# UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ARIANE BRAGA FONSECA

SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO FERRAMENTA DE ESTUDO DE CAPACIDADE: A MODELAGEM DE UM PÁTIO FERROVIÁRIO

#### ARIANE BRAGA FONSECA

# SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO FERRAMENTA DE ESTUDO DE CAPACIDADE: A MODELAGEM DE UM PÁTIO FERROVIÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: D.Sc., Fernando Marques de Almeida Nogueira

Co-Orientador: M.Sc., Thales Augusto dos Santos

Co-Orientadora: Eng.Sabrina Marçal Veloso

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Fonseca, Ariane Braga.

Simulação de eventos discretos como ferramenta de estudo de capacidade: A modelagem de um pátio ferroviário / Ariane Braga Fonseca. -- 2017.

55 f.: il.

Orientador: Fernando Marques de Almeida Nogueira Coorientadores: Thales Augusto dos Santos, Sabrina Marçal Veloso

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Análise de Capacidade. 2. Ferrovia. 3. Simulação de Eventos Discretos. I. Nogueira, Fernando Marques de Almeida, orient. II. Santos, Thales Augusto dos, coorient. III. Veloso, Sabrina Marçal, coorient. IV. Título.

#### ARIANE BRAGA FONSECA

# SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS COMO FERRAMENTA DE ESTUDO DE CAPACIDADE: A MODELAGEM DE UM PÁTIO FERROVIÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em de

de

Eduando P

BANCA EXAMINADORA

D.Sc., Fernando Marques de Almeida Hogueira (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora

M.Sc., Thales Augusto dos Santos (Co-Orientador)

MRS Logística S.A.

D.Sc., Eduardo Pestana de Aguiar

#### **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por ter construído a base necessária para que eu me tornasse quem eu sou e pudesse chegar onde eu cheguei.

Aos meus amigos, pelos sorrisos, lágrimas e conquistas compartilhados. Nada do que foi construído teria sido o mesmo sem os momentos que foram divididos.

Ao Fernando, pela ajuda na construção do trabalho e pelos conhecimentos passados. Acima de tudo por orientar quando a ajuda foi necessária e por me dar independência onde eu sabia que podia caminhar sozinha.

À Sabrina, por todos os conselhos, pelos que foram usados no trabalho e principalmente pelos que foram usados na vida.

Ao Thales, por conseguir contribuir tanto para esta obra em tão pouco tempo. Obrigada sobretudo pela honestidade nas opiniões e pela atenção dada como co-orientador.

Ao Henrique, pelas incontáveis aulas de Arena e de ferrovia, pela paciência e disposição que o fizeram um dos meus grandes professores.

À Raquel, sou grata pela parceria na construção do modelo de simulação, por ter se sentido tão responsável pelos resultados quanto eu e, principalmente, pelas conversas e momentos de descontração que tornaram mais leve essa etapa tão importante e cheia de desafios.

A toda a equipe que trabalhou ou ainda trabalha na Engenharia de Transportes, obrigada pela amizade, pelos ensinamentos e pelas oportunidades.

Ao Eduardo, agradeço por ter acrescentado a forte visão acadêmica através das sugestões dadas.

#### **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo a construção do modelo de simulação para um pátio ferroviário da MRS Logística S.A. A simulação é usada pela empresa na área de Engenharia de Transportes como ferramenta para realização de estudos de capacidade que possibilitam avaliar diversos cenários de forma quantitativa, fornecendo, por exemplo, respostas de fila, tempo de permanência em pátios e terminais de clientes além de atendimento de demanda. A capacidade de gerar essas informações é o que faz da simulação uma ferramenta de destaque que consegue demonstrar numericamente quais são os ganhos e perdas operacionais consequentes da tomada de decisão, garantindo um melhor julgamento sobre a viabilidade de variadas soluções operacionais em longo prazo. O pátio escolhido como objeto de estudo é localizado em uma região estratégica capaz de influenciar outras áreas de igual destaque, sendo assim fundamental a importância de análises que avaliem as condições de atendimento do mesmo. Dessa forma, foi desenvolvido um modelo de simulação que, a partir de uma metodologia pré-definida compreendendo formulação do problema, representação do modelo conceitual, implantação computacional, verificação e validação do modelo de simulação e experimentação e análise pretendeu aplicar o conhecimento acadêmico no meio coorporativo. Um dos resultados significantes obtidos foi a identificação de pontos de maior sensibilidade para aumento de capacidade nos próximos anos.

Palavras-chave: Simulação. Análise de Capacidade. Ferrovia.

#### **ABSTRACT**

This work aims to discuss a simulation model for a rail yard of MRS Logística S.A. Simulation is used by the company in the area of Transport Engineering as a tool to carry out capacity studies that allow evaluations of several scenarios in a quantitative way, providing, for example, responses on queue and time spent in rail yard and customer terminals. Simulation stands out as a tool for generating this sort of information, demonstrating numerically, what the operational gains and losses are resulting from decision making, ensuring a better judgment on the feasibility of various long-term operational solutions. The chosen rail yard as object of this study is located in a strategic region capable of influencing other areas of equal prominence, therefore it is fundamental for the analyzes to evaluate yard's compliance conditions. In that way, a simulation model was developed, based on a predefined methodology - including problem formulation, conceptual model representation, computational implementation, simulation verification, model validation, and finally, experimentation and analysis - aimed to apply the academic knowledge in the corporate environment. One of the most significant results obtained was the identification of points of greater sensitivity for capacity increase in the next years.

Keywords: Simulation. Capacity Analysis. Railroad, Rail Yard.

## LISTA DE FIGURAS

	Figura 1 - Região afetada pelo pátio modelado	12
	Figura 2 - Esquematização das etapas envolvidas na modelagem	16
	Figura 3 - Cronograma.	17
	Figura 4 - Representação do módulo Create no software	23
	Figura 5 - Representação do módulo Dispose no software.	23
	Figura 6 - Representação do módulo Process no software	23
	Figura 7 - Representação do módulo Decide no software	24
	Figura 8 - Representação de um Submodel conectado aos módulos Create e	Dispose
no softv	ware	24
	Figura 9 - Ciclo de Trem.	26
	Figura 10 - Esboço do pátio objeto de estudo.	31
	Figura 11 - Modelagem Conceitual do Problema.	32
	Figura 13 - Macro etapas realizados pelos trens no modelo de simulação	33
	Figura 14 - Pátios da malha ferroviária.	34
	Figura 15 – Representação da modelagem conceitual no software	40
	Figura 16 - Representação da modelagem conceitual no software	41
	Figura 17 - Representação em software do modelo conceitual	42
	Figura 18 - Representação da modelagem conceitual no software	43
	Figura 19 - Lógica responsável pela identificação de erros de lógica	45

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação conceitual da matriz demanda	16
Tabela 2 - Resultados Usados na Validação de Fila do Modelo	47
Tabela 3 - Resultados Usados na Validação de Demanda do Modelo	47
Tabela 4 - Resumo Resultados Análise de Sensibilidade	49

## **SUMÁRIO**

<u>1.</u>	INTRODUÇÃO	<u>. 11</u>
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	.11
1.2.	JUSTIFICATIVA	.12
1.3.	ESCOPO DO TRABALHO	.13
1.4.	ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS	.13
1.5.	DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	.14
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO	.15
<u>2.</u>	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	<u>. 18</u>
	ANÁLISE E PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE	
2.2.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA SIMULAÇÃO EM ARENA®	.20
2.3.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE OPERAÇÃO E TRANSPORTE DE TRENS	.24
2.4.	TRABALHOS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE SIMULAÇÃO	.27
<u>3.</u>	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	<u>. 29</u>
3.1.	FORMULAÇÃO	29
3.2.	Representação	.36
3.3.	Implantação	.39
3.4.	VALIDAÇÃO, EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE	.46
<u>4.</u>	CONCLUSÕES	<u>. 50</u>
<u>5.</u>	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 51
<u>ANE</u>	EXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADEERRO! INDICADOR NÃO DEFINI	<u>DO.</u>
ANF	EXO 2 – DECLARAÇÃO DA EMPRESAERRO! INDICADOR NÃO DEFINI	DO:

