



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Teoria de Sistemas a Eventos Discretos e Controle Supervisório Aplicada a Modelagem e Controle de Sinalização de Tráfego Ferroviário

Ana Laura Alves Rocha

João Monlevade, MG
Julho, 2022

Ana Laura Alves Rocha

Teoria de Sistemas a Eventos Discretos e Controle Supervisório Aplicada a Modelagem e Controle de Sinalização de Tráfego Ferroviário

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica pelo Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas da Univer-
sidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Au-
gusto Ricco
Coorientador: Prof. Me. Hugo Jerzy
Bravo Cipriano

João Monlevade, MG
Julho, 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672t Rocha, Ana Laura Alves.

Teoria de sistemas a eventos discretos e controle supervisório
aplicada à modelagem e controle de sinalização de tráfego ferroviário.
[manuscrito] / Ana Laura Alves Rocha. - 2022.

102 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ricco.

Coorientador: Me. Hugo Jerzy Bravo Cipriano.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.

Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia
Elétrica .

1. Ferrovias - Sinalização. 2. Modelagem. 3. Sistemas de controle
supervisório. 4. Teoria de sistemas. 5. Transporte ferroviário de carga. I.
Cipriano, Hugo Jerzy Bravo. II. Ricco, Rodrigo Augusto. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Laura Alves Rocha

Teoria de Sistemas a Eventos Discretos e Controle Supervisório Aplicada a Modelagem e Controle de Sinalização de Tráfego Ferroviário

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 24 de junho de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ricco - Orientador - Universidade Federal de Outro Preto
Prof. Dr. Hugo Jerzy Bravo Cipriano - Coorientador - Externo
Profa. Dra. Wendy Yadira Eras Herrera - Universidade Federal de Outro Preto
Profa. Me. Anny Verly - Universidade Federal de Outro Preto

Rodrigo Augusto Ricco, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão
de Curso da UFOP em 24/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Augusto Ricco, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2022, às
15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0352387** e o código CRC **C7615962**.

À Deus e à minha família, pai, mãe e irmã, dedico este trabalho.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por sustentar o meu espírito e guiar meus passos desde a inspiração e desenvolvimento até a conclusão deste trabalho. À minha família, meu pilar e porto seguro, por serem meus exemplos de vida, por me ensinarem o poder da honestidade e da força de vontade. À minha mãe por seu amor e suporte incondicional, ao meu pai por sua força e exemplo incomparáveis, à minha irmã por seu carinho e amizade verdadeiros, aos meus avós, tios, tias, primos e demais familiares que sempre me apoiam, torcem e trilham comigo os caminhos da vida e à todos aqueles que já me desafiaram e me deram oportunidade de crescimento.

Agradeço aos meus orientadores e à todos os mestres que, com dedicação, formam profissionais capacitados, à todos os colegas de faculdade e de profissão. Em especial, à todos nós que compartilhamos a determinação de seguir em frente, com prazer, meu muito obrigada!

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas *pensar* no que ninguém ainda pensou, sobre aquilo que *todo mundo* vê.

- Arthur Schopenhauer.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Apresentação e Justificativa	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivo	9
1.3.1	Objetivos Específicos	9
1.4	Organização do Trabalho	9
2	Contextualização Teórica	11
2.1	Sistemas a Eventos Discretos	11
2.1.1	Características e Vantagens da Modelagem de DES	12
2.1.2	Exemplos de Sistemas DES	13
2.2	Autômatos e Linguagens	16
2.2.1	Autômatos	16
2.2.2	Linguagens Representadas por Autômatos	20
2.2.3	Operações em Autômatos	20
2.3	Controle Supervisório	24
2.3.1	Sistemas Bloqueantes	26
2.3.2	Especificações	27
3	Metodologia	29
3.1	Estudo de Caso	29
3.1.1	Modelo da Planta	33
3.1.2	Especificações para o Sistema	43
3.1.3	Síntese do Controlador Supervisório	45

4 Resultados e Discussões	49
4.1 Modelo do Sistema Controlado	49
4.1.1 Supervisório em seu Estado Inicial	50
4.1.2 Prevenção de colisão em trecho	51
5 Conclusão	57
5.1 Contribuições ao conhecimento	57
5.2 Trabalhos Futuros	58
Referências	59
A Detalhes Supervisor	61

Listas de Figuras

1.1	Principais autores com o tema "railway signalization".	4
1.2	Linha do tempo uso do tema "Discrete Event Systems"em publicações científicas.	6
1.3	Funcionamento de supervisor monolítico.	7
1.4	Funcionamento de supervisores modulares.	7
2.1	Evolução temporal de um sistema de fila de banco.	15
2.2	Representação por autômato do comportamento do caixa de um banco.	18
2.3	Representação por autômato do comportamento de uma fila de banco.	19
2.4	Composição Paralela entre os autômatos das Figuras 2.2 e 2.3. . .	24
3.1	Malha ferroviária a ser modelada.	30
3.2	Modelo de autômato para sinalização de um trecho.	36
3.3	Autômato G_A da sinalização do Trecho A.	36
3.4	Autômato G_B da sinalização do Trecho B.	37
3.5	Autômato G_C da sinalização do Trecho C.	37
3.6	Autômato G_D da sinalização do Trecho D.	37
3.7	Autômato G_E da sinalização do Trecho E.	38
3.8	Autômato G_F da sinalização do Trecho F.	38
3.9	Autômato G_{VP_1} da sinalização do Trecho 1 da Via Principal. . .	38
3.10	Autômato G_{VP_2} da sinalização do Trecho 2 da Via Principal. . .	39
3.11	Autômato G_{VP_3} da sinalização do Trecho 3 da Via Principal. . .	39
3.12	Simulação do autômato G no estado inicial.	42

3.13 Simulação do autômato G com VP_1 em emergência.	42
3.14 Especificações para acessos aos trechos A, B, C, D, E e F	44
3.15 Especificação H_{VP} para acessos à Via Principal.	45
3.16 Autômato $S/(H_{esp} G)$ do sistema controlado de Sinalização.	47
4.1 Simulação Supervisório em seu Estado Inicial.	51
4.2 Rastro de simulação passo a passo com o software DESTool.	53
4.3 Malha Ferroviária para status de simulação do Supervisório com Via Principal em uso.	54
4.4 Telas de Simulação no status da Figura 4.3.	55

Lista de Tabelas

2.1	Transições de estados para a fila do banco, conforme a Equação 2.14.	19
2.2	Transições de estados para autômato composto do sistema de caixa e fila de banco.	23
3.1	Estatísticas da planta G	41
3.2	Transição de estados para simulação do autômato G resultando no status de simulação da Figura 3.13.	43
3.3	Estatísticas do supervisor S/H_a	46
A.1	Eventos no modelo do Supervisor S/H_a	61
A.2	Estados no modelo do Supervisor S/H_a	62
A.3	Transições de Estados no modelo do Supervisor S/H_a	65

Listas de Siglas

CLP Controlador Lógico Programável. 4

CS Controle Supervisório. 9, 12

DES Sistema a Eventos Discretos, sigla em inglês para *Discrete Event System*. ix, 2, 4–6, 9, 11–13, 16, 25–29, 45, 58

EIRENE Rede Européia Avançada de Rádio Ferroviário Integrado, sigla em inglês para *European Integrated Railway Radio Enhanced Network*. 2

ERTMS Sistema Europeu de Gerenciamento de Tráfego Ferroviário, sigla em inglês para *European Rail Traffic Management System*. 1–3, 5

ETCS Sistema Europeu de Controle de Trens, sigla em inglês para *European Train Control System*. 1, 3

GSM-R Sistema Global de Comunicações Móveis para Ferrovias, sigla em inglês para *Global System for Mobile Communications for Railways*. 1, 2

MORANE Rádio Móvel para Redes Ferroviárias na Europa, sigla em inglês para *Mobile Radio for Railway Networks in Europe*. 2

PN Redes de Petri, sigla em inglês para *Petri Nets*. 3, 5

Resumo

Dentre os diversos recursos e métodos comumente dedicados à segurança do transporte ferroviário, a sinalização se destaca como primordial para orientação de maquinistas, pedestres e controladores de tráfego. Com destaque no Brasil, onde o foco deste tipo de transporte se dá em ferrovias de plantas industriais, a periculosidade das cargas transportadas representam maior criticidade aos controles de segurança. Neste trabalho é abordada a problemática da sinalização ferroviária luminosa aplicada em um sistema composto por trechos ferroviários de movimentação de cargas industriais. Para tanto, é proposta uma abordagem para a modelagem a partir dos conceitos das Teoria de Sistemas a Eventos Discretos, Teoria de Autômatos e suas linguagens e Controle Supervisório, utilizando o *software DESTool* como ferramenta computacional para cálculos e simulações. Por meio dos modelos obtidos e de métodos computacionalmente automatizados, obteve-se uma representação completa do sistema de sinalização e foram verificadas: a observação de eventos pelo controlador, a controlabilidade de restrições de segurança impostas por especificações, assim como ações de controle diretas e indiretas sobre eventos fisicamente controláveis e incontroláveis. Sob esta ótica, foi validada a adequação dos métodos à aplicação proposta, e o modelo obtido se representou em opção viável a implementação em sistemas reais.

Palavras-chave: 1. Sistemas a Eventos Discretos. 2. Controle Supervisório.
3. Sinalização ferroviária.

Abstract

Among the various resources and methods commonly dedicated to the safety of rail transport, signaling stands out as essential for guiding train drivers, pedestrians and traffic controllers. Especially in Brazil, where the focus of this type of transport is on industrial plant railroads, the dangerousness of transported cargo represents greater criticality to safety controls. In this work, the problem of light rail signaling applied in a system composed of railway sections for industrial cargo movement is addressed. Therefore, an approach to modeling is proposed based on the concepts of Discrete Event Systems Theory, Automata Theory and its languages and Supervisory Control, using *DESTool software* as a computational tool for calculations and simulations. Through the obtained models and computationally automated methods, a complete representation of the signaling system was obtained and the following were verified: the observation of events by the controller, the controllability of safety restrictions imposed by specifications, as well as direct and indirect control actions about physically controllable and uncontrollable events. From this point of view, the adequacy of the methods to the proposed application was validated, and the model obtained represented a viable option for implementation in real systems.

Keywords: 1. Discrete Event Systems. 2. Supervisory Control.
3. Railway signalling.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Apresentação e Justificativa

A partir da Primeira Revolução Industrial, em meados do século XIX, a utilização do transporte ferroviário sofreu rápido desenvolvimento. A máquina a vapor de James Watt, do início do século XVIII, a crescente produção de mercadorias e consequente necessidade de transporte das mesmas para os mercados consumidores, impulsionaram o apoio à George Stephenson, que apresentou sua primeira locomotiva em 1814. Nesta época, já com os primeiros resultados concretos para este tipo de transporte, se deu início a era das ferrovias, que se desenvolveram rapidamente na Europa e América do Norte ([DNIT, 2016](#)). Num cenário mais recente, devido à necessidade de comportar um tráfego cada vez mais denso e veloz e, com o artifício das tecnologias de comunicação, soluções em sistemas de sinalização e controle de tráfego surgem com abordagens cada vez mais eficazes, no que diz respeito à garantia de segurança e eficiência do transporte.

Mundialmente, a referência em sistemas de tráfego ferroviário é o Sistema de Gerenciamento de Tráfego Ferroviário Europeu, conhecido como ERTMS, da sigla em inglês *European Rail Traffic Management System*. O ERTMS pode ser entendido como a combinação entre o Sistema de Controle Ferroviário Europeu, ETCS, do inglês *European Train Control System*, e o Sistema Global para Comunicações Móveis para Ferrovias, GSM-R, do inglês *Global System for Mobile Communications for Railways* ([UIC, 2021](#)). O ERTMS integra todas as malhas

ferroviárias europeias com a Ásia e países do Oriente Médio ([ERTMS Map, 2021](#)) e, é admitido como um padrão mundial completo de controle de sinalização e eficiência de operação. Existem três níveis de aplicação dos sistemas ERTMS, classificados principalmente pela velocidade máxima desenvolvida pelo tráfego. Nestes sistemas, critérios de segurança são fortemente influenciados pela velocidade de deslocamento, devido a utilização de trechos de forma simultânea e à capacidade de frenagem limitada pelas características físicas dos veículos.

No primeiro nível de aplicação dos ERTMS, o tráfego é controlado por luzes de sinalização, que permitem aos operadores de locomotivas estarem cientes da velocidade máxima permitida num determinado trecho, além disso, informações como localização e ocupação de trechos são fornecidas por dispositivos balizas, instalados ao longo dos trilhos. Sistemas de controle supervisório são aplicáveis, fornecendo informação dinâmica e atualizada aos usuários do sistema e, controlando, por exemplo, a frenagem de composições ferroviárias sem intervenção humana, evitando colisões entre trens.

Nos segundo e terceiro níveis de aplicação dos ERTMS o diferencial se dá pela tecnologia GSM-R, que proporciona ao sistema uma plataforma segura de dados e de comunicação por voz, na qual não há perdas em velocidades até 500km/h ([Durmuş et al., 2012](#)). As informações de sinalização do trecho são carregadas em um computador de bordo para cada locomotiva, e isto fornece um controle que permite aceleração e desaceleração coordenada das composições ao longo de seu deslocamento ([UIC, 2009](#)). O GSM-R possui especificações baseadas em outros dois padrões de requisitos funcionais, a Rede Européia Avançada de Rádio Ferroviário Integrado, EIRENE, do inglês *European Integrated Railway Radio Enhanced Network* e a Rádio Móvel para Redes Ferroviárias na Europa, MORANE, do inglês *Mobile Radio for Railway Networks in Europe*.

Neste trabalho, será abordado o tráfego ferroviário destinado à logística e movimentação industrial, que se encaixa estruturalmente ao nível 1 dos ERTMS. Levando em consideração velocidades baixas, típicas de movimentação de cargas perigosas em ambiente industrial e critérios de segurança específicos do estudo de caso a ser proposto. Para fins de controle será proposta um modelagem de um sistema de controle supervisório para sinalização luminosa, fundamentada na teoria dos Sistemas de Eventos Discretos, DES, sigla em inglês para *Discrete*

Event Systems. No universo dos ERTMS, o sistema de controle de sinalização é chamado, mais especificamente, de Sistema Europeu de Controle Ferroviário, ou ETCS, do inglês *European Train Control System*. Este, se encarrega da segurança e controle efetivo do tráfego, em outras palavras, do bloqueio de condições inseguras. Permite evitar que composições superem as velocidades máximas estabelecidas e/ou violem restrições impostas pela sinalização, em tempo real.

Neste trabalho serão propostas modelagens modularizadas dos componentes de sinalização luminosa de uma malha ferroviária, a partir de conceitos práticos simples de movimentação e roteamento. A fim de demonstrar um projeto viável e de baixo custo de aplicação e manutenção em contextos reais. Para o controle será proposto um controle monolítico sobre a planta modelada, capaz de atuar sobre um contexto local e também que possibilite a conexão a contextos maiores, com grandes malhas ferroviárias.

Uma abordagem dentro da mesma grande área de estudo pode ser encontrada em [Giua and Seatzu \(2008\)](#), artigo no qual, similarmente, se realiza modelagem e controle supervisório de tráfego ferroviário, através de Redes de Petri, ou PN, do inglês *Petri Nets*. Características de segurança e interatividade em tempo real são consideradas em uma análise modular dos componentes do sistema, como dispositivos de sinalização, semáforos, estações e rotas para veículos ferroviários.

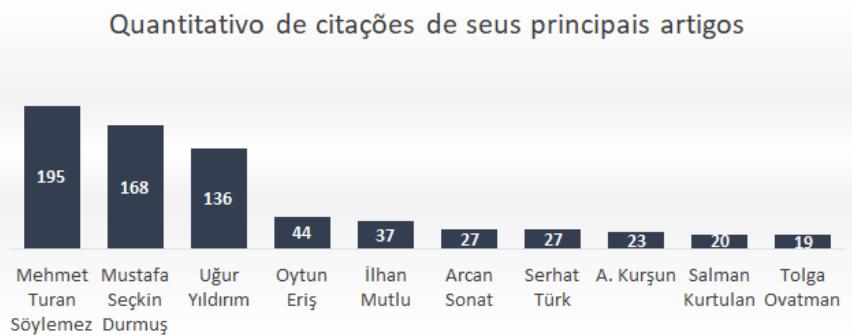
Em outro trabalho, apresentado por [Durmuş et al. \(2012\)](#), se propõe um sistema ERTMS para controle de velocidade modularizado de tráfego ferroviário de alta velocidade, modelado também através de Redes de Petri. No artigo é delimitado um estudo de caso com dois trens de alta velocidade, se movimentando simultaneamente em um mesmo trecho. Os resultados demonstrados aferiram um controle eficiente capaz de manter uma distância mínima de segurança entre os trens em função da velocidade instantânea dos mesmos.

1.2 Motivação

A motivação do presente trabalho está na solução da problemática real de sinalização ferroviária. Devido a gravidade e potencial de letalidade das colisões entre veículos ferroviários fazem-se necessárias aplicações de controle que garantam a segurança deste meio de transporte. A delimitação de especificações, bem como

a aplicação métodos analíticos e implementações exatas para controle de tráfego ferroviário são de suma importância, visto que a falha da supervisão desses sistemas pode levar à acidentes com perda de vida humana e danos materiais severos. Em especial, esta dissertação possui foco em malhas ferroviárias de movimentação industrial. Estas, possuem em geral trechos curtos e ramificados, além de tráfego constante de cargas perigosas, fatores agravantes que devem ser considerados a fim de garantir a segurança de pessoas e integridade de equipamentos.

