dos tokens em GRAO e P30.

Os tempos utilizados na temporização das transições do modelo expandido foram os mesmos do modelo básico, a diferença é que as atividades foram desmembradas e os tempos de espera embutidos em alguns processos foram expurgados.

O maior nível de abstração possibilitou encontrar problemas idênticos aos reais, uma vez que a capacidade de alguns pontos é restrita e a operação é dinâmica. Um dos *outputs* do modelo é uma matriz onde é possível verificar quantas vezes uma transição disparou, qual *token* ela consumiu e em que instante de tempo. Um gargalo no descarregamento de grãos foi encontrado, como já esperado pelos analistas da empresa, esse fato fundamentou ainda mais a assertividade do modelo, pois essa situação é recorrente no dia a dia operacional e a dinâmica da simulação conseguiu replicar tal situação. Algumas alternativas para solucionar esse problema serão apresentadas abaixo com a variação de recursos e/ou tempo de algum dos processos.

5.3.2 Análise de sensibilidade: trens de celulose

Nessa análise serão realizadas variações no número de ativos alocados para transportar celulose a fim de compreender o impacto no volume transportado de grão e

combustível. Essa é uma problemática real e até o momento não se sabe qual o desdobramento na ferrovia quando o volume de celulose aumenta.

Importante ressaltar que o contexto em que esse trabalho foi realizado é o de planejamento a longo prazo (+10 anos) de uma ferrovia. O modelo possibilita analisar diversos quesitos, tais como: tamanho de fila em cada lugar e tempo médio de espera. Contudo, visando suportar decisões a longo prazo, somente as visões de volume transportado, número de trens e premissas de tempo foram considerados.

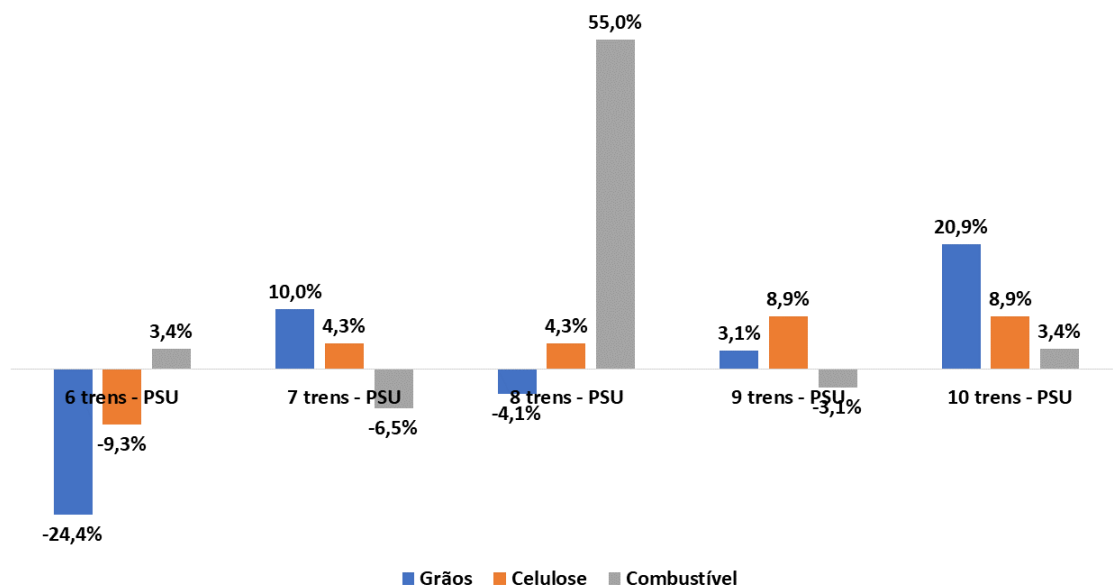


Figura 5.4: Variação de trens de celulose no sistema.

Em cada simulação foi incrementada em uma unidade um trem celulose a fim de verificar o volume transportado de cada produto. Os cenários aqui apresentados demonstram a capacidade da rede de Petri em simular cenários variando recursos de forma eficiente. A escolha pelas melhores opções não serão realizadas nesse trabalho, uma vez que a aquisição de novos trens ou redução de tempo de processos são questões complexas e carecem de uma grande análise econômica. Esses cenários são suporte para as tomadas de decisão.