## 1. INTRODUÇÃO

## 1.1.CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Brasil é um país conhecido pela baixa eficiência na logística, que é consequência do desenvolvimento de uma matriz de translado caracterizada pela preponderância do transporte rodoviário, o que é refletido na economia, prejudicando a competitividade dos produtos brasileiros no exterior e mesmo no mercado interno VILAÇA (2013). Deve-se destacar, segundo o mesmo autor que, com a interiorização da nossa produção agroindustrial,

(...) a fronteira agrícola e pecuária está se expandindo para as regiões Centro-Oeste e Norte, enquanto a indústria de base e de bens de consumo cresce bastante na região Nordeste. Isso já fez com que a distância média percorrida por cargas no Brasil aumentasse em 11% nas ferrovias e em 16% nas rodovias, entre 2006 e 2012. Ou seja, estamos indo mais longe, em busca de cargas e transportando produtos no território nacional.

Diante disso, fica clara a necessidade de uma reestruturação da nossa matriz de transportes. Países com maiores dimensões, como EUA, China e Rússia tendem a concentrar o transporte de carga em opções com menor custo unitário, como o transporte hidroviário e ferroviário (BNDES, 2012). É nesse contexto que se insere a MRS Logística, que, apesar de ter a maior parte do seu atendimento voltado para o transporte de *commodities* (como minério de ferro e produtos siderúrgicos), vem observando crescentes oportunidades no mercado interno que envolvem o transporte de produtos agrícolas e contêiner. A malha ferroviária sob gestão da MRS tem um significativo peso estratégico na economia brasileira, devido à sua disposição geográfica e ao volume transportado pela empresa (MRS LOGÍSTICA S.A, 2017).

A esse cenário definido por uma logística deficiente, soma-se a atual crise econômica que evidencia a necessidade da adequação da nossa matriz e, consequentemente, o aumento da participação da ferrovia no transporte de carga. Associada a estes e a outros fatores, existe a previsão de um aumento substancial do volume transportado pela companhia nos próximos anos, e por isso verifica-se a importância de iniciativas que garantam que este aumento conseguirá ser absorvido. Assim, surgem propostas que visam aumentar a produtividade e a capacidade de pátios, terminais e corredores. Tais projetos precisam ser avaliados para que seja constatada a viabilidade operacional e financeira dos estudos. Com isso, é percebida a necessidade de ferramentas que consigam mensurar quantitativamente o ganho obtido com as soluções recomendadas pela equipe de Engenharia. Esse trabalho apresenta os resultados

obtidos por meio da utilização de uma ferramenta de simulação (*software* Arena®), usado na avaliação de capacidade de um pátio da concessionária.

#### 1.2.JUSTIFICATIVA

O pátio definido para o desenvolvimento deste trabalho é localizado na Baixada Santista, entre as margens Esquerda e Direita e conectado ao Porto de Santos, estando localizado próximo ao ponto de acesso à Malha Rumo e ao sistema Cremalheira MRS. A imagem a seguir mostra a região de influência que abrange importantes corredores, terminais e portos.

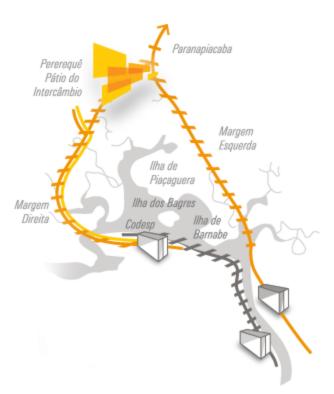


Figura 1 - Região afetada pelo pátio modelado Fonte: www.contrail.com.br, 2016

Todos os trens cujo destino é o pátio de Conceiçãozinha e aqueles com destino a Santos, que passam pelo Sistema Cremalheira, necessariamente circulam pelo pátio. Além destes, existem os trens cujo destino é o terminal localizado dentro do próprio pátio, e trens cujo acesso é feito apenas para realização de abastecimento.

Além da intensa circulação de composições com origem na Malha Rumo e Cremalheira MRS com destino ao Porto de Santos e das manobras realizadas no local, as manobras de atendimento ao terminal de cliente nas proximidades do pátio e a presença de um posto de abastecimento de locomotivas, tornam o pátio um dos pontos chave da eficiência da Baixada Santista. Dessa forma, é indispensável uma ferramenta que possa avaliar com precisão sua capacidade bem como soluções de para que referência atual aumente.

#### 1.3.ESCOPO DO TRABALHO

A construção do modelo de simulação foi realizada com base em um pátio situado na Baixada Santista, próximo ao pátio de Santos e Conceiçãozinha. Por ele passam trens de três concessionárias, dentre elas está a MRS Logística S.A.

Para a análise de capacidade foram considerados cenários de demanda de longo prazo com as respectivas premissas operacionais.

As informações necessárias para o desenvolvimento do estudo, como volume transportado por todas as empresas envolvidas no horizonte considerado, velocidade máxima permitida dentro do pátio, tempo necessário para abastecimento, tempo necessário para atendimento de cliente, capacidade das linhas do pátio, manobras necessárias para realização das atividades, tempo de permanência dos trens dentro do pátio, entre outras, foram fornecidas pelas companhias.

## 1.4.ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

Os objetivos pretendidos por esse trabalho são:

Desenvolver um modelo de simulação que reproduza a operação dentro do pátio (incluindo abastecimento de locomotivas, atendimento de terminal de cliente e circulação de trens de grade).

Avaliar a capacidade do pátio e obter estimativas de tempo de fila e permanência.

Avaliar impactos operacionais, por meio de indicadores de ciclo e capacidade, frente às demandas futuras e soluções de modelos operacionais propostos para o pátio.

## 1.5.DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Seguindo a definição feita em tópicos anteriores, o objetivo do trabalho foi construir um modelo de simulação e usá-lo para análise de capacidade.

Para o desenvolvimento da primeira e segunda etapa foi usada a metodologia descrita por CHWIF (*apud* SILVA et al., 2007) que consiste em:

- Formulação: São definidos o problema e objetivos da modelagem. Nesta etapa o modelo abstrato deve ser construído com base na observação do sistema. Nesta fase está incluído o tópico dois deste trabalho, no qual foi definida a necessidade de criação do modelo de pátio e a função do modelo como sendo a análise de capacidade. Neste momento também devem ser definidas as principais variáveis de entrada e saída do modelo, ou seja, quais parâmetros serão considerados na simulação, sendo um exemplo disso a demanda de trens a ser inserida como variável de entrada no modelo. A escolha entre pares de trens ou trens únicos, por exemplo, afeta toda a dinâmica da modelagem e a forma como os dados devem ser coletados para uso posterior.
- Representação: Etapa de construção do modelo conceitual baseado no uso da modelagem simbólica. Nesta fase os dados do sistema real devem ser coletados. Assim, são definidas as premissas operacionais (mapeamento de todas as atividades que acontecem dentro do pátio, como a identificação dos recursos a serem ocupados, como linhas do pátio, pontos de abastecimento, travessões e alças, bem como o tempo necessário para a realização de todas as atividades). Além disso, nesta etapa são identificadas as simplificações necessárias para a construção do modelo, dado que muitas vezes não é possível e nem mesmo relevante considerar absolutamente todas as situações que ocorrem na realidade por escassez de tempo ou de informações nesse caso devem ser estudadas formas de representar os impactos do que não é possível modelar para garantir que, mesmo sem a representação fiel da atividade, o sistema como todo continue refletindo a realidade.
- Implantação: O modelo conceitual é convertido em modelo computacional e implantado no programa usado na simulação, sendo executado de acordo com parâmetros definidos. Nesta etapa, para este trabalho foi usado o *software* Arena®, desenvolvido pela empresa americana Rockwell Automation.