O modelo a ser proposto tem a motivação de ser solução viável para controle automatizado que, pode ser implementado com baixo custo operacional e de manutenção, através de dispositivos Controladores Lógico Programáveis (CLP).



Fonte: Google Acadêmico, Junho 2022

Figura 1.1: Principais autores com o tema "railway signalization".

A escolha pela abordagem da modelagem através de sistemas DES se motiva, principalmente, na relevância do tema em publicações científicas e aplicações modernas de sistemas de controle de sinalização ferroviária. Segundo referências obtidas no site Google Acadêmico (Fig. 1.1), os principais autores que publicam sobre o tema de sinalização ferroviária (*railway signalization*), no século XXI, usam artifícios da teoria de Eventos Discretos para modelagem e validação de modelos. A pesquisa foi feita estratificando os artigos mais relevantes para o tema, quantificados por autor em número de citações por outros trabalhos. Um forte eixo de pesquisa se concentra no Departamento de Engenharia de Controle da Universidade Técnica de Istambul, na Turquia, representado pelos autores com os trabalhos mais citados no meio acadêmico. Dentre os artigos se destacam

os sistemas ERTMS e as Redes de Petri. As PN, em particular, são facilmente encontradas na literatura para representação de DES por fornecerem métodos complexos de análise e validação dos sistemas. Seus projetos, em geral, demandam do projetista conhecimento científico teórico bem embasado para aplicar regras de controle sobre os modelos, com isso, aplicações em contextos práticos são mais raras.

Os estudos de sistemas DES se baseiam em métodos matemáticos formais que descrevem sistemas reais, proporcionando, além de uma compreensão lógica e estruturada dos processos, também a possibilidade de uso de técnicas formais de análise, embasadas nas teorias de conjuntos matemáticos. Os principais modelos usados na literatura para representar estes sistemas são:

- Teoria de Linguagens e Autômatos (Ramadge-Wonham);
- Redes de Petri, com ou sem temporização;
- Redes de Petri Controladas, com ou sem temporização;
- Cadeias de Markov;
- Teoria das Filas;

Dois destes modelos se destacam na contribuição do desenvolvimento da teoria de controle de sistemas DES em aplicações práticas, são eles: os modelos da Teoria de Linguagem e Autômatos de [Ramadge and Wonham \(1989\)](#), e as Redes de Petri Controladas. Ambos, dotados de uma característica interessante aos projetistas: possuir procedimentos formais para síntese de controladores. Os demais modelos, em geral, se limitam à análise de sistemas DES.

Por se tratar de uma área em expansão na Engenharia, ainda não há um modelo que seja considerado paradigma universal às aplicações. Pode se notar, inclusive, por uma análise quantitativa das publicações científicas, a expansão do tema a partir do século XXI (Fig. 1.2), que resulta em trabalhos paralelos com diversas abordagens.

A Teoria de Linguagem e Autômatos, proposta por [Ramadge and Wonham \(1989\)](#), é particularmente interessante aos projetos, comparada às Redes de Petri,



Fonte: Google Acadêmico, Junho 2022

Figura 1.2: Linha do tempo uso do tema "Discrete Event Systems"em publicações científicas.

devido à maior flexibilidade das modelagens, tanto em tempo real quanto em nível lógico. Isto se dá pela possibilidade de utilizar técnicas de modelagem modular local, aplicadas à cada um dos elementos do sistema, representando-os como autômatos independentes. Visto que a dinâmica de cada autômato possui a vantagem de ser lida e interpretada por conceitos simples e formais atrelados à teoria de conjuntos matemáticos. Considerando ainda, que é possível sincronizar o comportamento desses subsistemas em um único sistema completo, que dita a dinâmica de todo o processo em malha fechada. Um vez que são observados eventos comuns à dinâmica de diferentes componentes.

Uma das principais vantagens de se utilizar a Teoria de Linguagens e Autômatos na representação de sistemas é o fato de poder se basear em métodos matemáticos exatos para análise da dinâmica de sistemas. Ora, se um sistema pode basear sua execução na leitura e observância de eventos determinísticos, os parâmetros que ditam sua dinâmica estão, em geral, muito menos propensos à interferências que afetem a modelagem idealizada. A síntese de controladores supervisórios, baseados nestes modelos, é um processo exato, não estocástico e não probabilístico.

As opções para aplicações de controle supervisório sobre sistemas DES se diferenciam entre si, basicamente, pela abordagem a ser imposta ao processo. São opções viáveis ao projeto do presente trabalho o controle supervisório modular

local e o controle supervisório monolítico.

O objetivo do controle supervisório monolítico é projetar um supervisor, ou controlador, único para um processo, com capacidade de habilitar ou desabilitar eventos controláveis, de forma a inferir no comportamento em malha fechada do processo o obedecimento à regras operacionais especificadas. Os seja, é necessário possuir um modelo (autômato) completo do processo (planta), que conte a todos as oportunidades e dinâmicas executáveis e, possuir também especificações que sejam capazes de descrever o comportamento desejado para o processo como um todo. A síntese de supervisores neste método, partindo de uma modelagem modular previamente feita, compreende em determinar inicialmente o modelo G da planta, a partir das operações de sincronização entre os modelos, modelar as especificações necessárias e, por fim, computar um único supervisor S , que implementará a lógica de controle de todo o sistema.

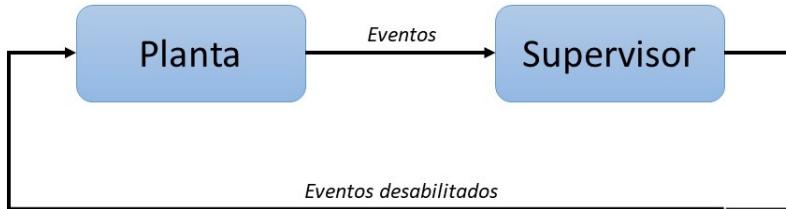


Figura 1.3: Funcionamento de supervisor monolítico.

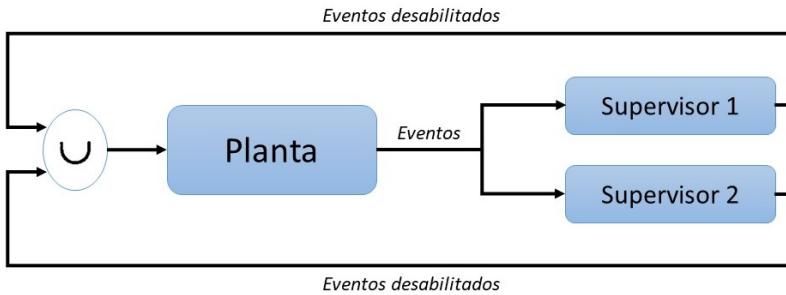


Figura 1.4: Funcionamento de supervisores modulares.

Em contraste, a abordagem do controle modular surge muito em função da possível complexidade computacional dos sistemas, que poderia inviabilizar o côm-

puto de supervisores monolíticos. Isto se dá em sistemas complexos, nos quais a sincronização entre diversos modelos pode provocar um problema conhecido como *explosão de estados*, ou seja, um crescimento exponencial do número de estados no modelo resultante. O controle modular, basicamente, divide o sistema em subsistemas e sintetiza supervisores modulares, dedicados à contextos reduzidos. Os subcontroladores são combinados a fim de solucionar completamente a problemática original. A síntese modular permite que problemas complexos sejam subdivididos em módulos menores e mais simples, dando mais flexibilidade aos modelos. Contudo, vale observar que os controladores modulares possuem versões parciais do funcionamento do processo global, assim, em geral, as soluções modulares não são as melhores opções, comparadas à síntese monolítica, podendo inclusive, gerar conflitos na ação de controle, uma vez que cada controlador observa apenas um parte do processo. Os diagramas de blocos das Figuras 1.3 e 1.4 representam a lógica de projeto de controladores monolíticos e controladores modulares.

Neste trabalho, visto que a modulagem do processo proposta será de forma modular, obtendo de forma exata um modelo único em malha fechada e, que serão usados softwares computacionais com capacidade de processamento suficiente à complexidade do sistema, foi escolhida a abordagem monolítica para a síntese do controlador supervisório. Considerando também que, em trabalhos futuros, aumentando-se a complexidade do projeto, o modelo proposto no Capítulo 3 poderá ser aproveitado como um subcontrolador de uma síntese de controle modular mais complexa.

Como estudo de caso, se propõe uma subseção de malha ferroviária, ramificada em trechos de acesso a pátios, comumente encontradas em malhas industriais, como siderúrgicas, por exemplo. Os trechos de tráfego ferroviário são limitados à curtos deslocamentos, baixas velocidades e outros fatores agravantes, comuns a estes contextos. Os pátios em geral, acessados pelos trechos ferroviários são destinados à carga e descarga de matérias-primas e mercadorias, como parte das cadeias produtivas. São fatores importantes para a modelagem: a capacidade física de cada trecho, em número de veículos, a controlabilidade dos deslocamentos, ou seja, quais eventos podem ser impedidos ou não, e as restrições de segurança, a serem transcritas como especificações para o modelo.

1.3 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é a solução da problemática da sinalização luminosa em vias ferroviárias, através da aplicação de técnicas de modelagem de Sistemas de Eventos Discretos (DES) e Controle Supervisório (CS) para implementar controle automatizado que garanta a segurança do tráfego ferroviário em trechos, evitando colisões.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Estudo dos formalismos da Teoria de Sistemas de Eventos Discretos, Autômatos e Controle Supervisório.
- Modelagem do tráfego ferroviário, pela Teoria de Linguagens e Autômatos, usando técnica de modelagem modular local e, aplicando técnicas de sincronização e operações entre autômatos, para obtenção de modelo de planta controlável.
- Aplicação de técnicas de Controle Supervisório monolítico, através da modelagem de especificações que sejam capazes de restringir o modelo ao comportamento desejado, onde são evitadas colisões e há o controle de dispositivos de sinalização e controle de tráfego.

1.4 Organização do Trabalho

Os capítulos a seguir estão organizados da seguinte maneira: O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos teóricos que guiarão o entendimento do presente trabalho, bem como algumas definições formais necessárias à implementação lógica da modelagem em Autômatos e Controle Supervisório. O Capítulo 3 revisa os conceitos teóricos explicitando a metodologia utilizada sobre o Objeto de Estudo. Em sequência, o Capítulo 4 expõe os testes sobre os modelos obtidos com as técnicas utilizadas. Por fim, o Capítulo 5 tem o objetivo de resumir as principais vantagens e aplicações do trabalho proposto com base nos resultados encontrados, bem como as contribuições e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Contextualização Teórica

Neste capítulo serão apresentadas as principais definições, terminologias e notações que embasam a Teoria de Sistemas a Eventos Discretos, representados por Autômatos e Linguagens, e a Teoria de Controle Supervisório. Busca-se elucidar os conceitos fundamentais que orientam os projetos na área e, familiarizar o leitor com os formalismos que serão necessários para entendimento dos capítulos posteriores. Para uma exposição mais abrangente destes conceitos e exemplos em demais áreas de aplicação, sugere-se consultar [Cassandras and Lafourche \(2008\)](#), [Ramadge and Wonham \(1989\)](#) ou ainda, [Hopcroft et al. \(2001\)](#).

2.1 Sistemas a Eventos Discretos

Nesta seção serão apresentados formalmente os DES. Para tanto, inicialmente é preciso compreender os termos: *Estados Discretos* e *Orientado à Eventos*, os quais conceituam a definição formal de um DES.

Quando o comportamento de um sistema pode ser intuitivamente analisado por meio de um conjunto finito de estados, ou seja, por um espaço de estados finito, chamamos este sistema de sistema de estados discretos. Este comportamento pode ser entendido ainda como dinâmico ou estático. No caso de um sistema dinâmico, ocorre evolução de estados ao longo tempo, sendo um estado dependente do estado anterior. Em adição, observando que as transições entre os estados do sistema ocorrem apenas em instantes de tempo específicos, a partir de ocorrências

determinísticas, dizemos ainda que o sistema é orientado a eventos. Ambas as características aplicadas, nos levam à definição de Sistemas a Eventos Discretos, segundo a tradução livre de [Cassandras and Lafortune \(2008\)](#):

Definição 2.1.1 (Sistema a Eventos Discretos) *Um DES é um sistema de estados discretos, orientado a eventos, em outras palavras, a evolução de seus estados depende inteiramente da ocorrência de eventos discretos e assíncronos ao longo do tempo.* ♦

Muitos sistemas reais de fato são DES, como sistemas em ambientes computacionais por exemplo, mas além destes, existem ainda diversas aplicações em sistemas físicos, nos quais se torna viável a modelagem de sistemas complexos em DES. A representação é possível desde que o objetivo de controle possa ser atingido ao se descrever o sistema em estados e eventos discretos específicos, que evoluem ao longo do tempo, em função da percepção da ocorrência de seus eventos.

2.1.1 Características e Vantagens da Modelagem de DES

Deve-se discernir as diferenças entre sistemas a tempo discreto e sistemas DES. Pode-se dizer que todo DES é um sistema a tempo discreto, porém nem todo sistema a tempo discreto é um DES. Em ambos os casos avalia-se a evolução do sistema ao longo do tempo, contudo, no caso de sistemas DES a análise se dedica à ordem em que ocorrem os eventos, sendo que os instantes ocorridos, em si, não são fundamentais ao estudo do sistema.

Ao modelar um DES, o comportamento do sistema é simplificado por meio de uma ordem lógica e bem organizada de eventos e transições de estados. Aplicando corretamente a metodologia, pode-se avaliar de forma individual os componentes do sistema, observando o passo a passo de cada processo e, em seguida, encontrar de forma sistemática a representação do sistema como um todo. Dessa forma, é possível enxergar todas as possibilidades de evolução e, também, avaliar as restrições necessárias a um comportamento desejado, por intermédio das técnicas de Controle Supervisório que serão expostas nas próximas seções deste capítulo. Tratando-se, principalmente, de sistemas que envolvem roteamento e tráfego, a

modelagem se torna particularmente interessante, pois o controle supervisório é capaz de fornecer ao projetista, de forma metódica, as melhores rotas, baseando-se na sincronização de modelos individuais e restrições de seus componentes.

2.1.2 Exemplos de Sistemas DES

Nesta subseção, serão apresentados alguns exemplos de sistemas que podem ser naturalmente modelados através dos métodos propostos pela teoria de Sistemas a Eventos Discretos. O objetivo é estimular a criatividade e entendimento do leitor para aplicações reais possíveis.

Dentre os sistemas mais clássicos e versáteis em sua representação em DES, estão os Sistemas de Filas, os quais podem ter sua estrutura aplicada na análise de diversos sistemas. Basicamente, tratam-se de sistemas nos quais existem entidades, recebidas como entradas, que aguardam por determinado recurso ou atendimento. A entidade que realiza ação sobre essas entradas possui capacidade limitada e demandam um certo tempo de processamento, o que leva ao enfileiramento das entradas ao longo do tempo ([Cassandras and Lafortune, 2008](#)).

Na literatura, é comum encontrar as notações *cliente* e *servidor*. As entradas do sistema são chamadas de clientes, e os recursos utilizados por estes clientes são fornecidos por entidades chamadas de servidores. Entende-se por fila então, um conjunto, ou sequência, das entradas de um sistema aguardando pela disponibilidade de um servidor. Em alguns casos também pode-se encontrar o termo *buffer* para se referir a uma fila.

Existem diversos sistemas deste tipo, como por exemplo: pessoas aguardando atendimento num banco, mensagens aguardando transmissão em um sistema de comunicação, semáforos controlando o tráfego de veículos, etc. Neste tipo de sistema, os momentos de mudança de estado dos clientes e servidores podem ser modelados como eventos com bastante naturalidade.

Exemplo 2.1.1 *Considere como exemplo uma fila de banco. Neste caso o conjunto de eventos pode ser descrito como:*

$$E = \{e_c, e_a, e_s\} \quad (2.1)$$

em que

- e_c é a chegada de um novo cliente ao banco;
- e_a é o início do atendimento de um cliente em espera;
- e_s é a saída de um cliente do caixa após atendimento.

Os estados de interesse do sistema podem se resumir ao comprimento da fila e aos estados do caixa. Supõe-se que o caixa do banco B pode assumir os estados B_0 ou B_1 , que representam desocupado e ocupado, respectivamente. Considera-se ainda que a fila F tem seus estados representados numericamente pelo número de pessoas na fila, e possui capacidade máxima N. Portanto, uma possível representação do espaço de estados desse sistema consiste em vetores $\mathbf{x} = [B_i, F_j]^T$, com $i = \{0,1\}$ e $0 \leq j \leq N$.

As transições de estado podem ser descritas de forma lógica, por meio do acontecimentos dos eventos. Para isto, basta se valer do comportamento natural do sistema:

- Ao ocorrer o evento e_c a fila é incrementada, passado do estado F_j para o estado F_{j+1} ;
- O evento e_a ocorrerá quando o caixa estiver no estado B_0 e a fila num estado F_j , com $j > 0$. Assim, o caixa passará ao estado B_1 e a fila retornará ao estado F_{j-1} ;
- O evento e_s ocorrerá quando o caixa estiver no estado B_1 , após determinado tempo de atendimento, causando a transição do estado B_1 para o estado B_0 ;
- Os eventos e_a e e_s devem ocorrer de forma alternada, iniciando por e_a .