No entanto, algumas conclusões podem ser tiradas, como por exemplo, o volume de celulose transportado não é proporcional ao número de trens aumentados. Isso se dá

pela formação de fila que ocorre no terminal de descarga, lugar P22 na Figura 4.8. A quantidade de grãos não é diretamente afetada pelo aumento de trens de celulose no sistema.

	6 trens - PSU		7 trens - PSU		8 trens - PSU		9 trens - PSU		10 trens - PSU	
	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens
PIP	-16,1%	36	2,6%	44	2,6%	44	2,6%	44	9,6%	47
PIN	-10,1%	18	-10,1%	18	-25,1%	15	-15,1%	17	-10,1%	18
PPF	1,8%	26	17,5%	30	21,4%	31	13,6%	29	21,4%	31
PSU	-9,3%	20	4,3%	23	4,3%	23	8,9%	24	8,9%	24
COMB	3,4%	16	-3,1%	15	55,0%	24	-3,1%	15	3,4%	16
Total	-30,3%	116	11,2%	130	58,2%	137	6,8%	129	33,1%	136

Tabela 5.1: Volume por origem.

O número de trens na coluna da Tabela 5.1 representa o número de trens de celulose. Nas linhas o resultado do volume por origem, dada a alocação de trens que transportam celulose.

A partir dos cenários apresentados, foram realizadas simulações variando o mesmo número de recurso mas partindo da premissa de que o tempo de descarregamento dos lotes de celulose seriam reduzidos em 10%.

Percebe-se que a redução no tempo de carregamento dos trens de celulose no porto surtiu efeito e o volume transportado aumentou de forma satisfatória, como demonstrado na Tabela 5.2 os trens de grão também foram beneficiados pela mudança no processo e pode ser adotada como algo promissor nesse contexto.

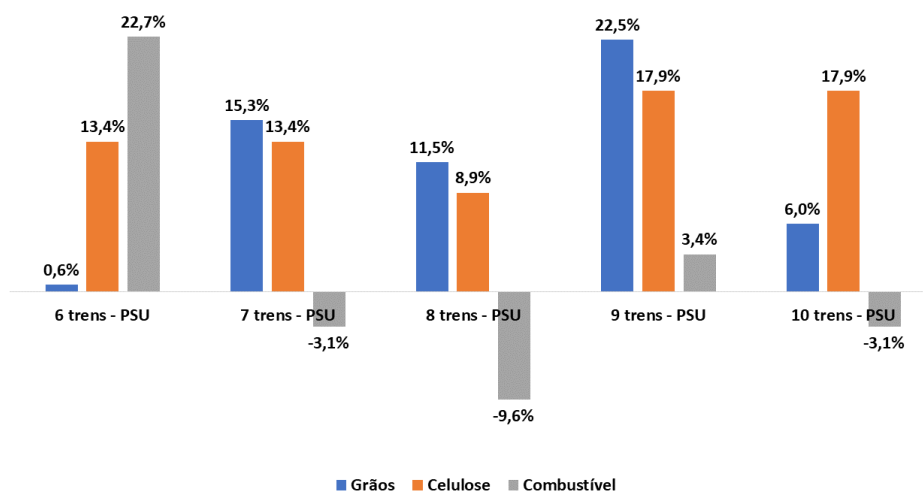


Figura 5.5: Volume por tipo de produto: variação de trens de celulose.

	6 trens - PSU		7 trens - PSU		8 trens - PSU		9 trens - PSU		10 trens - PSU	
	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens
PIP	-6,7%	40	-2,1%	44	0,3%	42	7,2%	46	2,6%	44
PIN	-10,1%	18	-0,1%	18	-10,1%	18	-10,1%	18	-10,1%	18
PPF	17,5%	30	17,5%	31	21,4%	31	25,3%	32	13,6%	29
PSU	13,4%	27	13,4%	26	8,9%	26	17,9%	29	17,9%	26
COMB	22,7%	19	-3,1%	15	-9,6%	15	3,4%	16	-3,1%	15
Total	36,8%	134	25,6%	134	10,8%	132	43,7%	141	20,9%	132

Tabela 5.2: Volume por origem: redução de tempo de descarga em PSU.