- Verificação e Validação: A verificação trata de assegurar que o modelo conceitual foi transformado no modelo computacional com a devida precisão. A validação refere-se à capacidade do modelo computacional de se aproximar do comportamento que é desejado, o sistema real. Devido às características da operação de trens e das informações disponibilizadas pela companhia, é comum usar para calibração, tempos de fila e permanência dos trens dentro do pátio. Além disso, é muito comum o alinhamento dos resultados com a equipe de operação dos pátios e CCO (Centro de Controle de Operação), isso porque, essas áreas conseguem identificar resultados não factíveis usando os conhecimentos adquiridos através da experiência.
- Experimentação: O modelo computacional, após ser convertido em modelo operacional, é analisado quanto às variáveis. Cenários e análises de sensibilidade podem ser testados para que sejam encontradas as melhores soluções, dadas as premissas. Nesta etapa, são feitas as análises de capacidade e identificadas possíveis soluções para novos estudos.
- Análise: Nesta última fase, os resultados são analisados de acordo com os objetivos propostos. O relatório pode então ser confeccionado. Caso seja necessário o modelo poder ser redefinido.

#### 1.6.ESTRUTURA DO TRABALHO

As etapas do trabalho citadas no tópico anterior podem ser organizadas em três itens principais como é mostrada na Figura 2: Conceituação, modelagem e análise.

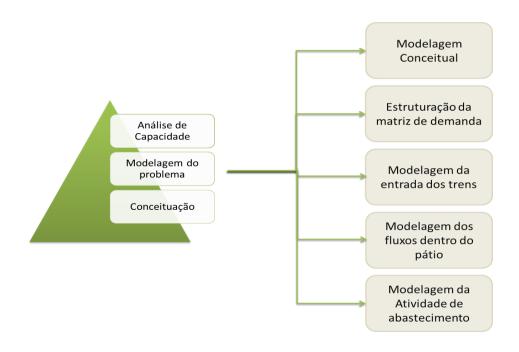


Figura 2 - Esquematização das etapas envolvidas na modelagem Fonte: Autora, 2017

A etapa da conceituação envolve a formulação e conceituação do problema. As principais saídas são informações de entrada para o modelo como os tempos envolvidos nas atividades de circulação, manobras, abastecimento, anexação de locomotivas entre outros. Nessa etapa, na qual o modelo conceitual é formulado, deve ser definido como será feita a modelagem do pátio.

A segunda etapa conta com modelagem prática: A matriz de demanda com valores para o cenário atual e do longo prazo deve ser ajustada correspondendo aos elementos da modelagem (expressões, variáveis, atributos e recursos, definidos na revisão bibliográfica). Em torno dessa matriz é montada uma lógica de distribuição das entidades que representam os trens. O objetivo desta lógica é garantir a leitura da matriz de demanda e a distribuição dos trens para os fluxos corretos.

A modelagem dos fluxos de trens dentro do pátio é a etapa mais trabalhosa e extensa, pois requer amplo conhecimento da operação. Os fluxos identificados foram: Cremalheira - Margem Esquerda; Margem Esquerda - Cremalheira; Cremalheira - Margem Direita - Margem Esquerda - Margem Esquerda - Margem Direita - Margem Esquerda; Margem Esquerda - Margem Direita e abastecimento.

A modelagem da atividade de abastecimento foi iniciada depois da finalização de todos os outros fluxos, visto que esta era dependente da etapa de entrada e saída no pátio.

A análise de capacidade, como citado no tópico anterior, deveria ser realizada após o término da modelagem, validação e calibração do modelo.

O cronograma das etapas para a conclusão do trabalho se encontra na Figura 3.

Período	2016.1	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
Quinzena		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>						
Etapa									
Pré Formulação									
1 – Formulação									
2 – Representação									
3 – Implantação									
5 – Verificação e Validação									
6 - Experimentação									
7 – Análise									

Figura 3 - Cronograma. Fonte: Autora, 2016

As etapas de formulação, representação e implantação, por corresponderem à fase de modelagem conceitual e prática, não poderiam acontecer em paralelo. A elas, seria necessário dedicar maior tempo, pelo fato de que todo o estudo era dependente disso. As últimas etapas (experimentação e análise) foram compostas, basicamente por reuniões para alinhamento entre equipes e apresentação.

#### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das funções da área de Engenharia de Transportes da MRS Logística é garantir que a empresa tenha capacidade para o atendimento à demanda solicitada pelos clientes no longo prazo.

Analisando os processos envolvidos no transporte de carga é possível considerar os recursos do sistema como sendo a malha ferroviária, os postos de abastecimento, as oficinas, as locomotivas e equipamentos usados em manutenção, os vagões e os colaboradores envolvidos de maneira direta (maquinista e auxiliares de maquinistas) e indireta (demais funcionários que, apesar de não estarem ligados à operação, contribuem para que a empresa forneça o serviço de logística). O fluxo do processo acontece através da circulação dos trens, que varia de acordo com a demanda dos clientes. Os processos envolvidos na produção são as atividades realizadas pelos trens no deslocamento entre os terminais de carga e descarga, sendo que dentre elas é possível citar a paradas para realização de abastecimento ou para troca de maquinistas. Além disso, existem as manobras dentro de pátio para posicionamento de locomotivas ou anexação e retirada das mesmas.

Ao relacionar a demanda com os recursos e processos descritos acima é criado um fluxo, que assim como qualquer fluxo de produção está sujeito a filas, gargalos e ociosidade. A identificação destes elementos e os estudos das soluções para essas restrições são os principa is objetivos da análise de capacidade.

Ao estudar sistemas que podem ou não ter capacidade para o nível de serviço demandado, surgem duas principais opções: O método analítico e a simulação. BORGES (2010) explica que o método analítico utiliza fórmulas matemáticas para entender como as filas são formadas e quais suas características.

A modelagem analítica pode ser obtida através da Teoria de Filas, brevemente definida por MATTOS & FOGLIATTI (2007):

A Teoria de Filas consiste na modelagem analítica de processos ou sistemas que resultam em espera e tem como objetivo determinar e avaliar quantidades, denominadas medidas de desempenho, que expressam a produtividade/operacionalidade desses processos. Entre essas medidas, podem-se citar: número de elementos na fila, tempo de espera pelo atendimento e tempo ocioso de prestadores de serviço.

A simulação, por outro lado, não exige grande complexidade, sendo assim, uma ferramenta útil para as análises desejadas. Segundo KELTON (2002), de um ponto de vista prático, a simulação é o processo de projetar e criar um modelo computacional de algo que seja

real ou de um sistema proposto. Sua finalidade é conduzir experimentos numéricos capazes de proporcionar melhor entendimento deste sistema dadas condições específicas. Enquanto outras ferramentas exigem uma forte simplificação da realidade, a simulação ainda pode dar bons resultados para um sistema complexo.

Complementando, PRADO (*apud* SOUZA, 2009) define a simulação como uma técnica que utiliza a análise de um sistema, usando o computador digital para descrever seu comportamento e solucionar um problema.

O *software* utilizado nas simulações, Arena®, além de trazer as vantagens dos estudos com modelos de simulação em relação àqueles que são analíticos, tem como atrativo uma interface mais simples, não sendo necessária a programação usando linguagens específicas como C/C++. Apesar disso, o programa, ainda segundo KELTON (2002), por possuir uma estrutura hierárquica, permite ao usuário transitar entre os níveis alto e baixo da modelagem, podendo optar por construir seus próprios módulos.