O gráfico da Figura 2.1 foi criado em ambiente de simulação computacional, com o software MATLAB ([The MathWorks, Inc., 1994–2022](#)). O código implementado, de acordo com a lógica descrita acima, resultou na análise temporal que demonstra evolução dos estados \mathbf{x} (Eq. 2.2) do sistema. O evento e_c ocorre em instantes de tempo quaisquer, neste exemplo em $t = \{1, 4, 5, 7, 8, 10\}$ minutos. O tempo decorrido para atendimento de cada cliente é de 2,5 minutos.

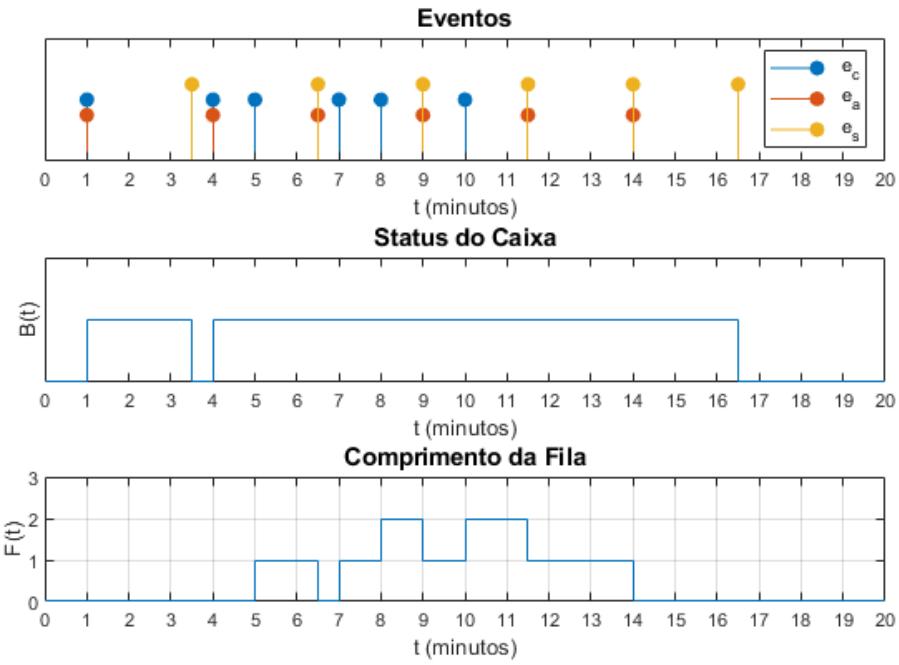


Figura 2.1: Evolução temporal de um sistema de fila de banco.

$$\boldsymbol{x}^T = \begin{cases} [B_0, F_0], & \text{para } 0 \leq t < 1; \\ [B_1, F_0], & \text{para } 1 \leq t < 3,5; \\ [B_0, F_0], & \text{para } 3,5 \leq t < 4; \\ [B_1, F_0], & \text{para } 4 \leq t < 5; \\ [B_1, F_1], & \text{para } 5 \leq t < 6,5; \\ [B_1, F_0], & \text{para } 6,5 \leq t < 7; \\ [B_1, F_1], & \text{para } 7 \leq t < 8; \\ [B_1, F_2], & \text{para } 8 \leq t < 9; \\ [B_1, F_1], & \text{para } 9 \leq t < 10; \\ [B_1, F_2], & \text{para } 10 \leq t < 11,5; \\ [B_1, F_1], & \text{para } 11,5 \leq t < 14; \\ [B_1, F_0], & \text{para } 14 \leq t < 16,5; \\ [B_0, F_0], & \text{para } t \geq 16,5. \end{cases} \quad (2.2)$$

Na Seção 2.2 o Exemplo 2.1.1 é retomado com o Exemplo 2.2.1 realizando sua representação em dois modelos de autômatos, um para a dinâmica do caixa do banco, com 2 estados, e outro para a dinâmica da fila, com $N + 1$ estados. Por fim, no Exemplo 2.2.2 os dois modelos são usados para a composição em uma planta geral, sincronizada. Assim, vistos os formalismos lógicos, resultando em um modelo de autômato finito, com $2(N + 1)$ estados, capaz de representar a dinâmica completa do sistema.

2.2 Autômatos e Linguagens

Esta seção apresenta as principais definições e conceitos utilizados para representar DES através de autômatos e, assim, utilizar essa representação para sintetização de um controlador supervisório.

2.2.1 Autômatos

Autômatos possuem representação gráfica e matemática, que conseguem descrever logicamente o comportamento de DES. Um autômato denotado por G pode ser definido em função de cinco conceitos:

$$G = (S, \Sigma, f, s_0, S_m), \quad (2.3)$$

em que

- S é o conjunto de todos os dos estados do autômato G ;
- Σ é o conjunto de eventos do autômato, comumente chamado de alfabeto, uma sequência com um ou mais eventos é chamada de palavra;
- f é a função de transição entre estados, definida da forma $f : S \times \Sigma \rightarrow S$;
- s_0 é o estado inicial do autômato G ;
- S_m é um subconjunto de S que contêm os estados marcados do autômato G , que podem representar a conclusão de uma tarefa, ou fim de um ciclo.

Como uma expansão do conceito de alfabeto, defini-se também o *fechamento de Kleene* Σ^* como o conjunto das palavras w de comprimento finito formadas

com o alfabeto Σ . Mais adiante serão definidas as Linguagens formais utilizadas para representar os autômatos, para as quais estes conceitos serão necessários.

A função de transição de estados pode ser definida como

$$f(S_i, w) = S_j, \quad (2.4)$$

em que

- S_i é o estado de partida;
- w uma palavra formada sobre o alfabeto Σ ;
- S_j é o estado de resultante após a ocorrência da palavra.

A representação gráfica de um autômato, através de um grafo orientado, expõe visualmente os mesmos conceitos. Simbolicamente, os estados são representados por círculos, sendo que o estado inicial é apontado por uma seta e, os estados marcados são representados por um círculo duplo, ou círculo preenchido. Os eventos orientam a transição entre estados, e são simbolizados como setas que ligam de um estado a outro. Eventos controláveis podem ser representados com um traço na seta de transição de estados.

Para ilustrar esta representação, considere o Exemplo 2.2.1 a seguir como uma possível abordagem para o sistema do Exemplo 2.1.1, visto anteriormente.

Exemplo 2.2.1 *Uma das formas de se representar o sistema, é descrevê-lo em dois subsistemas. Um primeiro, voltado aos status do caixa do banco, e um segundo, voltado aos estados de comprimento da fila de clientes.*

O comportamento do caixa do banco, descrito como um autômato G_1 , é mostrado na Figura 2.2. Pode-se descrever seu autômato de maneira simples, sendo seus estados descritos por

$$S = \{B_0, B_1\}, \quad (2.5)$$

os eventos por

$$\Sigma = \{e_a, e_s\}, \quad (2.6)$$

o estado inicial por

$$s_0 = B_0, \quad (2.7)$$

o conjunto de estados marcados dado por

$$S_m = \{B_0\}, \quad (2.8)$$

e a função de transição entre estados definida da forma

$$f(s, w) = \begin{cases} B_1, & \text{se } s = B_0 \text{ e } w = e_a; \\ B_0, & \text{se } s = B_1 \text{ e } w = e_s. \end{cases} \quad (2.9)$$

Uma vez que B_0 representa o caixa desocupado, B_1 representa o caixa ocupado atendendo a um cliente, e_a representa o evento de início do atendimento de um cliente em espera e e_s o evento de saída do cliente após atendimento.

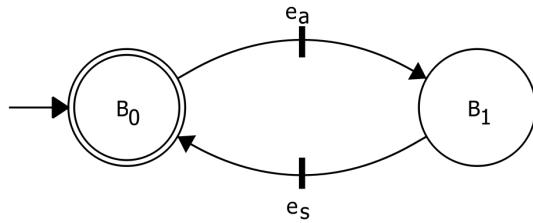


Figura 2.2: Representação por autômato do comportamento do caixa de um banco.

O comportamento da fila descrito como um autômato G_2 , é mostrado na Figura 2.3. Os estados da fila são representados pelo seu comprimento, os eventos descrevem a interação dos clientes com a fila e com o caixa. O estado inicial é aquele é que a fila está vazia e, o estado marcado é aquele em que a fila retorna ao seu estado inicial, após finalizados todos os atendimentos. Vistos os formalismos matemáticos necessários, temos para o subsistema da fila os estados:

$$S = \{F_0, F_1, F_2, \dots, F_N\}, \quad (2.10)$$

os eventos

$$\Sigma = \{e_c, e_a\}, \quad (2.11)$$

o estado inicial

$$s_0 = F_0, \quad (2.12)$$

o conjunto de estados marcados é dado por

$$S_m = \{F_0\}, \quad (2.13)$$

e a função de transição entre estados definida da seguinte forma

$$f(s, w) = \begin{cases} F_{n+1}, & \text{se } s = F_n \text{ e } w = e_c; \\ F_n, & \text{se } s = F_{n+1} \text{ e } w = e_a. \end{cases} \quad (2.14)$$

em que $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

A Tabela 2.1 explica as transições de estado na fila do banco, ocasionadas pela ocorrência dos eventos de acordo com a função de transferência da Equação 2.14, a representação gráfica do autômato pode ser vista na Figura 2.3.

Tabela 2.1: Transições de estados para a fila do banco, conforme a Equação 2.14.

Estado de origem	Evento	Estado resultante	Função de Transição
F_0	e_c	F_1	$f(F_0, e_c) = F_1$
F_1	e_a	F_0	$f(F_1, e_a) = F_0$
F_1	e_c	F_2	$f(F_1, e_c) = F_2$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
F_{N-1}	e_a	F_{N-2}	$f(F_{N-1}, e_a) = F_{N-2}$
F_{N-1}	e_c	F_N	$f(F_{N-1}, e_c) = F_N$
F_N	e_a	F_{N-1}	$f(F_N, e_a) = F_{N-1}$

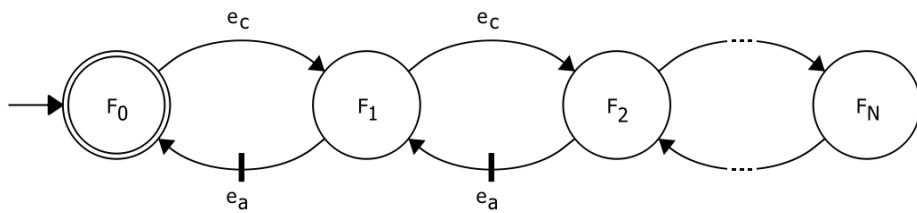


Figura 2.3: Representação por autômato do comportamento de uma fila de banco.

As transições entre estados que não podem ser verificadas na função de transição de estados da Equação 2.14, são chamadas não definidas e, portanto, não fazem parte do comportamento modelado do subsistema.

2.2.2 Linguagens Representadas por Autômatos

Formalmente, pode-se definir uma linguagem como um conjunto de palavras formadas através do alfabeto Σ . Uma linguagem L é portanto um subconjunto do fechamento de Kleene Σ^* .

A dinâmica de um autômato pode ser lida e interpretada através de suas linguagens, são elas: A Linguagem Gerada e a Linguagem Marcada.

Definição 2.2.1 (Linguagem Gerada) *A linguagem gerada por um autômato G (Eq. 2.3) representa o conjunto de todas as sequências de eventos de comprimentos variados, ou seja, palavras w as quais possuem função de transição de estados definidas a partir do estado inicial de G . Formalmente pode se definir:*

$$\mathcal{L}(G) = \{w \in \Sigma^* \mid f(s_0, w)!\}. \quad \blacklozenge$$

A notação $f(s_i, w)!$ representa que a transição de estados provocada pela palavra w está definida, ou seja é possível, partindo do estado s_i .

Definição 2.2.2 (Linguagem Marcada) *A linguagem marcada por um autômato G (Eq. 2.3) representa o conjunto de todas as palavras w que definem transição partindo do estado inicial levando a um estado marcado de G . Formalmente pode se definir:*

$$\mathcal{L}_m(G) = \{w \in \mathcal{L}(G) \mid f(s_0, w) \in S_m\}. \quad \blacklozenge$$

Pode-se afirmar, sem perda de generalidade que $\mathcal{L}_m(G) \subset \mathcal{L}(G)$.

2.2.3 Operações em Autômatos

As definições de linguagens, como visto, são feitas por meio da lógica de conjuntos matemáticos, a partir disto, operações comuns entre conjuntos podem ser aplicadas, como uniões, interseções etc. Além, existem operações que sincronizam a

dinâmica de dois ou mais autômatos. Dentre os objetivos destas, os principais são a modularização de sistemas complexos, permitindo a análise particionada dos componentes do sistema, além da implementação de especificações que restringem o sistema ao comportamento desejado através de regras simples.

Nesta seção serão apresentadas as principais operações utilizadas nesta dissertação, tais que são aplicáveis à composição ou sincronização entre autômatos para fins de controle. Para mais detalhes sobre operações com autômatos, sugere-se consultar [Cassandras and Lafourche \(2008\)](#).

Definição 2.2.3 (Produto entre Autômatos) *O produto entre dois autômatos $G_1 = (S_1, \Sigma_1, f_1, s_{01}, S_{m2})$ e $G_2 = (S_2, \Sigma_2, f_2, s_{02}, S_{m2})$ resulta em um autômato G que pode ser definido como:*

$$G = G_1 \times G_2 = (S, \Sigma, f, s_0, S_m), \quad (2.15)$$

em que

S: é dado pela combinação dos estados de ambos os autômatos, tais quais podem ser alcançados no autômato G segundo f;

$\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$: é dado pela união entre os alfabetos de G_1 e G_2 ;

f: é a função de transição de estados de G, a qual é definida para todas as transições de estado que podem ocorrer de forma simultânea em G_1 e G_2 , da forma:

$$f((s_1, s_2), w) = \begin{cases} (f_1(s_1, w), f_2(s_2, w)) & \text{quando } f_1(s_1, w)! \text{ e } f_2(s_2, w)!; \\ (s_1, s_2) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.16)$$

$s_0 = s_{01}|s_{02}$: é o estado formado pela combinação dos estados iniciais dos autômatos G_1 e G_2 ;

S_m : é dado pelas duplas de estados marcados de ambos os autômatos que podem ser alcançadas segundo f. ♦

Pode-se dizer que, ao realizar a operação de produto, o resultado obtido é tal que a dinâmica de dois autômatos se torna sincronizada a medida que as transições em ambos os autômatos se dão apenas sobre eventos comuns.

Definição 2.2.4 (Composição Paralela entre Autômatos) A composição paralela entre dois modelos de autômatos $G_1 = (S_1, \Sigma_1, f_1, s_{01}, S_{m2})$ e $G_2 = (S_2, \Sigma_2, f_2, s_{02}, S_{m2})$ resulta em um autômato G que pode ser definido como:

$$G = G_1 || G_2 = (S, \Sigma, f, s_0, S_m), \quad (2.17)$$

em que

S : é dado pela combinação dos estados de ambos os autômatos, tais quais podem ser alcançados no autômato G segundo f ;

$\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2$: é dado pela união entre os alfabetos de G_1 e G_2 ;

f : é a função de transição de estados de G , a qual é definida para todas as transições de estado que podem ocorrer de forma simultânea ou não em G_1 e G_2 , da forma:

$$f((s_1, s_2), w) = \begin{cases} (f_1(s_1, w), f_2(s_2, w)) & \text{quando } f_1(s_1, w)! \text{ e } f_2(s_2, w)!; \\ (f_1(s_1, w), s_2) & \text{quando apenas } f_1(s_1, w)!; \\ (s_1, f_2(s_2, w)) & \text{quando apenas } f_2(s_2, w)!; \\ (s_1, s_2) & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.18)$$

$s_0 = s_{01}|s_{02}$: é o estado formado pela combinação dos estados iniciais dos autômatos G_1 e G_2 ;

S_m : é dado pelas duplas de estados marcados de ambos os autômatos que podem ser alcançadas segundo f . \blacklozenge

Na composição paralela a execução de um evento comum a ambos os autômatos somente ocorre caso as transições possam ocorrer simultaneamente. Em particular, quando os conjuntos de eventos E_1 e E_2 são idênticos, a operação de composição paralela se reduz à operação de produto, uma vez que todos os eventos são comuns e, portanto, as transições devem ocorrer de forma simultânea, como na Eq. (2.16).

A fim de ilustrar os conceitos vistos, é interessante considerar novamente o Exemplo 2.2.1, de um sistema de fila de banco. Dividiu-se o sistema em dois subsistemas, representados por autômatos independentes, um voltado à dinâmica do caixa do banco, denominado G_1 , e outro voltado à dinâmica da fila de clientes, denominado G_2 . No Exemplo 2.2.2 a seguir, a dinâmica de ambos os modelos é sincronizada através de operação entre eles.