O volume de combustível é pouco afetado com as variações propostas e o volume advindo de PPF também.

5.3.3 Análise de sensibilidade: tempo de descarga de grãos

Outro cenário simulado representou o mesmo cenário original, onde o número de ativos alocados para o transporte de carga seria o mesmo que o planejado, porém o tempo de descarga do grão seria reduzido gradativamente para analisar o impacto dessa variação no sistema como um todo.

Na Figura 5.6 pode ser observado que as variações no tempo de descarga não interferem de forma relevante no montante transportado. As mudanças efetivas capazes de reduzir o tempo de descarga como apresentado possivelmente são onerosas e requerem uma série de investimentos, uma vez que o pátio de descarga não possui capacidade adicional.

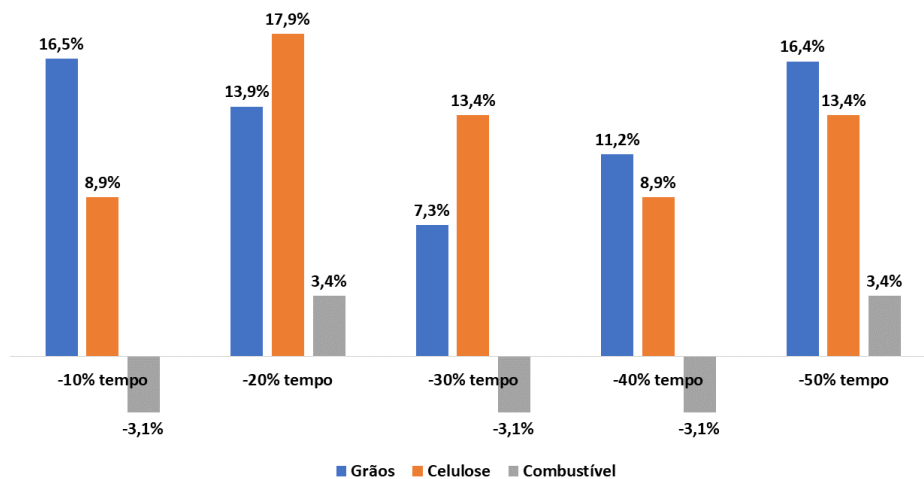


Figura 5.6: Volume por tipo de produto: redução de tempo de descarga em QPM.

Quando observado por origem, o volume de celulose praticamente não é afetado por essas alterações e o de combustível também não. Isso se dá pelo fato de que o fluxo desses dois produtos conseguem operar de forma paralela e possuem terminal de carga/descarga próprios no porto.

Esses cenários são importantíssimos para a compreensão macro do planejamento de longo prazo da Ferrovia Norte Sul. Foram realizados testes com as transições estocásticas. Entretanto havia histórico de tempo somente de alguns processos. Optou-se

	-10%		-20%		-30%		-40%		-50%	
	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens	Volume	Número de trens
PIP	0,3%	43	2,6%	44	4,9%	45	4,9%	45	7,2%	45
PIN	-5,1%	19	-10,1%	18	-15,1%	17	-15,1%	17	-20,1%	16
PPF	21,4%	31	21,4%	31	17,5%	30	21,4%	31	29,2%	32
PSU	8,9%	24	17,9%	26	13,4%	25	8,9%	24	13,4%	25
COMB	-3,1%	15	3,4%	16	-3,1%	15	-3,1%	15	3,4%	16
Total	22,3%	132	35,2%	135	17,6%	132	17,0%	132	33,1%	134

Tabela 5.3: Volume transportado: variação em QPM.

então por adotar tempos determinísticos para todas as transições. Todos os processos descritos nesse capítulo possuem grande variabilidade quando analisados de forma independente, Ainda assim, se tratando de uma análise para suporte na tomada de decisão, a rede de Petri Colorida demonstrou sua capacidade de representar um cenário real brasileiro e pode servir como base para estudos diversos.