ANDRADE (2014) cita várias razões para a utilização da ferramenta de simulação. Dentre elas está o fato de que, através deste método, é possível estudar várias possibilidades dentro de um mesmo ambiente conseguindo, desta forma, verificar quais as consequências das variações propostas no todo. Outro ponto interessante é que através dos resultados da simulação é possível identificar variáveis importantes para o sistema, é possível testar a sensibilidade do modelo em relação a elas e, além disso, entender qual é a relação existente entre as variáveis. É importante destacar ainda que, pelo fato de a simulação exigir menor complexidade matemática, existe maior facilidade de se obter resultados mesmo ao incluir complicações do mundo real.

MEDINA & CHWIF (2010) esclarecem que a simulação não deve ser usada como último recurso. Existem problemas bem específicos aos quais a simulação é apropriada e capaz de fornecer uma boa análise, como é caso da aplicação abordada neste trabalho.

A simulação de eventos discretos, como destaca CHRISPIM (2007), aborda os problemas caracterizados por sistemas cujas variáveis mudam de estado de forma instantânea ao longo do tempo tendo seus valores modificados pela ocorrência de um evento, ao contrário dos modelos contínuos, cujas variáveis variam continuamente com o tempo.

#### 2.1.ANÁLISE E PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE

Capacidade, como explicado por KRUEGER (1999), é um termo complexo e vagamente definido que pode ter vários significados. Usando a expressão no universo da

ferrovia, o autor define o termo como o maior volume de trens por dia que pode ser movido sobre um espaço definido da malha, levando em consideração um cronograma e plano operacional, não excedendo um limiar definido de tempo. A capacidade tem natureza dinâmica sendo afetada por fatores específicos como as condições do espaço, o tráfego e o nível esperado de serviço.

SILVA (2015) faz a distinção entre os tipos de capacidade:

- Capacidade teórica é o número máximo de trens percorrendo determinado trecho em um horário específico em condições ideais. A sua principal característica é considerar o menor headway (intervalo de tempo entre trens circulando) possível. Sabe-se que este intervalo é necessário para garantir o processo de licenciamento e ocupação de Seções de Bloqueio (cuja definição pode ser encontrada no tópico 2.3 deste trabalho), isso porque, para garantir a segurança, em trechos sinalizados, é permitido a ocupação de apenas uma composição por Seção de Bloqueio. Se houver sincronia e alta eficiência na circulação, o headway é minimizado.
- Capacidade usada: se refere ao que vem sendo usado atualmente.
- Capacidade disponível: diferença entra as capacidades prática e usada.

CHRISPIM (2007) complementa explicando que, na prática, capacidade será o volume máximo a ser movimentado na linha férrea, refletindo a variação nos tipos de trens e as prioridades definidas pelo operador de tráfego, por exemplo. A simulação de eventos discretos, por incorporar características da circulação baseadas em dados realizados, é uma opção eficiente para o cálculo da capacidade.

Com base nos dados de capacidade a empresa poderá tomar decisões a respeito da necessidade e viabilidade de projetos de expansão ou melhoria operacional.

CORRÊA & CORRÊA (2009) citam a importância das decisões de capacidade produtiva que se justificam pelos grandes valores de capital envolvido, impactando na dificuldade de se fazer uma reversão, que seria cara e demorada. Além disso, existe o impacto das decisões no desempenho operacional.

## 2.2.CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA SIMULAÇÃO EM ARENA®

O Arena® é um *software* pertencente à Rockwell Automation. Dentro do programa é construída a modelagem que envolve um ambiente de lógica e animação com ferramentas de

análise estatística por meio de uma estrutura de *templates* que auxiliam o usuário na descrição do comportamento do sistema de forma visual e interativa. AGUILAR *et al.* (2009).

Para utilizar de forma correta a ferramenta de simulação, é necessário entender quais respostas são fornecidas por ela, bem como suas limitações. FREITA E SILVA *et al.* (*apud* PEREIRA, 2014) destaca a existência de "(...) um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados e utiliza a abordagem por processos para execução da simulação. Essa técnica de simulação pode ser considerada uma situação onde elementos estáticos, formando um ambiente bem definido com suas regras e propriedades, interagem com elementos dinâmicos, que fluem dentro desse ambiente". Nele, de acordo com KELTON (2002) é importante ressaltar os seguintes elementos:

- O Sistema: Composto pelo centro de operação, fluxo de entrada, fila e centro de processamento.
- As Entidades: Segundo KELTON (2002), são os objetos dinâmicos da simulação, geralmente criados no início da simulação. Movimentam-se passando pelos processos, deixando o modelo de simulação por meio do módulo chamado *Dispose*.

Nem sempre as entidades representam componentes reais. Algumas vezes elas estão no sistema para ativar ou desativar partes específicas da lógica.

- Os Atributos: Segundo KELTON (2002), são usados para caracterizar as entidades, atribuindo valores diferentes para elas de acordo com o que for desejado. Os atributos podem ser, por exemplo, a cor e a prioridade dos objetos. Dessa forma, cada objeto pode assumir um valor diferente para os dois atributos citados, logo um atributo assume diversos valores ao mesmo tempo, variando de entidade a entidade.
- Variáveis globais: São as formas de alocar uma informação que reflete alguma característica do sistema. Elas são válidas para qualquer entidade, independente das informações contidas nos atributos. Podem ser configuradas no próprio programa (como número de entidades na fila, número de recursos ocupados, por exemplo), ou variáveis definidas pelo usuário, como descreve KELTON (2002).

- Expressões: Este módulo, como o próprio nome descreve, permite ao usuário definição de expressões de valores associados ao módulo. Essas estruturas precisam ser definidas em um campo específico, e ao serem usadas, devem ser referenciadas pelo seu nome em demais módulos. Apesar de serem muito parecidas com as variáveis, possuem algumas diferenças importantes. As Expressões existem para que um dado complexo (fórmulas apresentadas em função de várias outras variáveis e/ou atributos) não seja inserido em uma variável. Outra diferença importante entre as duas estruturas é o fato de uma Expressão ser capaz de armazenar texto, desde que este seja usado entre aspas duplas. As expressões, ao contrário das variáveis, não são atualizadas com a ocorrência dos eventos.
- Recursos: Ainda segundo KELTON (2002), são representações de, por exemplo, pessoas, equipamentos ou espaço, necessários para realização de um processo. As entidades, ao entrar no modelo de simulação, competem por estes recursos, ocupando-os quando estes estão disponíveis, liberando-os ao término do processo ou entrando em fila, quando o recurso não está disponível.
- Filas: São os locais para onde as entidades se deslocam quando não encontram o recurso necessário disponível.
- Módulos: Os módulos são as estruturas envolvidas na modelagem que conferem ação às entidades. Por padrão, toda entidade criada entra em um módulo por meio de uma conexão (representada por uma linha contínua) feita à esquerda do módulo. Pela direita saem as entidades após a realização da ação.

Cada módulo é caracterizado por uma ação diferente. O *software* conta com um número grande destes elementos, entretanto, alguns deles podem ser mais utilizados de acordo com a preferência do usuário.

A seguir estão destacados os módulos fundamentais na construção do modelo de simulação em questão:

i. *Create*: Módulo onde se pode definir e configurar a entrada de entidades no sistema. Nele existem campos como *Value*, *Units*, *Max Arrivals* e *First Creation*, que indica m, respectivamente, de quanto em quanto tempo entrará uma entidade no sistema, a unidade de

tempo relativa ao campo anterior, o número máximo de entidades que podem entrar no sistema e em que momento a primeira entidade entrará no modelo.

Como é possível observar a partir da Figura 4, não existe entrada para conexões em ambos os lados do módulo. Isso é explicado pelo fato de que deve-se considerar que este módulo é um "criador de entidades" (dele apenas saem entidades pela conexão feita pela direita).