Exemplo 2.2.2 Utilizando o método da composição paralela, podemos definir um novo autômato, G , capaz de compor todas as possibilidades de evolução do sistema, pela sincronização do comportamento individual de G_1 e G_2 . Temos que o modelo completo é dado por

$$G = G_1 \parallel G_2 = (S, \Sigma, f, s_0, S_m), \quad (2.19)$$

em que os estados são

$$S = \{B_0|F_0, B_1|F_0, B_0|F_1, B_1|F_1, \dots, B_0|F_N, B_1|F_N\}, \quad (2.20)$$

os eventos são

$$\Sigma = \{e_c, e_a, e_s\}, \quad (2.21)$$

o estado inicial é

$$s_0 = B_0|F_0, \quad (2.22)$$

o conjunto de estados marcados é dado por

$$S_m = \{B_0|F_0\}, \quad (2.23)$$

e a função de transição entre estados é definida tal qual a Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Transições de estados para autômato composto do sistema de caixa e fila de banco.

Estado de origem	Evento	Estado resultante	Função de Transição
$B_0 F_n$	e_c	$B_1 F_n$	$f(B_0 F_n, e_c) = B_1 F_n$
$B_1 F_n$	e_c	$B_1 F_{n+1}$	$f(B_1 F_n, e_c) = B_1 F_{n+1}$
$B_0 F_{n+1}$	e_a	$B_1 F_n$	$f(B_0 F_{n+1}, e_a) = B_1 F_n$
$B_1 F_n$	e_s	$B_0 F_n$	$f(B_1 F_n, e_s) = B_0 F_n$

em que $n = 0, 1, \dots, N - 1$

A representação do autômato G (Eq. 2.19) como um gráfico orientado, pode ser vista na Figura 2.4.

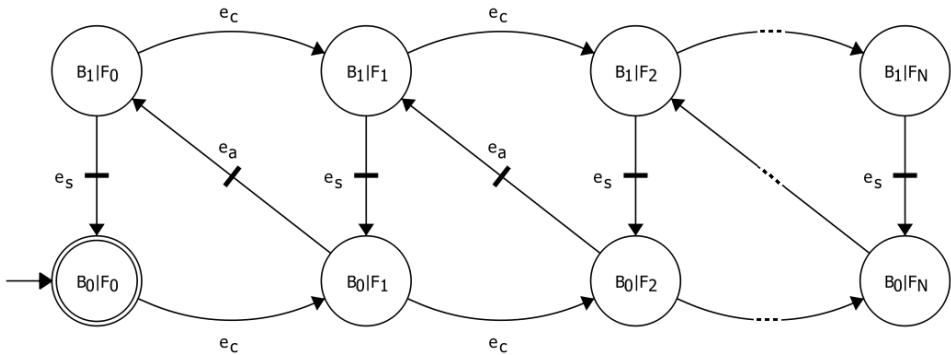


Figura 2.4: Composição Paralela entre os autômatos das Figuras 2.2 e 2.3.

2.3 Controle Supervisório

Ao realizar a modelagem de sistemas, avaliando seu comportamento natural, muitas vezes se chega a conclusão de que este comportamento pode levar a falhas, condições inseguras, ou mesmo perda de eficiência. Portanto, alternativas de controle são necessárias, de forma que se condicione o sistema a um comportamento desejado ou esperado, determinando as especificações aplicáveis.

Com o objetivo de realizar controle sobre um autômato G , chamado de planta, a fim de alterar seu comportamento, segundo especificações, neste capítulo será introduzido o conceito de supervisor da Teoria de Autômatos.

Em um autômato, o comportamento é lido e interpretado através de eventos e estados de seus componentes, como visto anteriormente, isto se representa por meio de suas linguagens. Os eventos causam as transições de estados e, levam de forma sequencial ao final da execução das tarefas, ou estados marcados. Pode-se abstrair a função de um supervisor como a de um observador, atuante sobre alguns, ou todos, os eventos executados pela planta, sendo capaz de determinar quais eventos são permitidos ou não a cada estado da execução. Contudo, deve-se considerar inclusive que, em alguns casos, podem haver eventos que devem ser lidos pelo sistema de controle, porém que não são passíveis de ação de controle, chamados incontroláveis. Dessa forma, para garantir que ainda sejam respeitadas as especificações, o supervisório deve agir sobre os eventos controláveis, impedindo sequências ilegais de eventos. Ou seja, impedindo sequências que tornariam possível a ocorrência de eventos incontroláveis, os quais, em determinados estados,

colocariam em risco o comportamento desejado.

Assumindo que todos os eventos modelados na construção do autômato G são observados por um supervisor S , existem dois subconjuntos de eventos que devem ser então levados em consideração, são eles:

- E_c é o conjunto de todos os eventos considerados controláveis, ou seja, cuja ocorrência pode ser impedida pela ação direta do supervisor S ;
- E_{uc} é o conjunto de todos os eventos considerados incontroláveis, ou seja, cuja ocorrência não pode ser impedida de forma direta, pela atuação de dispositivo controlado pelo supervisor.

Existem diversas razões para se considerar um evento como incontrolável, na modelagem de um sistema. Como por exemplo, eventos de falhas, que são por definição inevitáveis, ou ainda outros eventos, condições ou situações, que não podem ser evitadas devido à características ou limitações físicas de atuação de componentes do sistema. De forma genérica, são eventos os quais sua ocorrência não é passível de ação de controle.

Considerando os formalismos necessários a definição formal de um supervisor, temos segundo [Cassandras and Lafortune \(2008\)](#):

Definição 2.3.1 (Supervisor e suas linguagens) *Um supervisor S é uma função que parte da linguagem gerada por G , levando ao conjunto potência de E :*

$$S : \mathcal{L}(G) \rightarrow 2^E. \quad (2.24)$$

O conjunto potência de E , segundo a Teoria de Conjuntos, pode ser entendido como o conjunto que contém todos os subconjuntos de E . O autômato resultante da ação de controle de um supervisor S sobre uma planta G é denotado por S/G . O modelo do sistema controlado é também um sistema DES e, suas linguagens são tais que: a linguagem gerada, denotada por $\mathcal{L}(S/G)$, é um subconjunto da linguagem $\mathcal{L}(G)$, gerada por G , contendo todas as palavras que permanecem executáveis pelo modelo G , mesmo com a ação de S , consideradas as especificações impostas; a linguagem marcada, denotada por $\mathcal{L}_m(S/G)$, é definida como

$$\mathcal{L}_m(S/G) := \mathcal{L}(S/G) \cap \mathcal{L}_m(G).$$

Ou seja, $\mathcal{L}_m(S/G)$ contém as palavras presentes em $\mathcal{L}_m(G)$, as quais respeitam as condições necessárias e a ação de controle de S . De forma geral, temos que

$$\emptyset \subseteq \mathcal{L}_m(S/G) \subseteq \mathcal{L}(S/G) \subseteq \mathcal{L}(G). \quad \blacklozenge$$

A seguir, serão vistos alguns conceitos importantes da Teoria de Autômatos que devem ser levados em consideração na modelagem de sistemas com controle supervisório, a fim de garantir que o modelo a ser gerado é factível.

A nível físico, é importante compreender a relação entre os formalismos da teoria e os aspectos reais do sistema. Um sistema controlado é composto, basicamente, por dois elementos: a planta, ou processo a ser controlado e, o controlador, ou supervisor. A planta se relaciona diretamente à ocorrência dos eventos, os quais, a nível físico se referem essencialmente a comandos específicos, direcionados à atuadores e a sinais lidos por sensores. Por outro lado, o supervisor se relaciona estruturalmente ao nível lógico do sistema, precisando conhecer e observar a dinâmica do processo a fim definir as ações a se exercer sobre eventos controláveis, em determinados momentos ou situações do processo.

2.3.1 Sistemas Bloqueantes

Sistemas DES bloqueantes são aqueles que possuem determinadas palavras em sua linguagem que permitem chegar a condições de *deadlock* ou *livelock*.

Um *deadlock* é definido quando um autômato G , pode atingir um estado s , não marcado, tal que $f(s,e)$ não está definida para nenhum evento e , ou seja, ao atingir o estado s nenhum evento poderá ser executado para causar nova transição de estado. Dessa forma, diz-se que o sistema bloqueou, antes de alcançar um estado marcado, ou seja, finalizar uma tarefa.

De forma similar, existe a definição de *livelock*. Esta condição é ocorre quando existe no autômato um grupo finito de estados não marcados que formam um componente fortemente conectado. Neste caso, existem transições definidas por f entre estes estados, porém, uma vez que um deles é alcançado, não há transição

definida que possa fazer o sistema alcançar algum estado fora do grupo. Por consequência, o sistema não poderia chegar à conclusão de uma tarefa, representada por um estado marcado.

Formalmente, um autômato é dito bloqueante quando satisfaz a condição

$$\mathcal{L}(G) \neq \overline{\mathcal{L}_m(G)}, \quad (2.25)$$

e não bloqueante quando

$$\mathcal{L}(G) = \overline{\mathcal{L}_m(G)}. \quad (2.26)$$

A notação $\overline{\mathcal{L}_m(G)}$ representa a operação de prefixo fechado, provinda da Teoria de Conjuntos. De forma genérica, um conjunto \overline{B} contém todos os prefixos de todas as palavras do conjunto B . Uma linguagem L é chamada de prefixo-fechada quando qualquer prefixo de qualquer palavra em L é também uma palavra de L .

Em sistemas controlados, ao projetar um supervisor e definir uma linguagem $\mathcal{L}(S/G)$, o objetivo é encontrar um sistema DES S/G tal que não seja bloqueante, logo, busca-se uma linguagem tal que

$$\mathcal{L}(S/G) = \overline{\mathcal{L}_m(S/G)}. \quad (2.27)$$

Na síntese de um supervisor, diz-se que um supervisor S , controlando um DES G é bloqueante se S/G é bloqueante e, S é não bloqueante se S/G também não o for. Devido a definição da linguagem marcada como a sequência de eventos que leva conclusão de tarefas, um supervisor bloqueante resulta em um sistema controlado que não é capaz de finalizar a execução das tarefas desejadas.

Os conceitos vistos até aqui devem ser levados em consideração sobre o modelo de uma planta G a fim de avaliar a viabilidade de se aplicar controle sobre ela, e ainda, avaliar necessidades possibilidades de mudanças sobre o processo para tornar o controle factível.

2.3.2 Especificações

Em uma linguagem $\mathcal{L}(G)$ podem haver palavras que levam o sistema a estados indesejados, condições bloqueantes e/ou violações de critérios de segurança ou

eficiência. Essas sequências de eventos não devem ocorrer, para que se possa impor o comportamento esperado ao sistema. Isto é, as especificações são necessárias quando o comportamento de uma planta é insatisfatório por si só, e servem ao propósito de restringir o comportamento desta planta a um subconjunto de $\mathcal{L}(G)$.

Na prática, as especificações nada mais são que componentes modelados como autômatos, porém, que não são focados em sequências lógicas de execução de tarefas, mas sim em restrições às linguagens da planta G . Ao sincronizar as especificações com a planta o objetivo é obter as linguagens do DES controlado, $\mathcal{L}(S/G)$ e $\mathcal{L}_m(S/G)$, livres de palavras que representam comportamento indesejado. Os tipos mais comuns de especificações serão descritos adiante.

Uma vez que seja identificado um ou mais Estados Ilegais, se constrói a especificação H_{espc} de forma que ao realizar a composição entre esta e a planta G , o autômato resultante deve excluir de sua linguagem as palavras que levariam a o(s) estado(s) ilegal(is).

Caso exista a necessidade forçar a alternância entre eventos, é possível criar uma especificação, como autômato H_{espc} de dois estados, que restrinja os eventos a e b , por exemplo, a ocorrer alternadamente. O efeito disso é visto ao realizar a composição paralela entre a especificação e a planta G , que resulta em um novo autômato, $H_a = H_{espc} \parallel G$, tal que sua linguagem possui as mesmas palavras das linguagens de G com exceção daquelas em que houvesse duas ou mais ocorrências do evento a em sequência, ou duas ou mais ocorrências do evento b em sequência.

Quando ainda é necessário retirar da planta G um determinado comportamento, sequência de eventos ou palavra da linguagem, uma especificação pode ser construída da seguinte forma: constrói-se um, ou mais, autômatos H_{esp} que carregam em sua dinâmica apenas as palavras permitidas. Desta forma, pode se obter o comportamento desejado da planta por $H_a = H_{esp} \parallel G$.

Em geral, para definir especificações, são modelados autômatos que possuem todos os seus estados marcados. Dessa forma, ao realizar a sincronização e a síntese do supervisório, a dinâmica do sistema e os estados marcados são ditados pela dinâmica do processo, ou seja da planta G .

Neste ponto da discussão, o embasamento teórico já permite avançar para a aplicação dos formalismos vistos ao objeto de estudo proposto. No Capítulo 3 se apresenta a metodologia para cumprir os objetivos propostos na Seção 1.3.

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias implementadas na modelagem do Objeto de Estudo. Busca-se impor os conceitos e lógica matemática vistos no Capítulo 2 ao exemplo de sistema real, de forma que seja atendida a dinâmica do mesmo, em suas particularidades e restrições.

3.1 Estudo de Caso

Nesta seção propõe-se o estudo sobre um caso particular do Objeto de Estudo, a fim de contextualizar a modelagem a uma análise de sistema que possui uma planta funcional. A planta analisada se trata de um circuito, ramificado, de movimentação ferroviária de cargas perigosas. Serão definidos: os componentes do modelo da planta, ou seja, os trechos, veículos, dispositivos de sinalização e demais elementos aplicáveis; os eventos observáveis na planta, definindo-os como controláveis ou incontroláveis conforme dinâmica prevista; os status, os estados, do sistema a serem acompanhados durante a execução de tarefas, baseados na logística de movimentação das cargas, dentre outros aspectos.

Para realização de testes e demais operações necessárias ao projeto utilizou-se o software *DESTool* ([Thomas Moor, 2008-2016](#)), ferramenta dedicada à modelagem e análise de sistemas DES. O software utiliza-se dos conceitos da Teoria de Autômatos e Teoria de Controle Supervisório dando recursos para representação gráfica dos modelos, diversas operações sobre os autômatos e síntese de

controladores supervisórios. Além disso, fornece suporte à linguagens textuais de programação para interface com outros programas, se desejado.

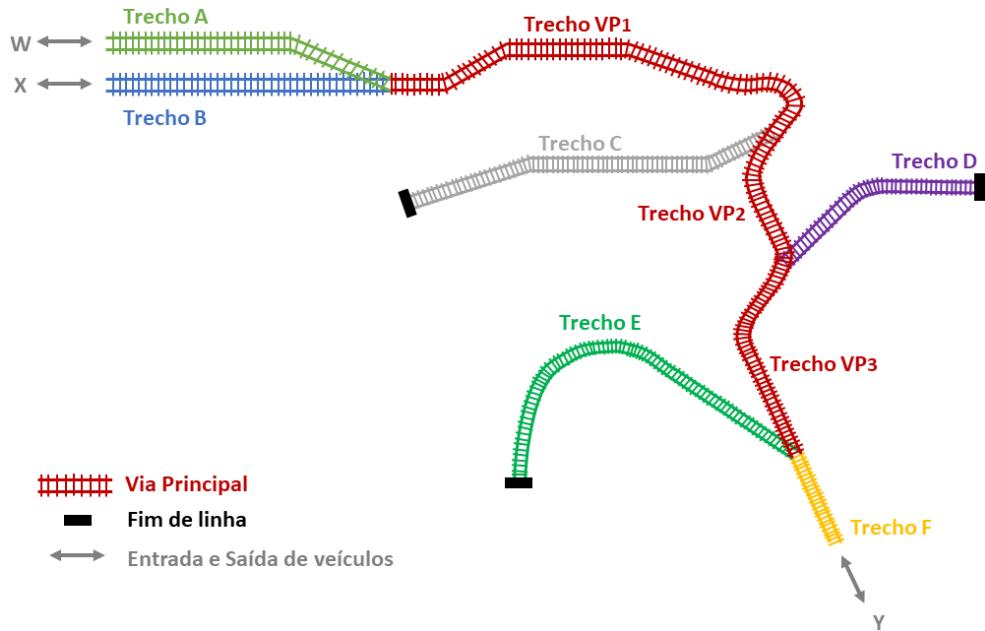


Figura 3.1: Malha ferroviária a ser modelada.

O processo proposto se baseia no trecho de movimentação ferroviário visto na Figura 3.1. Tipicamente, em plantas industriais, nas quais a logística de grandes cargas, seja de matéria prima, resíduos de produção ou produto acabado, é feita por intermédio de transporte ferroviário, a operação se torna de grande risco, devido a vários fatores. A baixa visibilidade entre trechos, o perfil em curvas da via permanente, o volume e peso das cargas e as características do transporte, com baixa eficiência de frenagem, exigem que sejam definidos critérios de segurança para as operações, que eliminem ou ao menos minimizem as condições de risco. A sinalização ferroviária ao longo da via permanente, orienta as composições que se movimentam a fim de evitar colisões entre trens. Diferentemente do que ocorre com o transporte rodoviário, no qual a sinalização luminosa está centrada nos cruzamentos entre vias, no transporte ferroviário a sinalização se dá ao longo das vias permanentes, quando acesa indica a ocupação do trecho em algum ponto de sua extensão. Ao se tratar de movimentações de baixa velocidade, com baixa

visibilidade a longa distância, a limitação de acesso a trechos de maior velocidade é um critério de segurança confiável, uma vez que a característica construtiva da via permanente, com dispositivos de mudança de trecho instalados em cada intercessão de acesso à pátios, limitam a velocidade de aproximação entre estes cruzamentos.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres, do Ministério da Infraestrutura dispõe sobre operações de direito de passagem e de tráfego mútuo ferroviário ([ANTT, 2021](#)), e define um trecho ferroviário como um segmento da malha ferroviária, que seja delimitado por: pátios de operação de carga e descarga, pátios limítrofes da ferrovia, pátio de mudança de direção ou pátios que permitam a interconexão das malhas de diferentes concessionárias.