Conclusão

Pode-se concluir que a proposta elaborada foi satisfatória e o método foi eficiente na análise de desempenho do sistema aplicado. Algo pouco comum no ambiente acadêmico é a aplicação de métodos com fundamentação matemática sólida para resolução de demandas do mercado, o que ocorreu neste trabalho graças à iniciativa de uma instituição privada, motivada em solucionar problemas complexos e tornar a logística brasileira mais competitiva. Destaca-se a eficiência da modelagem por meio das redes de Petri, pois foi possível representar um sistema complexo e inserir a lógica de Petri no ambiente corporativo.

O presente trabalho traz uma contribuição importante ao criar um modelo de simulação de redes de Petri no ambiente MATLAB que representa o transporte ferroviário de cargas de ponta a ponta, algo até então nunca aplicado nas ferrovias brasileiras. O simulador é didático, transparente e pode ser implementado em outra plataforma e linguagem. As matrizes de incidências geradas no simulador são de fácil manipulação e podem ser utilizadas, por exemplo, como entrada para um algoritmo de otimização e as regras de funcionamento da ferrovia podem ser alteradas a qualquer momento.

Os tempos utilizados foram determinísticos, uma vez que não houve histórico de tempo consistente. No entanto, a estrutura da rede de Petri criada pode ser utilizada para transições com tempos estocásticos. Basta obter os históricos de tempo de cada transição, encontrar a melhor distribuição de probabilidade e atribuir a transição a distribuição e seu respectivo parâmetro. Para maiores detalhes da codificação da rede, o código se encontra em github.com/diegosimao.

6.1 Trabalhos futuros

Algumas ideias e discussões foram iniciadas e podem ser realizadas em estudos futuros, dentre elas:

- Integrar o modelo de simulação a uma solução otimizada da quantidade de recurso a ser utilizada para determinado objetivo.
- Métodos de inteligência computacional também podem ser integrados ao modelo proposto analisando a variação de cenários gerados pela variação dos tempos da rede de Petri e analisando padrões que interferem no volume transportado, sinalizando durante a simulação alternativas para melhor performance.
- Utilizar distribuições de probabilidade para representar os tempos das atividades para que o comportamento aleatório dos processos sejam analisados de forma mais profunda.
- Desenvolver interface amigável para que analistas utilizem a ferramenta com bagagem teórica sólida e pouco utilizada no mercado.

Referências Bibliográficas

- Ahalt et al.(2018)** Virginia Ahalt, Nilay Tanik Argon, Serhan Ziya, Jeff Strickler, e Abhi Mehrotra. Comparison of emergency department crowding scores: a discrete-event simulation approach. *Health care management science*, 21(1):144–155. Citado na pág. 12
- Albright e Winston(2012)** S Christian Albright e Wayne L Winston. *Management science modeling*. South-Western. Citado na pág. 6, 11
- ANTAC(2020)** ANTAC. Agência Nacional de Transportes Aquaviários - Anuário Estatístico, 2020. URL <http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/>. Acessado: 2020-01-03. Citado na pág. 24
- ANTT(2019)** ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres - Anuário Estatístico, 2019. URL http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario_Estatistico.html. Acessado: 2019-08-13. Citado na pág. xi, 25, 26
- Assad(1980)** Arjang A Assad. Models for rail transportation. *Transportation Research Part A: General*, 14(3):205–220. Citado na pág. 2
- Banks et al.(2005)** Jerry Banks, John S. II Carson, Barry L. Nelson, David M Nicol, et al. *Discrete-event system simulation*. Pearson. Citado na pág. 6, 9
- Bernhardt(2007)** K Bernhardt. Agent-based modeling in transportation. *Artificial Intelligence in Transportation*, 72. Citado na pág. 10
- Cassandras(2008)** Christos G Cassandras. *Introduction to Discrete event Systems*. Springer Science Business Media. Citado na pág. 11, 16
- Cavone et al.(2018)** Graziana Cavone, Mariagrazia Dotoli, Nicola Epicoco, e Carla Seatzu. Efficient resource planning of intermodal terminals under uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 51(9):398–403. Citado na pág. 2