Figura 4 - Representação do módulo *Create* no *software*.
Fonte: Autora. 2017

ii. *Dispose*: Todas as entidades inseridas no modelo de simulação devem ser encerradas para que não façam mais parte do sistema. Para que isso aconteça, todas elas devem passar pelo módulo *Dispose*, o último módulo por onde uma entidade passa. Sua única finalidade é retirar as entidades do modelo de simulação, logo existe apenas uma entrada para conexão à esquerda (entidades apenas entram no módulo).



Figura 5 - Representação do módulo *Dispose* no *software*. Fonte: Fonte: Autora, 2017

iii. *Process*: Possibilita a ocupação e desocupação de qualquer recurso bem como a passagem de tempo, de acordo com as configurações feitas na caixa que pode ser aberta com duplo clique sobre o módulo.



Figura 6 - Representação do módulo *Process* no *software*. Autora, 2017

iv. *Decide*: Módulo que possibilita a opção por respostas diferentes tomando por base valores de variáveis ou atributos, estado de recursos ou valores percentuais. O módulo *Decide* é comumente utilizado quando é necessária tomada de decisão (por meio de uma condição ou probabilidade pré-definidas o fluxo de entrada no módulo pode seguir por caminhos diferentes) diante de uma determinada situação.

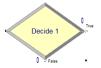


Figura 7 - Representação do módulo *Decide* no *software*. Fonte: Autora. 2017

v. *Submodel*: Estruturas que permitem a criação de lógicas em painéis paralelos. O sistema criado dentro do *Submodel* pode estar interligado à lógica principal através de conectores à esquerda e/ou à direita dele (como mostrado na Figura 8).



Figura 8 - Representação de um *Submodel* conectado aos módulos *Create* e *Dispose* no *software*. Fonte: Autora, 2017

## 2.3.CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE OPERAÇÃO E TRANSPORTE DE TRENS

A simulação da operação ferroviária requer conhecimento amplo das atividades realizadas na malha. Envolvidos na operação estão vários fundamentos. Para que estes sejam dominados, é necessário o entendimento de alguns conceitos. FIRONI (2008) destaca como elementos importantes:

• Pátios de Atividade: Para MEIRELES (apud. ZAMPIROLLI et al., 2016), são locais pertencentes à malha ferroviária onde se situam linhas de cruzamento, carga ou descarga, ou outras atividades necessárias para o transporte de carga realizadas pelos trens, que não podem ocorrer nas linhas de tráfego. MARTILAND (apud. SILVA, 2015) destaca a importância dos pátios ferroviários, locais na malha onde a formação de filas e permanência de vagões podem comprometer a capacidade de atendimento e gerar perdas para a companhia. SILVA (2015) ainda apresenta alguns elementos que podem estar associados aos pátios como trechos de cruzamento – locais onde são possíveis aproximação e ultrapassagem de trens em sentido bidirecional ou unidirecional – os Retropátios – região do pátio destinada à formação de filas – transbordo de mercadorias – passagem de carga de um trem para outro trem, caminhão ou outros modos de transporte – e manutenção de locomotivas/vagões – sendo realizadas inspeções e manutenções corretivas emergenciais.

- Terminais: São locais onde são realizadas as atividades de carga e descarga dos trens. Os terminais onde são realizadas as atividades dos trens da MRS Logística não são responsabilidade da empresa, mas dos seus clientes. Dessa forma, é importante destacar que todos os terminais (pertencentes aos clientes e de responsabilidade dos clientes) estão situados em pátios (que são de responsabilidade MRS Logística, desde que estejam localizados na malha desta empresa).
- Trens Unitários: Se diferenciam de Trens de Carga Geral por transportarem apenas um tipo de produto, carregando e descarregando sempre na mesma origem e mesmo destino. São caracterizados por um ciclo padrão, o qual é composto pelo tempo de deslocamento entre terminal de carga e descarga.
- Seções de Bloqueio: Para a empresa, são segmentos entendidos como o trecho entre dois sinais onde existe espaço suficiente para um trem unitário (com aproximadamente um quilômetro e meio) estacionar. O conceito geralmente é adotado no licenciamento realizado pelo Centro de Controle da Operação da empresa.
- Trens de Grade: São aqueles que possuem horários fixados para partida, chegada e parada em determinados pátios. O *Transit Time* nos trechos é padronizado. Durante o percurso, estes trens podem anexar e desanexar vagões em determinados locais, com produtos e clientes distintos. Circulam com comprimento e peso restritos em algumas localidades respeitando limites para cruzamentos em pátios e esforço trator das locomotivas usadas, podendo ser partidos em blocos em pátios estratégicos.
- Origem dos trens: Todos os trens possuem um local de formação, um trajeto prédeterminado e um ponto para o qual ele se dirige. Os trens unitários são criados nos pontos de carga (no caso dos trens carregados) e de descarga (trens vazios). Seguindo esta definição, nos próximos tópicos, o termo "pátio de origem" representará o pátio onde está localizado o terminal de carga daquela composição mesmo quando o trem considerado não for classificado como unitário.
- Destino dos trens: São os locais para onde os trens unitáiros se dirigem após serem carregados. Ao chegar ao destino, os vagões passarão pela descarga. Logo, quando o termo

"pátio de destino" for mencionado, deve-se ter em mente o pátio onde está localizado o terminal de descarga dos trens.

- Fluxo de trens: Conjunto dos trens que possuem características semelhantes tais como origem, destino, terminal de carga, terminal de descarga, carga transportada e cliente atendido.
- Ciclo dos trens: Além de origem, destino e um trajeto pré-determinado, trens que pertencem ao mesmo fluxo (possuem mesma origem, destino, carga transportada e cliente atendido) farão sempre o mesmo trajeto ciclicamente, ou seja, ao chegar ao destino, os vagões passarão pela descarga e voltarão para o ponto de origem, conforme Figura 9.

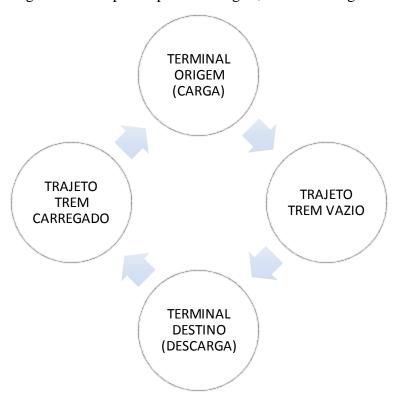


Figura 9 - Ciclo de Trem. Fonte: Autora, 2017

• Permanência: É o tempo em que o trem fica retido em pátio independente do motivo para espera. A definição de permanência é importante quando comparada ao conceito de fila, onde o trem está aguardando por um recurso que não está disponível. A permanência abrange todas as atividades (incluindo o tempo de processamento, que pode ser traduzido como tempo de circulação ou tempo de carga/descarga, no caso da empresa) necessárias ou que aconteceram por alguma ineficiência no processo, mas que de qualquer forma caracterizaram ocupação de pátio.

## 2.4.TRABALHOS DESENVOLVIDOS A PARTIR DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo de enriquecer e direcionar a pesquisa e a metodologia envolvida no trabalho foram consultadas algumas obras que, assim como esta, tiveram como foco a análise de um dado problema usando o *software* Arena®. Dessa forma, a descrição dos estudos, a identificação dos principais pontos comuns e divergentes entre eles, além do que foi idealizado para a construção destes trabalhos são fatores essenciais para o desenvolvimento do modelo uma vez que auxiliam no reconhecimento de pontos necessários ao entendimento do tema, fornecendo também diferentes perspectivas ao assunto, adicionando informações que proporcionaram maior conhecimento de questões diretamente relacionadas à pesquisa.