Além do conceito de trecho ferroviário, alguns outros são importantes para o entendimento do processo da planta a ser modelada. Partindo do ponto de vista construtivo do transporte, há algumas características fundamentais ([Theeg and Vlasenko, 2019](#)):

- a via permanente delimita o caminho a ser percorrido pelos veículos, num sistema mecânico formado entre as rodas do veículo e a via férrea, podendo ser alterado somente por aparelhos de mudança de via. Manter a integridade e orientações das vias é essencial para a segurança, fator crucial para evitar descarrilamentos;
- As distâncias de frenagem são longas, devido ao baixo desempenho de frenagem das rodas de aço nos trilho de aço, contudo as velocidades de operação podem ser altas. Dependendo do sistema de frenagem, distâncias de frenagem a uma velocidade de 50 a 70 km/h são maiores do que a rota visível e desobstruída à frente do maquinista e, frenagens a uma velocidade de 160 km/h precisam de um quilômetro ou mais. Condições climáticas extremas, como neve e gelo, tornam estas distâncias ainda maiores. Sendo as distâncias visíveis insuficientes para os maquinistas decidirem quando reduzir a velocidade ou parar, eles dispõem de meios muito limitados para evitar colisões, e precisam confiar nos sistemas técnicos.

De forma geral, as malhas de transporte ferroviário são compostas, portanto, por três componentes principais:

- A via permanente, por onde circula o tráfego ferroviário;
- os veículos, que são as unidades móveis dos sistemas, responsáveis por transportar pessoas e cargas;
- sistemas de sinalização e intertravamento nas vias e a bordo, para garantir a segurança das movimentações.

Na Figura 3.1, é proposta uma malha ferroviária composta por cinco trechos A, B, C, D, E e F , conectados em uma Via Principal, também subdividida em três subtrechos VP_1, VP_2 e VP_3 , para melhor abstração dos conceitos. Os trechos A, B e F possibilitam a conexão da malha a outras possíveis malhas, por meio das entradas W, X e Y , respectivamente. Os trechos C, D e E são limitados por fins de linha e, em contextos industriais reais, são tipicamente: pátios de carga e descarga de matéria prima, resíduos de produção ou produto acabado e, podem fazer interface à outros meios de transporte, como rodoviário ou hidroviário, ou ainda, serem construtivamente parte de etapas da produção da planta industrial, como entrada de silos e alimentadores de correias.

A modelagem do sistema de sinalização admitirá que os eventos de deslocamento entre trechos, por uma composição qualquer, podem ser lidos pelo controlador, por meio de um sistema de instrumentação. Entende-se por composição, um ou mais veículos ferroviários conectados, em geral, locomotiva e vagões. Assim, cada um dos trechos deve contar com um sistema de sinalização individual, no qual sua dinâmica de funcionamento se dará por entradas e saídas de quaisquer composições.

O sistema supervisório construído deve proporcionar ao controlador geral resultados nos quais seja possível visualizar a situação de cada um dos trechos em tempo real, ao longo da execução dos eventos. Aqui, vale ressaltar que os eventos a serem lidos, podem ocorrer em qualquer ordem, pois dependerão da logística de movimentação da planta industrial a que pertencer o sistema. O objetivo é que o sistema de controle de sinalização seja automatizado e genérico.

Assume-se também que os dispositivos de mudança de via na malha da Figura 3.1 são construtivamente restritivos à movimentação e, podem ser de acionamento manual, de mola ou elétrico. Neste projeto serão considerados dois tipos de dispositivos, manual e de mola:

- Entre os trechos A , B e VP_1 , o acionamento se dá de forma manual, permitindo o movimento de A para VP_1 e de VP_1 para A em uma posição e, de B para VP_1 e de VP_1 para B em outra posição.
- Entre os trechos C , VP_2 e VP_1 , o acionamento se dá de forma manual, permitindo o movimento de C para VP_1 e de VP_1 para C em uma posição e, de VP_2 para VP_1 e de VP_1 para VP_2 em outra posição.
- Entre os trechos D , VP_2 e VP_3 , o acionamento se dá de forma manual, permitindo o movimento de D para VP_3 e de VP_3 para D em uma posição e, de VP_2 para VP_3 e de VP_3 para VP_2 em outra posição.
- Entre os trechos VP_3 , E e F , o dispositivo possui acionamento por mola, permitindo o movimento de E para F , de VP_3 para F e de F para VP_3 em uma posição e, de E para F , de VP_3 para F e de F para E em outra posição. Em vista disto, de maneira particular, os eventos de movimentação de E para F e de VP_3 para F , podem ser vistos como incontroláveis, pois independem do posicionamento.

Os modelos de dispositivos propostos são tais que, ao final do Capítulo 4 será possível refletir sobre a possibilidade de automatização do posicionamento dos dispositivos de mudança de via de forma automatizada, como extensão deste trabalho.

3.1.1 Modelo da Planta

Nesta seção será definido modelo do autômato da planta G , do sistema de sinalização. Para tanto, será explicitada a análise do sistema. Os componentes serão modelados individualmente e, a dinâmica completa de G será obtida por intermédio da sincronização entre os modelos de cada componente.

Inicialmente, é necessário definir o conjunto Σ de eventos a serem observados pelo sistema, que ditam a dinâmica do sistema. Uma vez que se considere que a malha ferroviária pode ser acessada por diferentes locomotivas, que não sejam controladas diretamente pelo controlador de tráfego, ou seja, que não é possível atuar sobre a aceleração e frenagem das composições por meio do sistema de

controle supervisório, deseja-se atuar sobre condições de alerta ao longo malha. Para fins de sinalização, os eventos de interesse se baseiam na movimentação entre trechos. Considera-se que há dispositivos sensores instalados nas intercessões entre trechos capazes de ler o sentido das movimentações. Assim, se define o conjunto de eventos:

- e_{WA} : evento de entrada no trecho A, pela entrada W;
- e_{AW} : evento de saída do trecho A, pela saída W;
- e_{AVP_1} : evento de saída do trecho A sentido a Via Principal 1;
- e_{VP_1A} : evento de saída da Via Principal 1 sentido o trecho A;
- e_{XB} : evento de entrada no trecho B, pela entrada X;
- e_{BX} : evento de saída do trecho B, pela saída X;
- e_{BVP_1} : evento de saída do trecho B sentido a Via Principal 1;
- e_{VP_1B} : evento de saída da Via Principal 1 sentido o trecho B;
- e_{CVP_1} : evento de saída do trecho C sentido a Via Principal 1;
- e_{VP_1C} : evento de saída da Via Principal 1 sentido o trecho C;
- e_{DVP_3} : evento de saída do trecho D sentido a Via Principal 3;
- e_{VP_3D} : evento de saída da Via Principal 3 sentido o trecho D;
- e_{EF} : evento de saída do trecho E sentido ao trecho F;
- e_{FE} : evento de saída do trecho F sentido ao trecho E;
- e_{YF} : evento de entrada no trecho F, pela entrada Y;
- e_{FY} : evento de saída do trecho F, pela saída Y;
- e_{FVP_3} : evento de saída do trecho F sentido a Via Principal 3;
- e_{VP_3F} : evento de saída da Via Principal 3 sentido o trecho G;

- $e_{VP_1VP_2}$: evento de saída da Via Principal 1 sentido a Via Principal 2;
- $e_{VP_2VP_1}$: evento de saída da Via Principal 2 sentido a Via Principal 1;
- $e_{VP_2VP_3}$: evento de saída da Via Principal 2 sentido a Via Principal 3;
- $e_{VP_3VP_2}$: evento de saída da Via Principal 3 sentido a Via Principal 2;

Assume-se que a sinalização do trecho parte de uma condição inicial desativada e, a partir de um evento de entrada neste trecho, a sinalização acende. Após o deslocamento, ao ocorrer um evento de saída do trecho, a sinalização é novamente desativada, encerrando assim um ciclo. Considerando que cada trecho funciona como um *buffer*, a quantidade de estados ocupados depende diretamente da capacidade de cada trecho, neste projeto será capacidade física igual a 02 composições com propulsão própria para cada trecho. Contudo, é importante observar que uma vez que ocorram duas entradas consecutivas, o trecho entra em estado de emergência, ou seja, estado em que possibilita colisão.

Uma característica interessante da movimentação ferroviária a ser levada em conta são as manobras ferroviárias. Não necessariamente, um veículo ferroviário que acessa um trecho por uma extremidade saí pela outra. Tipicamente é necessário que longas composições acessem temporariamente um trecho, em uma direção e sentido, e então, retornem pelo mesmo aparelho de mudança de via, posicionado em outro sentido, executando uma manobra. Sendo assim, o modelo do autômato necessita ser genérico, considerando que um evento de saída deve ocorrer após um evento de entrada, porém, pode se dar pela mesma extremidade ou pela extremidade oposta do trecho. Os estados de interesse se referem à situação da sinalização, que será entendida como apagada, quando o trecho estiver livre, como acessa, quando o trecho estiver ocupado e piscando quando o trecho estiver em emergência, ou seja, quando estiver sendo trafegado por duas composições de forma simultânea. A representação gráfica conceitual para um trecho genérico i pode ser vista na Figura 3.2.

Sendo assim, seja um trecho i , a sinalização automatizada pode ser dada em função da ocorrência dos eventos discretos, tal qual o modelo G_i da Eq. (3.1):

$$G_i = (S_i, \Sigma_i, f_i, s_{0i}, S_{mi}), \quad (3.1)$$

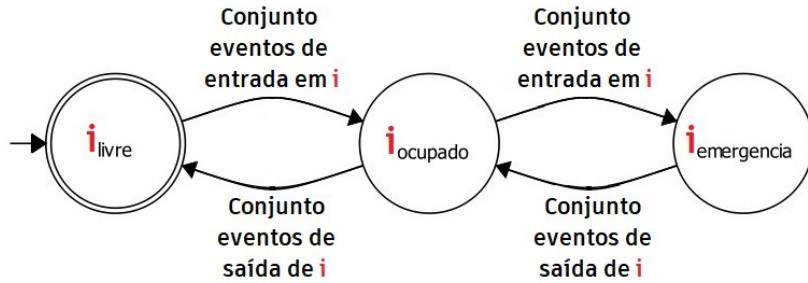


Figura 3.2: Modelo de autômato para sinalização de um trecho.

em que

$$\begin{aligned}
 S_i &= \{i_{livre}, i_{ocupado}, i_{emergencia}\}; \\
 \Sigma_i &= E_{entradas} \cup E_{saídas}; \\
 f_i &\text{ definida conforme grafo da Figura 3.2;} \\
 s_{0i} &= i_{livre}; \\
 S_{mi} &= i_{livre}.
 \end{aligned}$$

A seguir, serão explicitados os modelos construídos para cada trecho da malha da Figura 3.1.

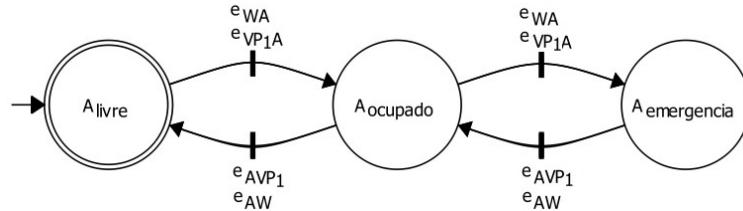
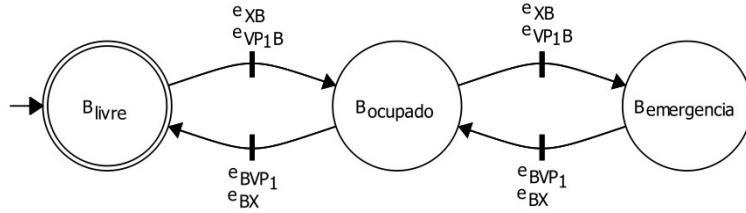
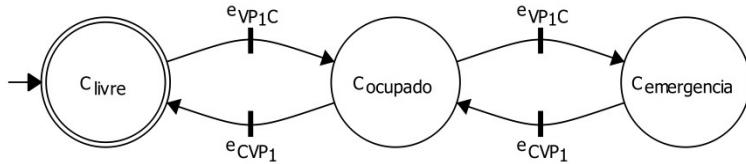


Figura 3.3: Autômato G_A da sinalização do Trecho A.

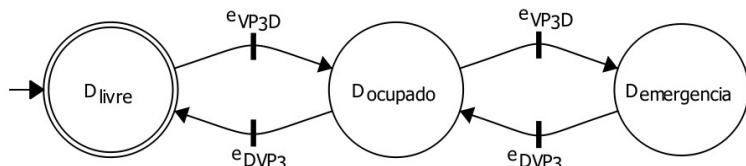
O trecho A pode ser acessado pela entrada W e pelo trecho VP_1 , o autômato da Figura 3.3 demonstra os eventos controláveis de entrada e_{WA} e e_{VP1A} e os eventos controláveis de saída e_{AW} e e_{AVP1} .

Figura 3.4: Autômato G_B da sinalização do Trecho B.

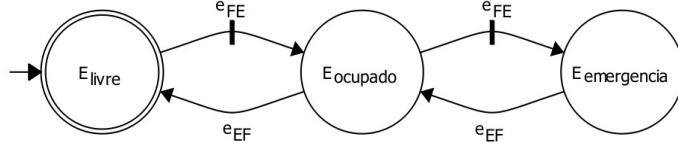
O trecho B pode ser acessado pela entrada X e pelo trecho VP_1 , o autômato da Figura 3.4 demonstra os eventos controláveis de entrada e_{XB} e e_{VP1B} e os eventos controláveis de saída e_{BX} e e_{BVP1} .

Figura 3.5: Autômato G_C da sinalização do Trecho C.

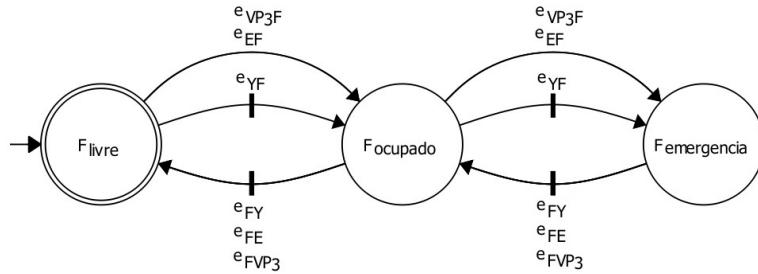
O trecho C pode ser acessado pelo trecho VP_1 , o autômato da Figura 3.5 demonstra o evento controlável de entrada e_{VP1C} e o evento controlável de saída e_{CVP1} .

Figura 3.6: Autômato G_D da sinalização do Trecho D.

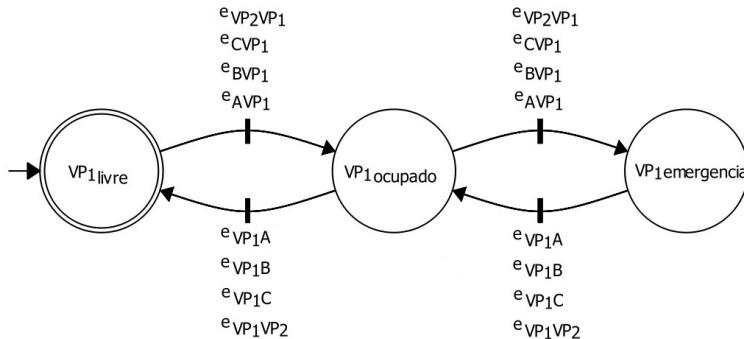
O trecho D pode ser acessado pelo trecho VP_2 , o autômato da Figura 3.6 demonstra o evento controlável de entrada e_{VP2D} e o evento controlável de saída e_{DVP2} .

Figura 3.7: Autômato G_E da sinalização do Trecho E.

O trecho E pode ser acessado pelo trecho F , o autômato da Figura 3.7 demonstra o evento controlável de entrada e_{FE} e o evento incontrolável de saída e_{EF} .

Figura 3.8: Autômato G_F da sinalização do Trecho F.

O trecho F pode ser acessado pela entrada Y , pelo trecho E e pelo trecho VP_3 , o autômato da Figura 3.8 demonstra o evento controlável de entrada e_{YF} , os eventos incontroláveis de entrada e_{VP_3F} e e_{EF} e os eventos controláveis de saída e_{FY} , e_{FE} e e_{FVP_3} .

Figura 3.9: Autômato G_{VP_1} da sinalização do Trecho 1 da Via Principal.

O trecho VP_1 pode ser acessado pelos trechos A , B , C e VP_2 , o autômato da Figura 3.9 demonstra os eventos controláveis de entrada e_{AVP_1} , e_{BVP_1} , e_{CVP_1} e $e_{VP_2VP_1}$ e os eventos controláveis de saída e_{VP_1A} , e_{VP_1B} , e_{VP_1C} e $e_{VP_1VP_2}$. Com esta abordagem, a sinalização do trecho VP_1 pode funcionar de forma independente da sinalização dos trechos VP_2 e VP_3 .