- Chwif e Medina(2010)** Leonardo Chwif e Afonso C. Medina. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações*, volume 4. Ed. São Paulo: Editora dos Autores. Citado na pág. 7, 9, 10
- Clemente et al.(2013)** Monica Clemente, Maria Pia Fanti, Agostino M Mangini, e Walter Ukovich. The vehicle relocation problem in car sharing systems: Modeling and simulation in a petri net framework. Em *International Conference on Applications and Theory of Petri Nets and Concurrency*, páginas 250–269. Springer. Citado na pág. 13
- Davidrajuh(2017)** Reggie Davidrajuh. Modelling large-scale discrete event systems as modular petri nets using gpensim. *International Journal of Simulation–Systems, Science & Technology*, 18(4). Citado na pág. 40
- Davidrajuh e Krenczyk(2019)** Reggie Davidrajuh e Damian Krenczyk. Extending gpensim for model checking on petri nets. *International Journal of Simulation–Systems, Science & Technology*, 20(1). Citado na pág. 40
- Dotoli et al.(2014)** Mariagrazia Dotoli, Nicola Epicoco, Marco Falagario, e Graziana Cavone. A timed petri nets model for intermodal freight transport terminals. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(2):176–181. Citado na pág. 13
- Edhlund e Lee(2019)** Ian Edhlund e Cindy Lee. A petri net approach to physiologically based toxicokinetic modeling. *Environmental toxicology and chemistry*, 38(5):978–987. Citado na pág. 13
- FAO(2020)** FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAOSTAT, 2020. URL <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acessado: 2020-01-02. Citado na pág. 26
- Fu-gui et al.(2012)** DONG Fu-gui, LIU Hui-mei, e LU Bing-de. Agent-based simulation model of single point inventory system. *Systems Engineering Procedia*, 4: 298–304. Citado na pág. 11
- Gaied et al.(2018)** Mouhaned Gaied, Dimitri Lefebvre, Anis M'halla, e Kamel Ben Othmen. Modelling and performance evaluation of railway transport systems using p-timed petri nets. Em *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, páginas 841–846. IEEE. Citado na pág. 2

- Giannasi et al.(2001)** Frank Giannasi, Philip Lovett, e Anthony N Godwin. Enhancing confidence in discrete event simulations. *Computers in Industry*, 44(2):141–157. Citado na pág. [6](#)
- Gil(2002)** Antonio Carlos Gil. Como elaborar projetos de pesquisa. *São Paulo*, 5(61): 16–17. Citado na pág. [4](#)
- Goldsman et al.(2010)** David Goldsman, Richard E. Nance, e James R. Wilson. A brief history of simulation revisited. Em *Proceedings of the winter simulation conference*, páginas 567–574. Winter Simulation Conference. Citado na pág. [6](#)
- Greasley e Owen(2018)** Andrew Greasley e Chris Owen. Modelling people’s behaviour using discrete-event simulation: a review. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(5):1228–1244. Citado na pág. [12](#)
- Harrell et al.(2000)** Charles Harrell, Royce Bowden, e Biman K Ghosh. *Simulation using promodel*. McGraw-Hill Higher Education. Citado na pág. [xi](#), [8](#), [9](#)
- Holloway et al.(1997)** Lawrence E Holloway, Bruce H Krogh, e Alessandro Giua. A survey of petri net methods for controlled discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 7(2):151–190. Citado na pág. [21](#)
- Jackson et al.(2018)** Ilya Jackson, Jurijs Tolujevs, e Tobias Reggelin. The combination of discrete-event simulation and genetic algorithm for solving the stochastic multi-product inventory optimization problem. *Transport and Telecommunication Journal*, 19(3):233–243. Citado na pág. [12](#)
- Jensen(2013)** Kurt Jensen. *Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use*, volume 1. Springer Science & Business Media. Citado na pág. [22](#)
- Law e Kelton(2000)** Averill M Law e W David Kelton. *Simulation modeling and analysis*, volume 3. McGraw-Hill New York. Citado na pág. [6](#), [10](#)
- Li et al.(2012)** Wen-Jing Li, Wen Yang, Shuang Li, e Wei-Zhi Liao. The algorithm of color petri nets transform into the place/transition nets and its implementation. Em *2012 11th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering & Science*, páginas 461–465. IEEE. Citado na pág. [23](#)