- i. Teoria das filas e da simulação aplicada ao embarque de minério de ferro e manganês no terminal marítimo de ponta da madeira é um artigo de Renata Massoli Borges (2010). Tem como objetivo o uso da Teoria das Filas e a Simulação na análise do atendimento do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, além de avaliar a capacidade deste para um investimento proposto que visava o aumento de capacidade. Este artigo carrega a mesma pretensão que o presente trabalho: Avaliar o cenário atual em termos de fila e atendimento de demanda, e fazendo a projeção desta demanda, avaliar cenários futuros, contendo ou não soluções de capacidade. A principal divergência entre esta obra e o presente trabalho é o objeto da modelagem. Com uma operação completamente diferente da que será considerada, a modelagem envolvida nesse caso, apresenta parâmetros distintos.
- ii. Simulação de uma operação ferroviária em um trecho de capacidade de circulação reduzida: Sistema cremalheira MRS Logística S.A. O trabalho de conclusão de curso apresentado por Leandro Roberto Pereira (2014), teve como objetivo a análise de capacidade de um trecho da malha ferroviária bem como avaliações de investimento para o mesmo. O trabalho foi realizado na mesma companhia, logo, a operação modelada é a mesma que a considerada para a elaboração deste trabalho. Soma-se a isso o fato de que a região impactada pelos dois estudos também é a mesma, logo a simulação é realizada com base nos mesmos fluxos de trens visando respostas similares. A diferença entre as duas pesquisas está no elemento modelado: o primeiro tem como foco um trecho de circulação, já o segundo é baseado em um pátio ferroviário.

- iii. Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: Avaliação de alternativas para o direcionamento de composições, tese para título de Doutor de Marcelo Moretti Fironi (2008), visa o reconhecimento de um algoritmo eficiente, dadas algumas opções, para análise da circulação dos trens, considerando os impactos de termina is, oficinas e postos situados ao longo da malha ferroviária. A obra apresenta maior detalhamento de informações técnicas necessárias ao entendimento da operação ferroviária. A grande distinção entre a tese e o presente trabalho é fato de que o primeiro não tem como foco análises de capacidade, dessa forma, o modelo e a simulação são a finalidade do trabalho e não a ferramenta para obtenção de outros resultados.
- iv. Utilizando o *software* Arena como ferramenta de apoio ao ensino em engenharia de produção, artigo de Liane Márcia Freitas e Silva (2007). Seu propósito é a abordagem didática de temas relacionados à Engenharia de Produção usando como ferramenta a simulação no *software* Arena®. O propósito do artigo tem pouca relação com o tema deste trabalho, entretanto, a obra foi uma das referências pelo fato de demonstrar de forma simples como o programa pode ser utilizado na análise de gargalos.

## 3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Seguindo a metodologia para construção do modelo de simulação, o desenvolvimento do trabalho foi dividido em formulação, representação, implantação, verificação e validação, experimentação e, por fim, análise.

## 3.1.FORMULAÇÃO

A importância desta primeira fase está no entendimento do tema como todo. As questões chave são:

- 1) Por que o modelo está sendo construído?
- 2) Quais são as respostas pretendidas?
- 3) Quais informações estão disponíveis para o seu desenvolvimento?

As respostas para estas perguntas são pontos fundamentais na orientação para a elaboração de um trabalho que visa resultados específicos como este, principalmente porque uma das maiores dificuldades da modelagem é a simplificação de determinadas estruturas presentes na realidade e extremamente complexas. O entendimento do problema como todo ajuda na determinação do que pode e o que não pode ser simplificado, de como será feita a simplificação, de até que ponto a simplificação afeta os resultados do modelo de simulação e se, apesar dos impactos, os resultados continuam satisfatórios para análises e tomadas de decisão.

Parte dos tópicos anteriores ajudou a esclarecer a finalidade do modelo de simulação. Deste modo, para as perguntas feitas no início deste item já existem algumas respostas bem definidas. O objetivo do modelo é representar todas as operações que acontecem dentro de um

pátio específico visando análises de capacidade para um cenário de demanda atual e extrapolada para os próximos anos.

A análise de capacidade é feita a partir da interpretação dos resultados fornecidos pelo modelo. De forma resumida, a estrutura montada na modelagem deve inserir no início e durante a simulação um número de trens compatível com a demanda que se pretende analisar. A estrutura construída na modelagem deve conter todos os processos pelo qual um trem passa. Ao finalizar a simulação, deve-se chegar aos seguintes resultados: as filas geradas nos processos modelados (em horas e em quantidade de trens), os tempos necessários para realização dos processos e a contagem do número de trens que finalizou todos os processos (a última informação descrita é necessária porque em certas situações de saturação, o conflito gerado pela grande quantidade de trens, por algum recurso gargalo ou até mesmo por algum erro na lógica, impede que todos os trens inseridos no início ou durante a simulação de fato terminem a simulação. Eles ficam "presos" em algum processo). A avaliação dos dados de fila, tempo de processamento e volume realizado (número de trens que de fato finalizaram a simulação) permite a geração de afirmações sobre as condições do pátio. Um estudo aprofundado destes mesmos dados (fazendo uso, por exemplo, da análise de sensibilidade) permite que sejam encontradas respostas como até que nível de demanda o pátio é capaz de absorver, quais os recursos críticos do pátio, e em uma situação de saturação, qual processo seria mais afetado.

Tendo em vista as condições necessárias para que uma análise de capacidade seja feita (contar com resultados de fila, tempos de processo, volume atendido, e para tanto, o modelo de simulação com a estrutura dos processos envolvidos na dinâmica do pátio objeto de estudo), um fator elementar para a construção do sistema é a forma como as informações de demanda serão inseridas e como a lógica converterá essas informações em trens.

Para iniciar a elaboração da estrutura de entrada é preciso ter conhecimento aprofundado da operação a ser modelada. Para auxiliar o entendimento dos processos do pátio, na Figura 10 se encontra um esboço do objeto de estudo.

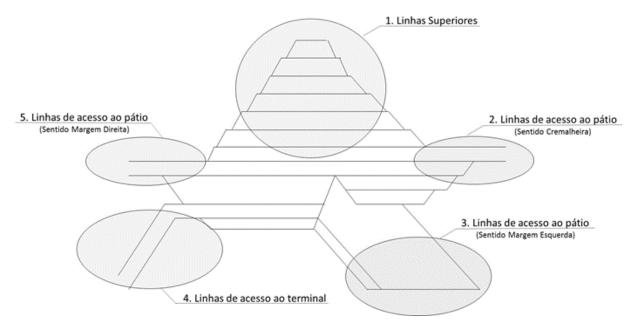


Figura 10 - Esboço do pátio objeto de estudo. Fonte: Autora, 2017

As linhas em destaque marcadas como número um na Figura 12, são chamadas linhas superiores. Todas as linhas situadas acima da linha principal (linha única que passa por todo o pátio) recebem a mesma denominação. É nas linhas superiores circuladas que acontece a atividade de abastecimento. Duas destas linhas são dedicadas a essa operação. As demais linhas superiores são utilizadas para atividades com manobra de locomotivas, aguardo de trens e circulação.

A área assinalada como número dois (duas linhas, sendo uma delas a linha principal do pátio) apresenta as linhas de entrada/saída para os trens vindos do sistema cremalhe ira (sentindo interior), logo essa região merece destaque por ser uma das entradas do pátio.

As linhas circuladas (são três ao todo, sendo uma delas denominada "Alça") marcadas como número três também são linhas de entrada/saída do pátio. Os trens que entram por ela s circulam pela Margem Esquerda (sentido Porto de Santos).

A região destacada (contendo duas linhas no total) com número quatro são linhas de entrada/saída para o terminal situado dentro do pátio (o terminal não foi representado na figura por pertencer a um cliente da empresa).

As linhas em destaque marcadas como número cinco (duas no total) são também linhas de entrada/saída de trens. Os trens que chegam ao pátio por este caminho são originados da Margem Direita (sentido porto de Santos, ou interior, seguem em direção às outras ferrovias).