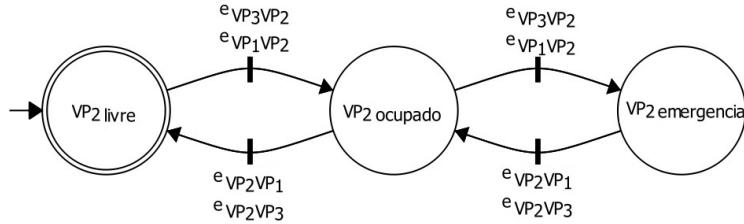


Figura 3.10: Autômato G_{VP_2} da sinalização do Trecho 2 da Via Principal.

O trecho VP_2 pode ser acessado pelos trechos VP_1 e VP_3 , o autômato da Figura 3.10 demonstra os eventos controláveis de entrada $e_{VP_1VP_2}$ e $e_{VP_3VP_2}$ e os eventos controláveis de saída $e_{VP_2VP_1}$ e $e_{VP_2VP_3}$. Com esta abordagem, a sinalização do trecho VP_2 pode funcionar de forma independente da sinalização dos trechos VP_1 e VP_3 .

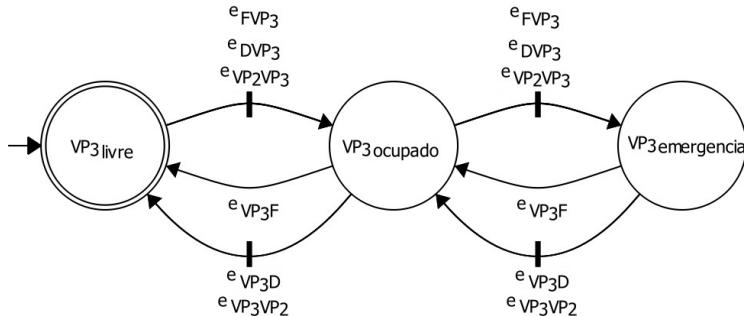


Figura 3.11: Autômato G_{VP_3} da sinalização do Trecho 3 da Via Principal.

O trecho VP_3 pode ser acessado pelos trechos VP_2 , D e F , o autômato da Figura 3.11 demonstra os eventos controláveis de entrada $e_{VP_2VP_3}$, e_{DVP_3} e e_{FVP_3} , os eventos controláveis de saída $e_{VP_3VP_2}$ e e_{VP_3D} e os eventos incontroláveis de saída e_{VP_3F} . Com esta abordagem, a sinalização do trecho VP_3 pode funcionar de forma independente da sinalização dos trechos VP_1 e VP_2 .

Considerando a malha ferroviária em estudo, vista na Figura 3.1, o modelo completo do processo sem controle pode ser dado pela composição paralela entre os autômatos individuais de cada trecho.

$$G = G_A \parallel G_B \parallel G_C \parallel G_D \parallel G_E \parallel G_F \parallel G_{VP_1} \parallel G_{VP_2} \parallel G_{VP_3}. \quad (3.2)$$

O objetivo da composição paralela dos autômatos é obter de forma sistemática e automática, por meio de software computacional, a dinâmica do sistema como um todo, com todos os trechos em operação. O autômato G da Equação (3.2) é portanto, capaz de ler o conjunto de eventos completo, sendo sua linguagem gerada formada por todas as sequências de eventos possíveis de ser executadas, e sendo o conjunto de eventos dado por

$$\Sigma = \Sigma_A \cup \Sigma_B \cup \Sigma_C \cup \Sigma_D \cup \Sigma_E \cup \Sigma_F \cup \Sigma_{VP_1} \cup \Sigma_{VP_2} \cup \Sigma_{VP_3},$$

Com os subconjuntos de eventos dados por

$$\begin{aligned} \Sigma_A &= \{e_{WA}, e_{VP_1A}, e_{AW}, e_{AVP_1}\}, \\ \Sigma_B &= \{e_{XB}, e_{VP_1B}, e_{BX}, e_{BVP_1}\}, \\ \Sigma_C &= \{e_{VP_1C}, e_{CVP_1}\}, \\ \Sigma_D &= \{e_{VP_3D}, e_{DVP_3}\}, \\ \Sigma_E &= \{e_{FE}, e_{EF}\}, \\ \Sigma_F &= \{e_{YF}, e_{EF}, e_{VP_3F}, e_{FY}, e_{FE}, e_{FVP_3}\}, \\ \Sigma_{VP_1} &= \{e_{AVP_1}, e_{BVP_1}, e_{CVP_1}, e_{VP_2VP_1}, e_{VP_1A}, e_{VP_1B}, e_{VP_1C}, e_{VP_1VP_2}\}, \\ \Sigma_{VP_2} &= \{e_{VP_1VP_2}, e_{VP_3VP_2}, e_{VP_2VP_1}, e_{VP_2VP_3}\}, \\ \Sigma_{VP_3} &= \{e_{VP_2VP_3}, e_{DVP_3}, e_{FVP_3}, e_{VP_3VP_2}, e_{VP_3D}, e_{VP_3F}\}. \end{aligned}$$

Os estados do autômato G (Eq. 3.2) são dados pela combinação entre os estados de cada um dos nove autômatos da composição, realizando todas as

combinações possíveis para as transições de estados em todos os autômatos. Como cada autômato da composição possui três estados, a quantidade de estados de G é calculada como

$$\begin{aligned} n^o \text{ estados} &= n_A n_B n_C n_D n_E n_F n_{VP_1} n_{VP_2} n_{VP_3}, \\ &= 3^9, \\ &= 19683. \end{aligned}$$

Devido ao tamanho do autômato G a representação gráfica ou textual completa aqui se torna ineficiente para análise, sendo mais eficaz analisar por meio de simulação com o software *DESTool*. As estatísticas de G , conforme simulação, são dispostos na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Estatísticas da planta G .

19683	Estados
1	Estado marcado
22	Eventos
218700	Transições entre estados

A Figura 3.12 demonstra a tela de simulação do autômato G e seus componentes, no estado inicial. Na janela *System State* é possível visualizar os estados do sistema ao longo da simulação. A ocorrência de eventos é simulada pela seleção de eventos na janela *Execute Transition/Time*. Cada autômato utilizado na composição paralela de G pode também ser acompanhado através de janelas individuais do software. Os eventos passíveis de ocorrer são destacados ao usuário, estes eventos se tratam das transições possíveis em cada um dos modelos criados.

Na Figura 3.13 é possível visualizar um caso particular da operação do autômato G , como exemplo. A Tabela 3.2 demonstra a sequência de eventos executada a partir do estado inicial para o exemplo. Neste exemplo se vê um dos casos de risco de colisão em VP_1 , possíveis de serem executados pelo autômato G . Partindo desta observação, na Seção 3.1.2 a seguir serão definidas as especificações para o sistema.

CAPÍTULO 3. METODOLOGIA

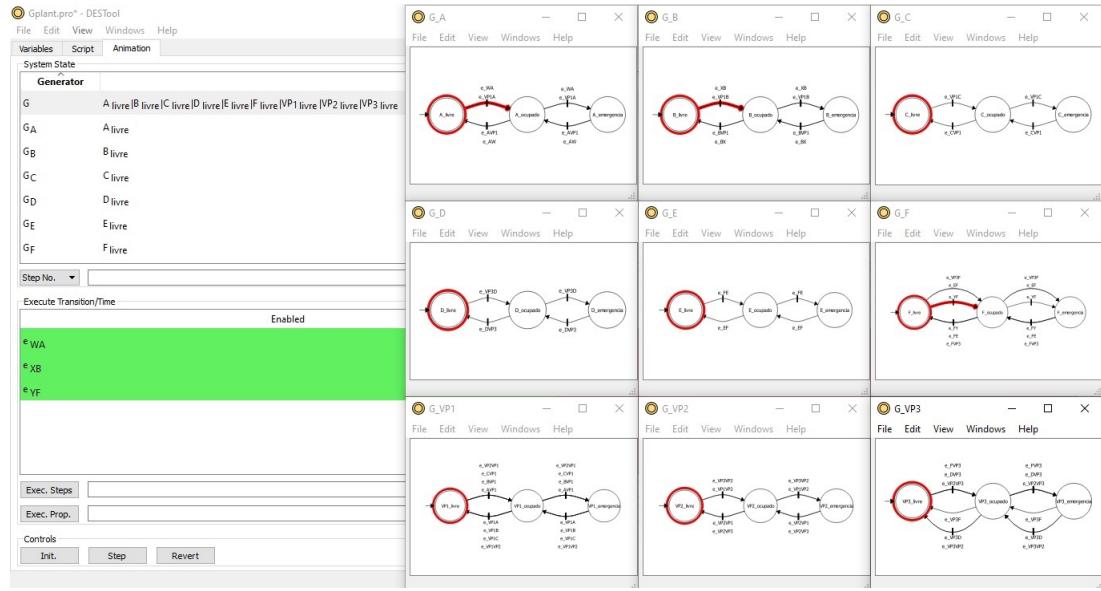


Figura 3.12: Simulação do autômato G no estado inicial.

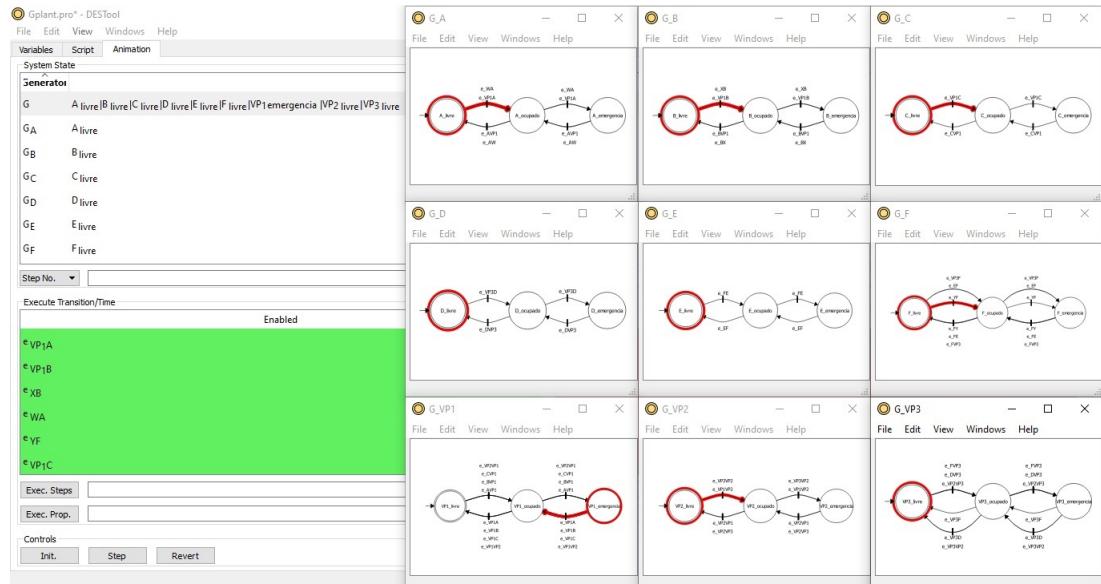
Figura 3.13: Simulação do autômato G com VP_1 em emergência.

Tabela 3.2: Transição de estados para simulação do autômato G resultando no status de simulação da Figura 3.13.

Evolução de Estados	Evento
$A_{livre} B_{livre} C_{livre} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_{1livre} VP_{2livre} VP_{3livre}$	e_{WA}
\downarrow	
$A_{ocupado} B_{livre} C_{livre} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_{1livre} VP_{2livre} VP_{3livre}$	e_{AVP_1}
\downarrow	
$A_{livre} B_{livre} C_{livre} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_{1ocupado} VP_{2livre} VP_{3livre}$	e_{XB}
\downarrow	
$A_{livre} B_{ocupado} C_{livre} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_{1ocupado} VP_{2livre} VP_{3livre}$	e_{BVP_1}
\downarrow	
$A_{livre} B_{livre} C_{livre} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_{1emergencia} VP_{2livre} VP_{3livre}$	

3.1.2 Especificações para o Sistema

Nesta seção são propostas as especificações, baseadas em restrições reais do sistema, bem como em regras e limitações de segurança aplicáveis conforme o contexto. Na modelagem, considera-se que os trechos A , B e F possibilitam a entrada e saída de composições ferroviários diversos¹, que utilizam a Via Principal como meio para deslocamento das cargas dentro da malha industrial.

As especificações terão como objetivo principal no projeto evitar colisões de veículos ferroviários nos trechos e que, a Via Principal seja usada como recurso exclusivo de uma composição por vez. Em outras palavras, uma vez que ocorra um evento de entrada, a partir de quaisquer dos trechos à Via Principal, não serão permitidas novas entradas, até que ocorra um evento de saída. Sendo assim, é modelada um especificação H_{esp} que delimita a necessidade de alternância de eventos de entrada e saída.

De forma análoga ao que foi feito para modelagem da planta G , a especificação completa pode ser obtida por meio da composição paralela de especificações individuais, explicitadas a seguir.

¹Como extensão deste trabalho, vale observar também que os trechos A , B e F possibilitam a conexão deste sistema, de forma modular, à sistemas de controle de outras malhas.

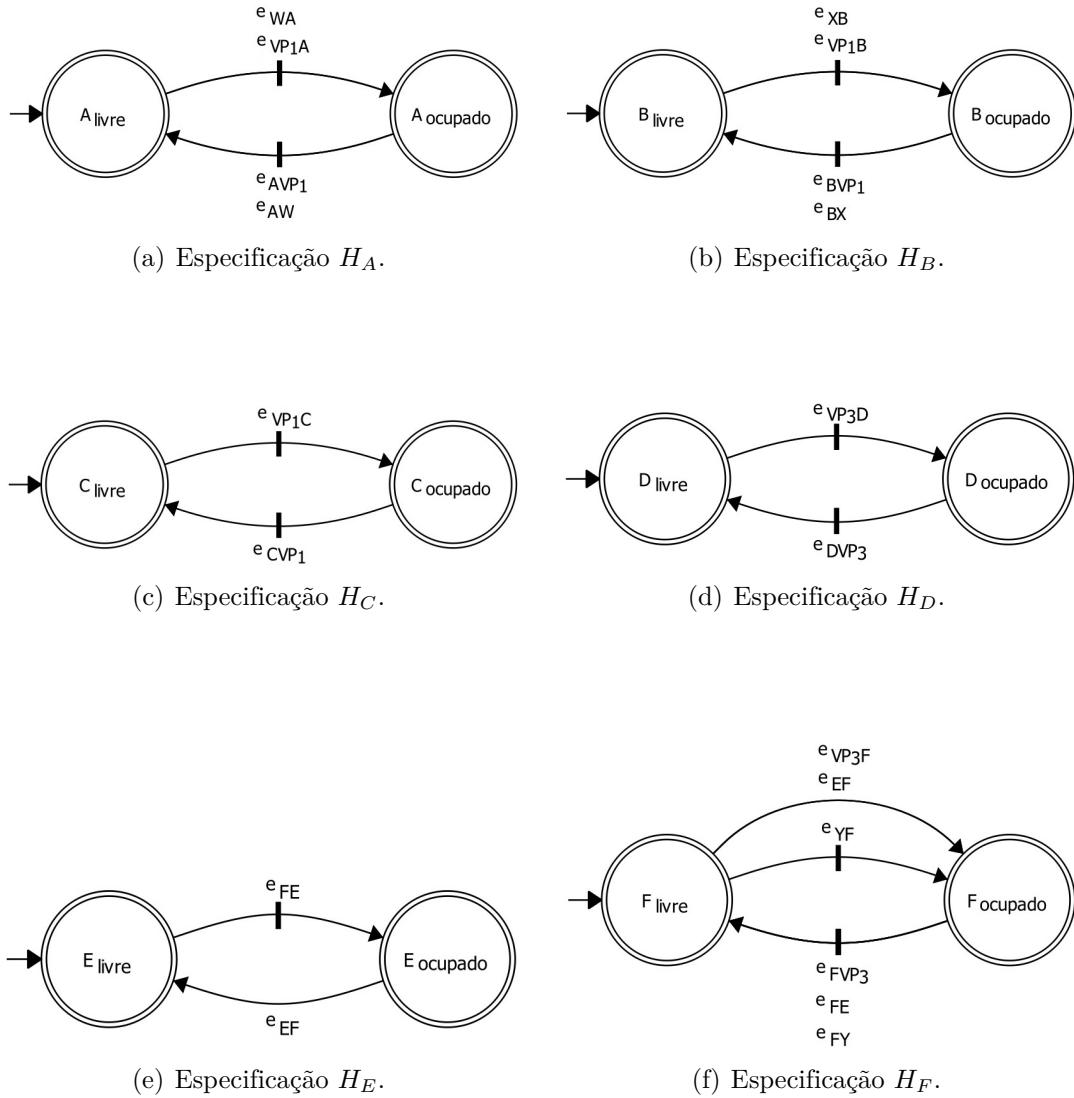
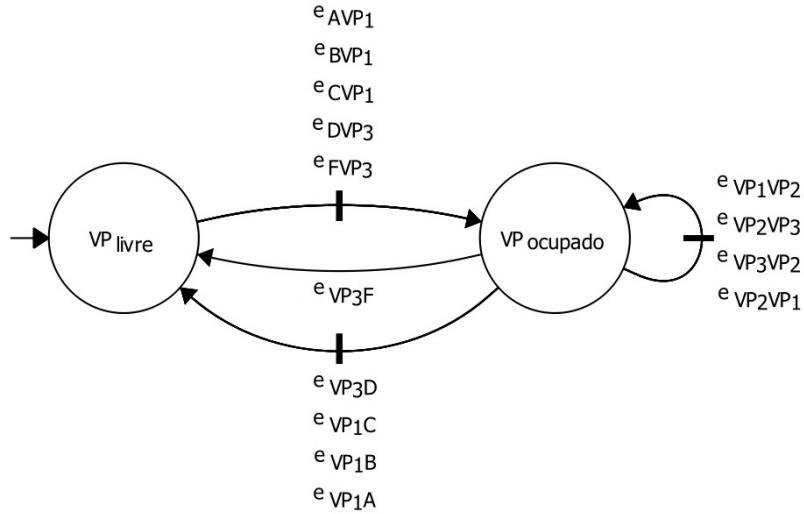


Figura 3.14: Especificações para acessos aos trechos A, B, C, D, E e F

Considerado a restrição de capacidade dos trechos A, B, C, D, E e F , para receber apenas uma composição autopropelida por vez, as especificações construídas para restringir a dinâmica de cada trecho são vistas na Figura 3.14. O objetivo é impedir, com o controle supervisório, que os autômatos G_A, G_B, G_C, G_D, G_E e G_F alcancem seus estados de emergência.