- Lino e Sztajnberg(2007)** F.G.O. Lino e A Sztajnberg. Analisador e simulador de redes de petri. *Simpósio Brasileiro de Computação, Rio de Janeiro*. Citado na pág. 17
- Mittal e Krejci(2015)** Anuj Mittal e Caroline C Krejci. A hybrid simulation model of inbound logistics operations in regional food supply systems. Em *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*, páginas 1549–1560. IEEE. Citado na pág. 12
- Mooney(1997)** Christopher Z Mooney. *Monte carlo simulation*, volume 116. Sage Publications. Citado na pág. 10
- Morasca et al.(1991)** Sandro Morasca, Mauro Pezzè, e Marco Trubian. Timed high-level nets. *Real-Time Systems*, 3(2):165–189. Citado na pág. 20
- Murata(1989)** Tadao Murata. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4):541–580. Citado na pág. 3, 12, 14, 17, 19
- Naybour et al.(2019)** Matthew Naybour, Rasa Remenyte-Prescott, e Matthew J Boyd. Reliability and efficiency evaluation of a community pharmacy dispensing process using a coloured petri net approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 182: 258–268. Citado na pág. 13
- Pinho(2008)** A. F. Pinho. *Proposta de um método de otimização de modelos de simulação a eventos discretos. 2008. 189 p.* Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, SP. Citado na pág. 9
- Ribeiro e Ferreira(2002)** Priscilla Cristina Cabral Ribeiro e Karine Araújo Ferreira. Logística e transportes: uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro. *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 23. Citado na pág. 1
- Rodrigue et al.(2016)** Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois, e Brian Slack. *The geography of transport systems*. Routledge. Citado na pág. 1
- Sakurada et al.(2009)** Nelson Sakurada, Dario Ikuo Miyake, et al. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. *Gestão & Produção*, 16(1):25–43. Citado na pág. 11

- Salmon(2017)** Arianna Zoila Olivera Salmon. *Modelagem e análise de requisitos de sistemas automatizados usando UML e Redes de Petri*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. Citado na pág. 13
- Samuelson(2005)** D. A. Samuelson. Agents of change: how agent-based modeling may transform social science. *OR/MS Today*, 32(1). Citado na pág. 11
- Santos et al.(2019)** Fernando P Santos, Ângelo P Teixeira, e C Guedes Soares. Modeling, simulation and optimization of maintenance cost aspects on multi-unit systems by stochastic petri nets with predicates. *Simulation*, 95(5):461–478. Citado na pág. 13
- Shannon(1998)** Robert E Shannon. Introduction to the art and science of simulation. Em *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings*, volume 1, páginas 7–14. IEEE. Citado na pág. 10
- Silva e Menezes(2001)** Edna Lúcia da Silva e Estera Muszkat Menezes. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Citado na pág. 3
- Simão et al.(2019)** Diego Rodrigues Andrade Simão, Rodney Rezende Saldanha, Carlos Andrey Maia, e Lucas Sirimarco Moreira Guedes. Modelagem e simulação de sistemas a eventos discretos utilizando uma rede de petri estocástica colorida: Uma aplicação para o sistema da ferrovia norte sul. Congresso Internacional de Logística e Operações. Suzano, Brasil. Citado na pág. 3
- Souza(2012)** Flávio Henrique Batista de Souza. Otimização de Provisionamento de Banda para Internet utilizando redes de Petri na modelagem de comportamento de clientes e Provedores. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Citado na pág. 13
- Van der Aalst(1998)** Wil MP Van der Aalst. The application of petri nets to workflow management. *Journal of circuits, systems, and computers*, 8(01):21–66. Citado na pág. 22