Com o conhecimento das operações realizadas no pátio é possível a montagem do modelo conceitual. Na figura 11 é mostrada a base para construção do modelo de simulação.

Como mostrado na Figura 11, no início do modelo de simulação (quando as entidades

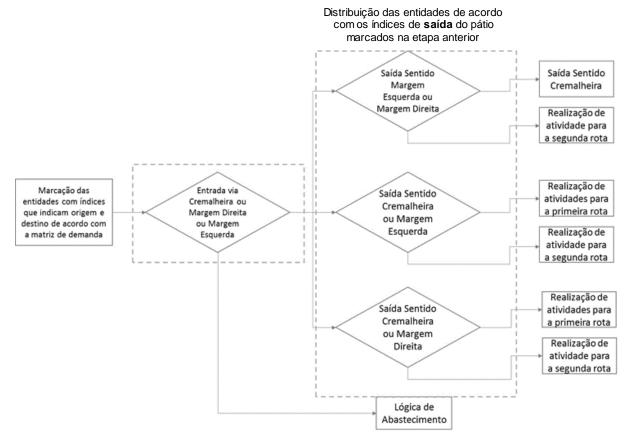


Figura 11 - Modelagem Conceitual do Problema. Fonte: Autora, 2017

são inicializadas) ocorre a "marcação" das variáveis, que nada mais é do que a atribuição de informações às entidades. Essas informações são, basicamente, o ponto de origem e destino da entidade no pátio, ou seja, o sentido de circulação do trem dentro do pátio (podendo ser da Margem Direita para a Margem Esquerda ou da Margem Esquerda para a Margem Direita, por exemplo). De acordo com essas características, as entidades serão distribuídas, primeiramente levando em consideração o local por onde vão entrar no pátio, depois serão distribuídas pelo local por onde vão sair. Dessa forma, entidades com origem Margem Direita e destino Margem Esquerda seguirão por lógicas onde serão realizados processos e serão ocupados recursos e filas diferentes das entidades com origem Margem Esquerda e destino Margem Direita (cada um dos seis quadros localizados à esquerda da Figura 11 representam lógicas que podem ser representadas genericamente de acordo com a Figura 12.

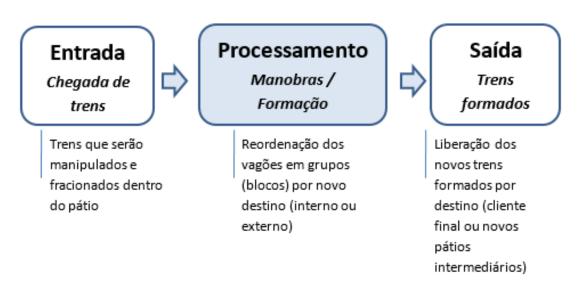


Figura 12 - Macro etapas realizados pelos trens no modelo de simulação. Fonte: Silva, 2015

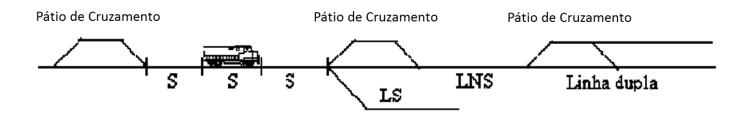
Cada par "origem/destino" possui um conjunto de macro etapas diferentes, compostos por atividades distintas, tempos de processamento e recursos envolvidos diferentes. Ainda segundo SILVA (2015) entre estas atividades estão a inspeção de entrada, manobras de vagões, manobras de locomotivas, abastecimento de *diesel* e areia, inspeção de saída e documentação (procedimento padrão realizado por maquinistas ao passarem por alguns pátios).

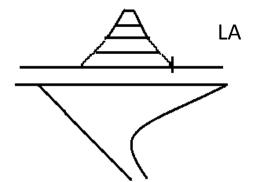
Tendo em mente o modelo conceitual, no próximo passo, também desenvolvido na etapa da formulação, é necessário entender como será a entrada de dados do modelo, pois a modelagem a ser realizada na fase de implementação é dependente desta estrutura. Além disso, os dados a serem coletados na fase de representação serão identificados na formulação, por isso a importância de algumas definições neste momento.

A complexidade envolvida na questão do volume de carga transportada para o modelo em questão é relativamente alta e dada pelo grande número de informações envolvidas. A demanda definitivamente deve ser considerada a variável de entrada mais importante para este modelo e, no caso específico deste trabalho, será a informação mais detalhada a ser introduzida na lógica.

Normalmente informações de demanda inseridas nos modelos de simulação não são tão críticas quanto as que foram trabalhadas no sistema em estudo. O que torna este caso singular é um conjunto de fatores: Como foi mencionado anteriormente, o pátio objeto de estudo tem características particulares de posicionamento na malha ferroviária, o que configura maior número de alternativas para o fluxo de trens que passam por ele. Em resumo, enquanto

na maioria dos pátios o sentido de circulação é unidirecional ou bidirecional, para o sistema em questão existem – simplificadamente – seis direções para circulação de trens. Uma observação mais profunda das atividades realizadas no pátio estende o leque para dez possibilidades. O número de opções de fluxos de circulação dentro do pátio influencia na complexidade da estruturação da entrada de dados do modelo de simulação porque, como modelo retrata apenas as operações do pátio, a forma de representação de entrada de trens no sistema é organizada de acordo com as entradas do pátio, ou seja, a demanda de trens de Carga Geral que chega como um único número é segregada de acordo com o local de chegada e de saída dos trens dentro do pátio. Assim, quanto maior o número de fluxos circulando dentro do pátio, maior será o número de dados segregados na entrada. A Figura 14 mostra como funciona a circulação em trecho bidirecional. No circuito, podem circular composições da direita para a esquerda e no sentido contrário. Ultrapassagens e cruzamentos são realizados nos pátios. Na Figura 14 (inferior), a representação do pátio objeto de estudo deste trabalho mostra que existem mais de duas opções para circulação pelo pátio.





S: Seção de Bloqueio

LNS: Linha não Sinalizada

LS: Linha de Serviço

LA: Linha para atividades realizadas no pátio

Figura 13 - Pátios da malha ferroviária. Fonte: Fironi, 2005 (Adaptado)

Além da informação de ponto de acesso de entrada e saída no pátio modelado, a origem e o destino dos trens influenciam as respostas do modelo visto que a matriz de demanda é segregada de acordo com os pontos de carga e descarga da mercadoria. Entretanto, esses dois componentes não possuem relação com a modelagem das atividades realizadas no pátio porque independentemente do local de carga e de descarga da composição, a operação dentro do local ferroviário modelado será a mesma e influenciada apenas pelos pontos de origem e destino de acesso ao pátio. Apesar disso essas informações fazem diferença para o resultado final, visto que os trens são modelados respeitando um ciclo fixo, ou seja, eles são carregados na origem, circulam, passam pelo pátio modelado, circulam até o destino, descarregam e retornam para a origem (podendo ou não passar pelo pátio modelado no caminho de volta iniciando o mesmo processo). Trens com pontos de carga ou pontos de descarga diferentes podem ter ciclos diferentes e, consequentemente "resto de ciclo" diferentes. É neste ponto que a origem e o destino do trem conferem a ele uma característica única, e por isso, já na inserção dos dados de entrada foi preciso diferenciar trens com origens (pátio de carga) e destinos (pátios de descarga) diferentes.