Figura 3.15: Especificação H_{VP} para acessos à Via Principal.

Considerado a restrição de segurança de acesso à Via Principal para apenas uma composição por vez, em quaisquer dos subtrechos VP_1 , VP_2 ou VP_3 , a especificação para restringir a dinâmica deste é vista na Figura 3.15. O objetivo é impedir, com o controle supervisório, que os autômatos G_{VP_1} , G_{VP_2} e G_{VP_3} alcancem seus estados de emergência, e ainda, que sejam ocupados de forma simultânea.

A especificação geral do sistema H_{esp} tem objetivo de determinar a regra de execução do modelo G (Eq. 3.2), restringindo este a um comportamento parcial, controlado, que atenda às especificações individuais. Na próxima seção será abordada a síntese do controlador, a qual aplica H_{esp} ao modelo da planta G , sintetizando o modelo de supervisório a ser usado pelo sistema de controle. De maneira formal, temos que H_{esp} é dado por

$$H_{esp} = H_A \parallel H_B \parallel H_C \parallel H_D \parallel H_E \parallel H_F \parallel H_{VP}. \quad (3.3)$$

3.1.3 Síntese do Controlador Supervisório

Nesta seção será apresentada formalmente a síntese do controlador supervisório S e o respectivo modelo formal completo do sistema DES controlado.

O controlador supervisório tem como premissa atuar apenas sobre os eventos controláveis do sistema, ou seja, aqueles sob os quais pode se ditar a atuação de dispositivos e elementos finais de controle. Em outras palavras, pode agir diretamente na prevenção de eventos controláveis e indiretamente na prevenção de eventos incontroláveis.

Visto as especificações do sistema, o controlador supervisório realiza operações sobre o modelo da planta G de forma a respeitar as restrições previstas, ou seja, limita suas linguagens $\mathcal{L}(G)$ e $\mathcal{L}_m(G)$ a subconjuntos que respeitem às especificações, excluindo, inclusive, estados ilegais. Neste projeto, identificam-se como estados ilegais, de forma direta, os estados $i_{emergencia}$ de cada autômato G_i . Os eventos incontroláveis modelados não podem ser diretamente inibidos pelo supervisório. Logo, na síntese, as operações são tais que eventos controláveis são inibidos antes do sistema chegar à determinados estados os quais permitiriam eventos incontroláveis que, por sua vez, levariam a infrações das especificações.

Por meio da síntese, com o autômato G (Eq. 3.2) e a especificação H_{esp} (Eq. 3.3) obtém-se um novo autômato resultante para o sistema controlado, que pode ser denotado por

$$S/H_a = S/(H_{esp}||G). \quad (3.4)$$

A representação gráfica do modelo de supervisor obtido pode ser vista na Figura 3.16 e suas estatísticas são descritas na Tabela 3.3. A fim de melhorar compreensão da Figura 3.16 sugere-se ao leitor consultar o Apêndice A, no qual constam detalhes do modelo obtido (Eq. 3.4).

Tabela 3.3: Estatísticas do supervisor S/H_a .

160	Estados
1	Estado marcado
22	Eventos
832	Transições entre estados

Neste ponto, é interessante confrontar as Tabelas 3.1 e 3.3, observando a redução dos estados e transições do sistema, após aplicar o controlador sobre o mesmo. Em termos práticos isto representa a ação do controlador na limitação da

dinâmica do sistema, uma vez que o modelo G (Eq. 3.2) fornece toda a dinâmica fisicamente possível, enquanto que o modelo S/H_a (Eq. 3.4) fornece a dinâmica controlada, em respeito às especificações.

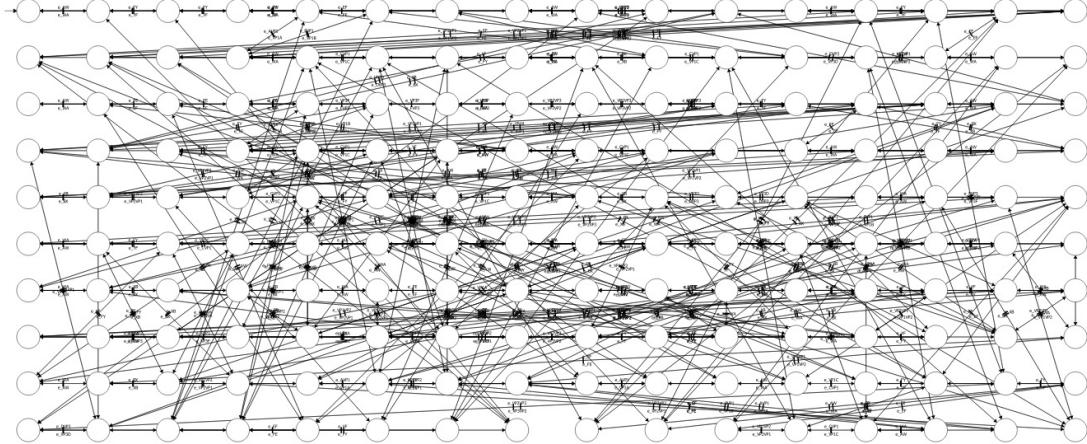


Figura 3.16: Autômato $S/(H_{esp}||G)$ do sistema controlado de Sinalização.

No Capítulo 4 serão discutidos os principais resultados demonstrando a efetividade do controle aplicado pelo supervisório.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes e simulações implementadas conforme as metodologias expostas no Capítulo 2 e modelo de supervisório, obtido no final do Capítulo 3.

Nas últimas duas décadas, em termos de performance computacional, tem sido pesquisadas e desenvolvidas técnicas para representar, armazenar e percorrer transições entre estados de diagramas de autômatos. O objetivo é desenvolver métodos formais, baseados nos cálculos exatos proporcionados pelas teorias vistas, capazes de realizar operações entre sistemas cada vez maiores, com eficiência suficiente para descrever corretamente todos os estados e transições executáveis pelo sistema, por meio da entrada de eventos observáveis, modelados no sistema. A necessidade prática computacional proporcionou os avanços com tecnologias de *hardware*, representados pelos circuitos digitais e, *software*, representados por protocolos de comunicação.

Para exposição dos resultados, serão apresentados a seguir dados das simulações obtidas com o software *DESTool*, bem como exemplos de testes do modelo S/H_a (Eq. 3.4).

4.1 Modelo do Sistema Controlado

Em uma primeira observação dos estados resultantes no modelo controlado S/H_a , detalhados no Apêndice A pela Tabela A.2, é notável o obedecimento às especifici-

cações, uma vez que em nenhum dos estados os autômatos dos trechos alcançam o estado de emergência, nem tão pouco há estados em que os trechos VP_1 , VP_2 e VP_3 estão ocupados de forma simultânea. Assim, já num primeiro momento, pode-se assumir que situações em que há risco de colisões nos trechos, foram retiradas do processo.

Testando o sistema supervisionado, por intermédio da simulação de entrada de eventos utilizando o *software DESTool*, em diversas sequências, o comportamento desejado se validou, demonstrando a capacidade do controlador de reproduzir o comportamento da planta em observância das restrições, garantindo máxima generalidade. A ação sobre a dinâmica do sistema é tal que, conhecendo a dinâmica do processo como um todo, age sobre os eventos controláveis que são prefixos de palavras que levam a condições proibidas, ou seja, que violam as especificações modeladas. Nas próximas seções são descritos os principais testes realizados para validar as ações de controle.

4.1.1 Supervisório em seu Estado Inicial

Conforme modelagem, no estado inicial do sistema, tem-se todos os trechos livres, como na Figura 3.1, aguardando uma entrada de composição. Os únicos trechos que podem receber uma entrada diretamente são os trechos A , B e F , os demais trechos, dependem que outro trecho esteja previamente ocupado. Assim, partindo do estado inicial do sistema, apenas os eventos e_{WA} , e_{XB} e e_{YF} estão habilitados, e podem promover a evolução dos autômatos G_A , G_B ou G_F , respectivamente, para o estado de ocupado.

Para os demais trechos, conforme dinâmica fisicamente executável do sistema, os eventos que partem do estado inicial são dependentes a partir do estado ocupado de outros trechos, como por exemplo: para partir do estado C_{livre} para o estado $C_{ocupado}$ no autômato G_C , é necessário que o autômato G_{VP_1} esteja no estado $VP_{1\text{ocupado}}$, situação em que ambas as transições $f(VP_{1\text{ocupado}}, e_{VP_1C}) = VP_{1\text{livre}}$ e $f(C_{livre}, e_{VP_1C}) = C_{ocupado}$ são definidas para o mesmo evento.

A tela de simulação no *software* pode ser vista na Figura 4.1. Os estados dos autômatos podem ser acompanhados na janela *System State*, e na janela *Execute Transition/Time* podem ser selecionados os eventos a executar a partir da lista

dos eventos habilitados, *Enabled*.

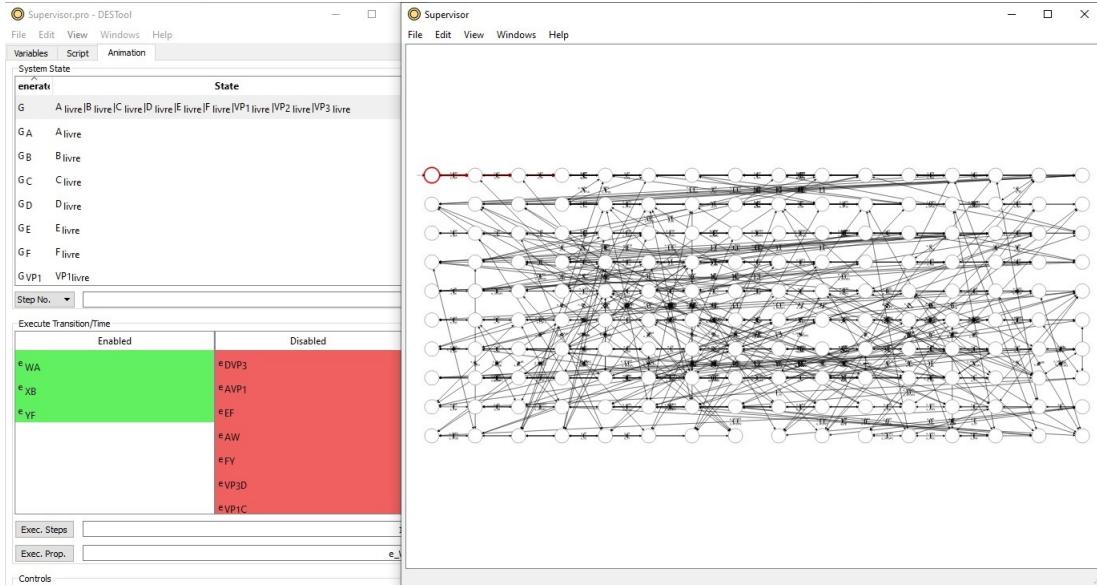


Figura 4.1: Simulação Supervisório em seu Estado Inicial.

4.1.2 Prevenção de colisão em trecho

Simulando a situação em que trechos diretamente conectados estão ocupados de forma simultânea, é possível validar a ação de controle do supervisório desabilitando eventos controláveis que poderiam levar à colisões, como visto nos dados de simulação abaixo.

- Esteja o trecho *A* ocupado, independentemente dos demais trechos, o sistema desabilita os eventos e_{WA} e e_{VP_1A} , considerada a especificação H_A .
- Esteja o trecho *B* ocupado, independentemente dos demais trechos, o sistema desabilita os eventos e_{XB} e e_{VP_1B} , considerada a especificação H_B .
- Esteja o trecho *C* ocupado, independentemente dos demais trechos: o sistema desabilita o evento e_{VP_1C} , considerada a especificação H_C .
- Esteja o trecho *D* ocupado, independentemente dos demais trechos: o sistema desabilita o evento e_{VP_2D} , considerada a especificação H_D .

- Esteja o trecho E ocupado, independentemente dos demais trechos: o sistema desabilita o evento e_{FE} , considerada a especificação H_E . Além disso, o sistema também desabilita os eventos de entrada no trecho F , e_{YF} e e_{VP_3F} , uma vez que, estando E e F ocupados, o evento incontrolável e_{EF} poderia levar à uma infração da restrição de capacidade do trecho F .
- Esteja o trecho F ocupado e os trechos E e VP_3 desocupados, independentemente dos demais trechos: o sistema desabilita os eventos e_{DVP_3} e $e_{VP_2VP_3}$, uma vez que, o evento e_{VP_3F} é incontrolável e poderia levar à uma infração da especificação de capacidade do trecho F .

De maneira geral, devido aos eventos incontroláveis e_{EF} e e_{VP_3F} o controlador não permite que os trechos E e F , VP_3 e F ou E e F estejam ocupados de forma simultânea.

- Esteja qualquer dos trechos VP_1 , VP_2 ou VP_3 ocupado, a Via Principal é dada como em uso, logo, em observância à especificação da H_{VP} , os eventos e_{AVP_1} , e_{BVP_1} , e_{CVP_1} , e_{DVP_2} e e_{FVP_2} são desabilitados pelo controlador.

Os pontos discutidos acima podem ser observados na tela do *software DESTool* ao longo de testes simulando a ocorrência de eventos.

Considere como exemplo o status do sistema na Figura 4.3, onde há ilustração do processo real, e na Figura 4.4, onde há a representação da tela do *software* para o mesmo status. Na Figura 4.2 é apresentado a tela de rastro, ou *Trace* do inglês, em que se pode acompanhar, passo a passo, uma das formas de se evoluir o sistema para alcançar este status. Em termos formais, se tem a simulação executada da forma:

$$f(s_0, w) = s',$$

em que o Estado Inicial é:

$$s_0 = A_{livre}|B_{livre}|C_{livre}|D_{livre}|E_{livre}|F_{livre}|VP_{1livre}|VP_{2livre}|VP_{3livre}$$

a sequência de Eventos é:

$$\begin{aligned} w = & e_{WA} \ e_{XB} \ e_{AVP_1} \ e_{VP_1C} \ e_{WA} \ e_{AVP_1} \ e_{VP_1VP_2} \ e_{VP_2VP_3} \ e_{VP_3D} \ e_{WA} \ e_{YF} \ e_{FVP_3} \\ & e_{VP_3VP_2} \ e_{YF} \end{aligned}$$

e o Estado Resultante é:

$$s' = A_{ocupado}|B_{ocupado}|C_{ocupado}|D_{ocupado}|E_{livre}|F_{ocupado}|VP_{1livre}|VP_{2ocupado}|VP_{3livre}$$

Uma vez que o autômato G_{VP_2} está ocupado, os eventos de entrada na Via Principal são desabilitados pelo controlador, mesmo que os trechos A, B, C, D e F estejam ocupados. De forma análoga, os eventos de entrada e_{WA}, e_{XB} e e_{YF} são desabilitados pelo controlador, a fim impedir o risco de colisão nos trechos A, B e F , respectivamente. Assim como neste exemplo, a cada passo do sistema, são habilitados apenas os eventos que não contradizem a nenhuma das especificações.

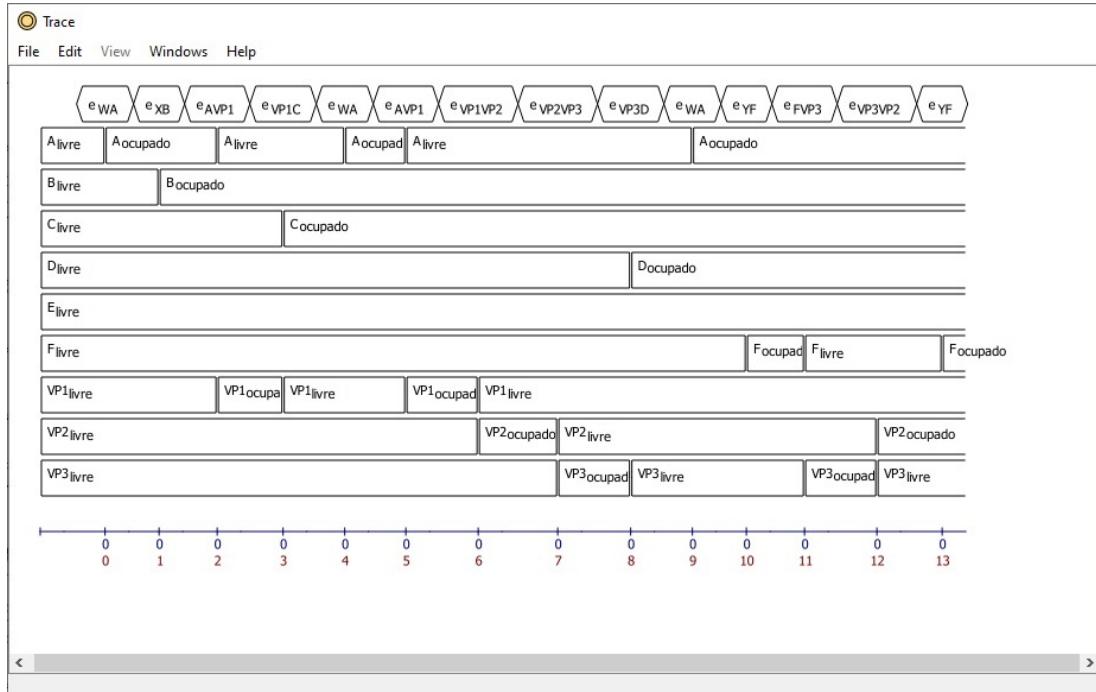


Figura 4.2: Rastro de simulação passo a passo com o *software DESTool*.

Observando ainda, pelos autômatos G_E , G_F e G_{VP_3} no exemplo visto nas Figuras 4.3 e 4.4 é possível ver um exemplo da ação de controle indireta sobre os eventos incontroláveis do processo. Uma vez que a composição movida pela locomotiva 0005 (Fig. 4.3) está no trecho VP_2 seria fisicamente possível deslocar ao trecho VP_3 , contudo, uma vez que o evento e_{VP_3F} é incontrolável, e o trecho F

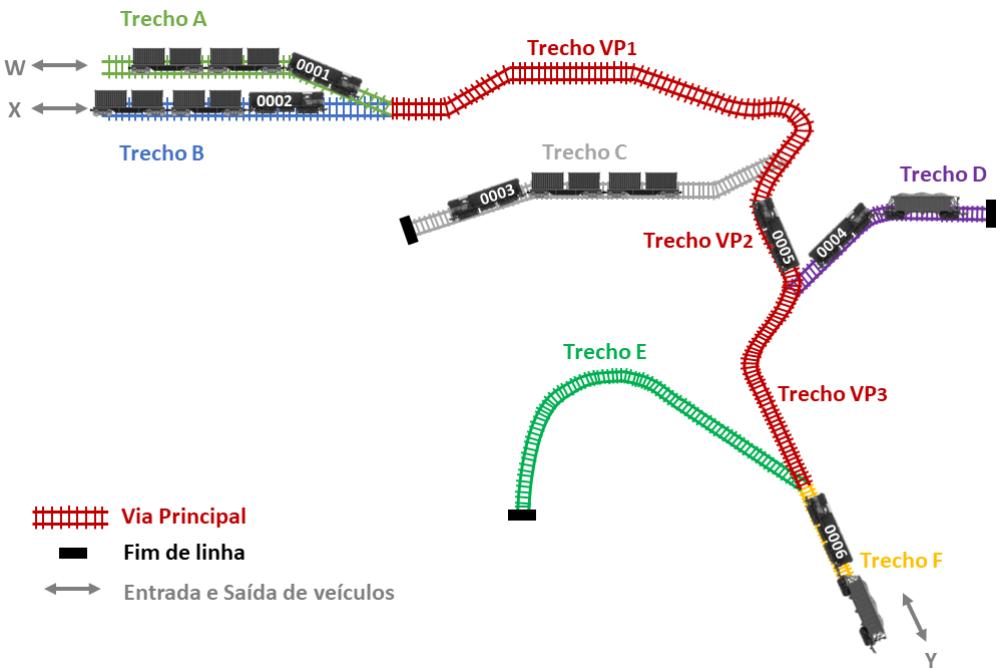


Figura 4.3: Malha Ferroviária para status de simulação do Supervisório com Via Principal em uso.

está ocupado, o supervisor age antecipativamente, desabilitando o evento $e_{VP_2VP_3}$ e, impedindo portanto a ocupação do trecho VP_3 . Dessa forma, o risco de colisão no trecho F é evitado.

Em termos práticos, os estados de cada autômato lidos pelo Supervisório representam o acionamento das lâmpadas de sinalização ao longo de cada um dos trechos. A desabilitação de eventos pode ser representada pela atuação dos dispositivos de mudança de via, instalados entre os trechos, quando controlados por acionamento elétrico. No caso de aparelhos de manobra atuados manualmente, o controle ainda é válido pela característica física do tráfego, uma vez que exista bloqueio operacional que condiciona o deslocamento das composições, visto a observação do funcionamento controlado das lâmpadas de sinalização nos trechos.

Além do mais, o controle implementado pode atuar em conjunto com o design de uma interface homem-máquina de sistema supervisório, mostrando aos usuários do sistema, em tempo real, o status de cada trecho bem como os deslocamentos proibidos, em função da ação de controle do tráfego.

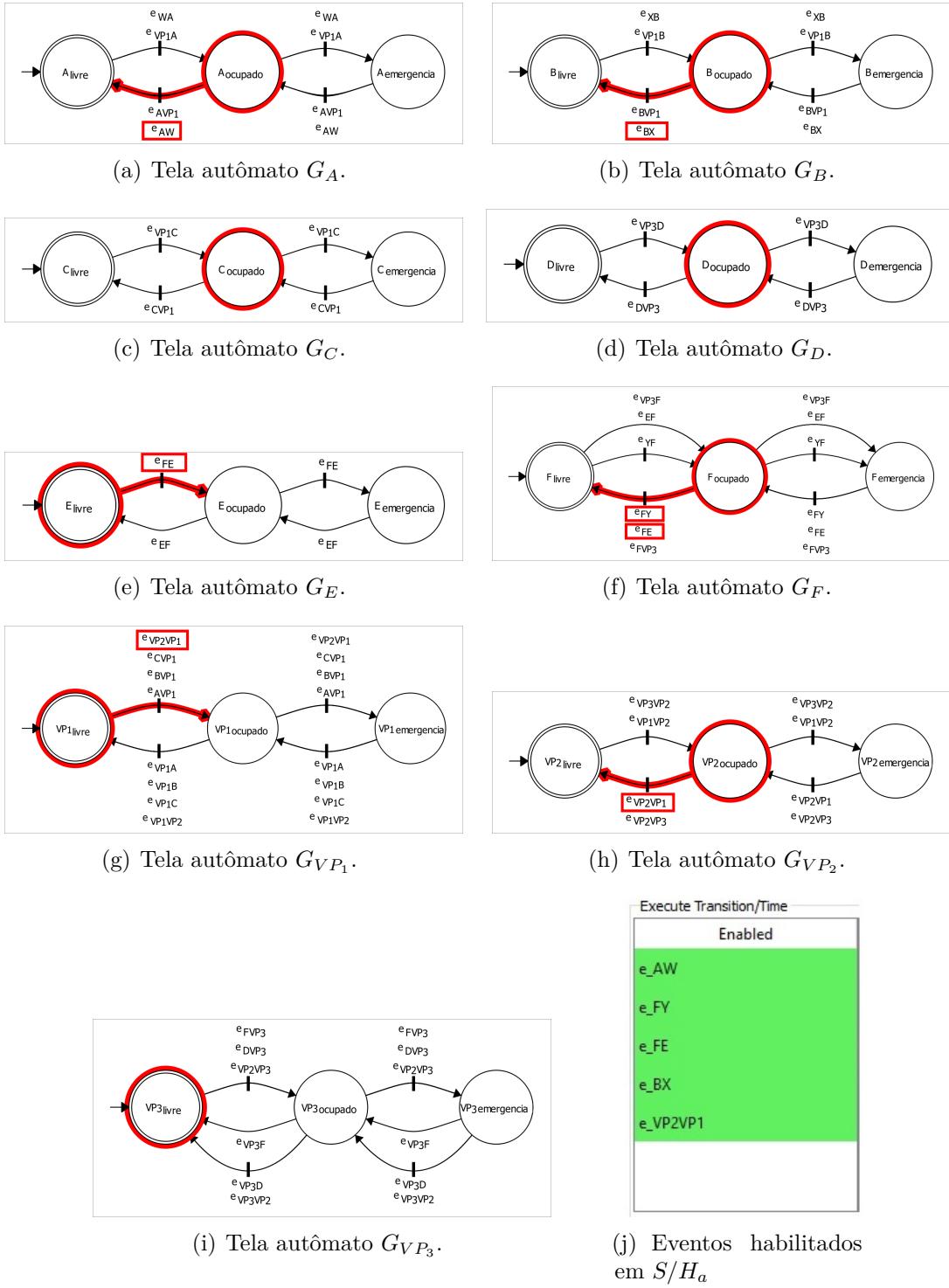


Figura 4.4: Telas de Simulação no status da Figura 4.3.

Capítulo 5

Conclusão

No Capítulo 2 foram apresentados os principais conceitos teóricos necessários ao entendimento das Teorias de Sistemas de Eventos Discretos, Autômatos e Controle Supervisório, assim como as definições formais necessárias à implementação lógica da modelagem. No Capítulo 3 foram revisados os conceitos aplicando a metodologia proposta sobre o Objeto de Estudo. Em sequência, no Capítulo 4 foram expostos os resultados obtidos com as técnicas utilizadas. Neste capítulo serão sintetizadas algumas das contribuições ao conhecimento do estudo realizado, com base nos resultados encontrados, bem como as perspectivas de trabalhos futuros.

5.1 Contribuições ao conhecimento

Neste trabalho foram abordadas as Teorias dos Sistemas de Eventos Discretos, Autômatos e Controle Supervisório, que compõem a vasta grade de conhecimento da Engenharia Elétrica de Engenharia de Controle e Automação. Foram apresentados os formalismos matemáticos e motivações ao uso destas teorias para aplicações reais de sistemas automatizados. Avaliado também, a aplicação da teoria através de problemática real de sinalização em malha de movimentação ferroviária, verificando as vantagens destas teorias em suas implementações, que permitem ao projetista encontrar roteamentos e dinâmicas complexas por intermédio de modelagens simplificadas e modularizadas.

Com o desenvolvimento deste trabalho, também foram estudados sistemas

de tráfego ferroviário de referência mundial, embasados em tecnologias que conversam entre as áreas de Controle e Automação, Tecnologia da Informação e Telecomunicações. Assuntos estes, inegavelmente de grande atualidade e relevância, estudados por meio da revisão bibliográfica.

O projeto implementado se mostrou opção viável para aplicações reais, uma vez que os resultados de controle foram eficientes em seus objetivos, conforme simulações e testes. Considerando, inclusive, como uma das vantagens principais para aplicações reais a simplicidade da modelagem e a facilidade de adaptação e manutenção dos modelos.

5.2 Trabalhos Futuros

Com o desenvolvimento deste trabalho foram observadas as abrangências da aplicação da Teoria de Sistemas de Eventos Discretos e Autômatos. Espera-se como contribuição ao conhecimento científico, que se sigam deste trabalho novas abordagens na área do controle de tráfego ferroviário, adicionando ao modelo novos componentes, de forma modularizada, a fim de obter sistemas maiores e mais complexos, partindo de modelagens simplificadas, de forma análoga ao que foi feito neste trabalho.

Sugere-se em especial a continuidade deste projeto aliado à modelagem de uma planta de instrumentação, delimitando os componentes capazes de observar e atuar sobre o sistema com o modelo proposto neste trabalho, bem como a modelagem de um sistema de comunicação industrial robusto, adequado para a troca de informações em tempo real pelos usuários do sistema, sejam eles controladores de tráfego, maquinistas e demais operadores de logística.

Em adição, sugere-se ainda, aplicar métodos de diagnóstico de falhas em DES aos modelos construídos, a fim de tratar situações de falhas de medição de sensores e instrumentos. Para tanto, recomenda-se consultar como bibliografia inicial [Blanke et al. \(2006\)](#) e [Zaytoon and Lafourture \(2013\)](#).

Referências

- ANTT (2021). RESOLUÇÃO Nº 5.943, DE 1º DE JUNHO DE 2021, *Diário Oficial da União*. Acessado em 01 de junho de 2021.
- Blanke, M., Lunze, J., Kinnaert, M., Staroswiecki, M. and Schröder, J. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*, Springer Berlin Heidelberg.
- Cassandras, C. G. and Lafortune, S. (2008). *Introduction to Discrete Event Systems*, 2 edn, Springer Science+Business Media, LLC.
- DNIT (2016). A INVENÇÃO DA LOCOMOTIVA, <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/ferrovias/historico/historico>. Acessado em 19 de julho de 2021.
- Durmuş, M. S., Yıldırım, U. and Söylemez, M. T. (2012). Interlocking system design for ertms/etc: An approach with batches petri nets, *The 11th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES Vol. 45*(Ed. 29): 110–115.
- ERTMS Map (2021). THE EUROPEAN RAIL TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM, https://www.ertms.net/?page_id=55. Acessado em 12 de junho de 2021.
- Giua, A. and Seatzu, C. (2008). Modeling and supervisory control of railway networks using petri nets, *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING* **5**(3): 431–445.
- Hopcroft, J. E., Ullman, J. D. and Motwani, R. (2001). *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*, 2 edn, Addison-Wesley.

- Ramadge, P. and Wonham, W. (1989). The control of discrete event systems, *Proceedings of the IEEE Vol. 77*(Ed. 1): 81–98.
- The MathWorks, Inc. (1994–2022). MATLAB, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- Theeg, G. and Vlasenko, S. (2019). *Railway Signalling and Interlocking*, 3 edn, International Compendium.
- Thomas Moor (2008-2016). DESTool, <https://fgdes.tf.fau.de/destool/>.
- UIC (2009). GSM-R Implementation and Procurement Guide, https://uic.org/IMG/pdf/2009gsm-r_guide.pdf. Acessado em 19 de junho de 2021.
- UIC (2021). GSM-R NETWORK MANAGEMENT, <https://uic.org/projects/article/gsm-r-network-management?recherche=gsm-r>. Access date: 19 jun. 2021.
- Zaytoon, J. and Lafortune, S. (2013). Overview of fault diagnosis methods for discrete event systems, *Annual Reviews in Control Vol. 37*(Ed. 2): 308–320.

Apêndice A

Detalhes Supervisor

Tabela A.1: Eventos no modelo do Supervisor S/H_a .

Evento	Tipo
e_{AVP_1}	controlável
e_{AW}	controlável
e_{BVP_1}	controlável
e_{BX}	controlável
e_{CVP_1}	controlável
e_{DVP_3}	controlável
e_{EF}	incontrolável
e_{FE}	controlável
e_{FVP_3}	controlável
e_{FY}	controlável
e_{VP_1A}	controlável
e_{VP_1B}	controlável
e_{VP_1C}	controlável
$e_{VP_1VP_2}$	controlável
$e_{VP_2VP_1}$	controlável
$e_{VP_2VP_3}$	controlável
e_{VP_3D}	controlável
e_{VP_3F}	incontrolável
$e_{VP_3VP_2}$	controlável
e_{WA}	controlável
e_{XB}	controlável
e_{YF}	controlável

Tabela A.2: Estados no modelo do Supervisor S/H_a .

Estado de origem → Estado resultante	Evento
$\rightarrow A_{ocupado} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{ocupado} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{livre}$	
$A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	e_{WA}
$\rightarrow A_{ocupado} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	
$A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	e_{XB}
$\rightarrow A_{livre} B_{ocupado} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	
$A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	e_{VP_3D}
$\rightarrow A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{ocupado} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{livre}$	
$A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	e_{VP_3F}
$\rightarrow A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{ocupado} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{livre}$	
$A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{livre} VP_3_{ocupado}$	$e_{VP_3VP_2}$
$\rightarrow A_{livre} B_{livre} C_{ocupado} D_{livre} E_{livre} F_{livre} VP_1_{livre} VP_2_{ocupado} VP_3_{livre}$	



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Laura Alves Rocha

Teoria de Sistemas a Eventos Discretos e Controle Supervisório Aplicada a Modelagem e Controle de Sinalização de Tráfego Ferroviário

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 24 de junho de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ricco - Orientador - Universidade Federal de Outro Preto

Prof. Dr. Hugo Jerzy Bravo Cipriano - Coorientador - Externo

Profa. Dra. Wendy Yadira Eras Herrera - Universidade Federal de Outro Preto

Profa. Me. Anny Verly - Universidade Federal de Outro Preto

Rodrigo Augusto Ricco, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/06/2022



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Augusto Ricco, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2022, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0352387** e o código CRC **C7615962**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008461/2022-31 SEI nº 0352387

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3808-0818 - www.ufop.br



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Teoria de Sistemas a Eventos Discretos e Controle Supervisório Aplicada a Modelagem e Controle de Sinalização de Tráfego Ferroviário” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 27 de junho de 2022.

Ana Laura Alves Rocha