Além de origem, destino, local de entrada e saída no pátio, uma característica importante dos trens é a carga sendo transportada por eles. O pátio modelado possui apenas trens de Carga Geral circulando por ele, entretanto, o termo "Carga Geral" abrange vários tipos de mercadorias, como produtos siderúrgicos, cargas agrícolas (soja e açúcar, por exemplo), cimento, contêiner, entre outros. Pelo fato de que em alguns casos, um mesmo pátio de origem ou destino podem carregar/descarregar tipos de carga diferentes, é possível que dois trens com mesma origem, mesmo destino, mesmo local de entrada e saída no pátio modelado estejam transportando cargas diferentes, e por isso devem ser configurados na simulação de forma segregada. O transporte de cargas diferentes, em grande parte dos casos, não influencia na operação dos trens, por isso, a princípio separar trens por esse tipo de característica não seria intuitivo. O fato que motivou essa distinção foi apenas a forma de tratamento das informações de entrada e de saída da simulação. Diversas áreas que lidam com as informações geradas e recebidas pela área de Engenharia segregam os trens por tipo de carga (por vários motivos que não impactam a modelagem). Os indivíduos que lidam com os resultados da simulação precisaram deste tipo de informação, logo ela foi levada em consideração.

Como a estrutura necessária para a inserção dos dados de demanda é complexa, fazer uso de uma variável ou de variáveis para isso seria inadequado. O módulo Expressão se mostrou mais eficiente para esta tarefa. Fazendo uso deste módulo, os valores correspondentes ao

volume foram distribuídos em uma matriz com cento e dezessete linhas e cento e trinta e duas colunas. Cada linha correspondendo a um tipo diferente de carga (agrícola, produto siderúrgico, contêiner, entre outros). Cargas iguais transportadas por ferrovias diferentes também foram alocadas em linhas diferentes. Além disso, para cada tipo de carga transportada por cada uma das três ferrovias, existem as opções de entrada no pátio, dessa forma, o volume de contêiner transportado pela MRS teve um valor diferente para entrada via Cremalheira, Margem Esquerda e Margem Direita.

A distribuição de colunas da matriz demanda foi feita respeitando os períodos de demanda (de ano em ano os valores foram alterados), além das possibilidades de local de saída do trem no pátio. Na tabela 1 se encontra a forma conceitual da matriz de demanda.

	"Produtos"	"Empresa"	"Origem	"ld. Origem"	"Destino ANO 1"	"Destino ANO 1"	"Destino ANO 1"	"Destino ANO 2"	"Destino ANO 2"	"Destino ANO 2"	
	"Produtos"	"Empresa"	"Origem"	"ld. Origem"	"Crema"	"MD"	"ME"	"Crema"	"MD"	"ME"	
	"Produtos"	"Empresa"	"Origem"	"ld. Origem"	1	2	3	4	5	6	
1	"1. Tipo de Carga 1"	"MRS"	"MD"	1							
,	"1. Tipo de Carga 1"	"MRS"	"ME"	2							
	"1. Tipo de Carga 1"	"MRS"	"Crema"	3							
•	"2. Tipo de Carga 2"	"MRS"	"MD"	1							
1	"2. Tipo de Carga 2"	"MRS"	"ME"	2							
	"2. Tipo de Carga 2"	"MRS"	" Crema "	3							
	"3. Tipo de Carga 1"	"Empresa 2"	"MD"	1							
	"3. Tipo de Carga 1"	"Empresa 2"	"ME"	2							
	"3. Tipo de Carga 1"	"Empresa 2"	" Crema "	3							

Tabela 1 - Representação conceitual da matriz de demanda. Fonte: Autora (2017)

## 3.2.REPRESENTAÇÃO

Na representação, os pontos chave são a coleta das informações que serão usadas como entrada e na validação além da avaliação que objetiva transformar as informações operacionais já conhecidas em dados técnicos, usando linguagem computacional e matemática.

A coleta de dados para o sistema é dependente da definição das variáveis e recursos necessários no estudo. Durante a fase de implantação (onde o modelo conceitual e os dados coletados foram usados para a construção do modelo de simulação no *software*) foi identificada

a necessidade de criação de diversas variáveis, sendo que algumas delas são essenciais para o modelo e antes mesmo da sua elaboração foi possível mapeá-las para dar início à coleta dos dados. Como o sistema pretendeu simular a operação de um pátio da malha ferroviária, logo no início foi possível identificar a necessidade de variáveis que representassem os tempos das atividades do pátio. Além destas, foram também necessárias as variáveis usadas para leitura da matriz demandam e transformação dos números inseridos em trens.

A variável de entrada mais importante do modelo, como já mencionado, foi a demanda. Além dela, outras variáveis fundamentais para o desenvolvimento do estudo foram, por exemplo, aquelas que definiram o tempo de atividade das operações do pátio. Este tipo de informação poderia ser representada apenas por números fixos inseridos diretamente no modelo, entretanto, a decisão de transformar esses dados em variáveis foi tomada pensando no fato de que, para análises de capacidade e avaliação de alternativas de melhoria, seria necessário criar a possibilidade de mudança desses valores. Com isso, seria possível descobrir, por exemplo, se vale a pena investir tempo e dinheiro na tentativa de melhorar os tempos de manobra ou abastecimento fazendo alteração dos tempos cadastrados e analisando a resposta de fila e demanda da simulação.

Outro conjunto de variáveis muito importantes para o modelo de simulação foram aquelas responsáveis pela contagem dos trens processados pelo modelo. A informação fornecida por elas quando a simulação era finalizada deveria ser compatível com os valores de demanda inseridos no modelo. Se os dois dados não fossem iguais, seria necessário procurar entender quais as causas para tal acontecimento. Essa verificação normalmente permitiria a identificação de erros na lógica da simulação (estruturas que provocam a entrada de uma entidade num ciclo infinito que não permite sua chegada ao final do modelo) além de cenários de saturação (em alguns casos, quando um recurso está operando com demanda muito acima de sua capacidade, a fila gerada na entrada não consegue ser atendida com o tempo configurado para simulação).

Além de variáveis, existem diversos outros componentes essenciais na construção do modelo e que podem ser apontados antes de se iniciar a modelagem. Aqueles que caracterizam as linhas de circulação no modelo, além de qualquer recurso necessário para desenvolver e concluir as atividades nos pátios no modelo de simulação são os módulos Recurso. Durante o tempo que uma atividade está sendo realizada (seja circulação, abastecimento, manobra por qualquer motivo, ou parada por qualquer motivo), algum recurso deve ser ocupado, indicando o posicionamento do trem no pátio enquanto realiza a atividade.

A ocupação e desocupação dos recursos são importantes para a modelagem porque esta lógica impede que dois trens ocupem o mesmo espaço dentro do pátio. Toda lógica de circulação exige mecanismos que consigam garantir isso, pois assim como no trecho real de circulação, na modelagem existe um risco a ser considerado de que, caso o licenciamento de trens não ocorra no tempo correto e de forma correta, a probabilidade de um acidente acontecer aumenta consideravelmente. Na lógica de circulação, assim como na realidade, o choque de trens não é uma situação a ser considerada como possível. A configuração de ocupação e desocupação oferecida pelo *software* naturalmente garante que enquanto uma entidade (ou um trem) está ocupando qualquer recurso, outra não conseguirá fazer o mesmo. A situação é alterada quando a entidade ocupante do recurso ocupado termina o processo (consumindo todo o tempo designado para ele).

A capacidade dos recursos mencionados, no caso específico do modelo objeto de estudo, foi definida de acordo com o comprimento das linhas (quando o recurso representava uma linha superior ou inferior) e número de pontos de abastecimento (quando o recurso era o posto de abastecimento).

No caso das linhas superiores e inferiores, a capacidade foi definida de acordo com o comprimento da linha, porque o número de vagões suportados por linhas diferentes varia de acordo com seu tamanho (intuitivamente linhas maiores são capazes de receber mais vagões), dessa forma, dependendo do comprimento do trem e da linha seria possível, na prática, alocar mais de um trem.

As linhas dedicadas à circulação são diferentes das demais porque nestas, além de ser proibida a parada de trens, independente do comprimento da linha, apenas um trem pode fazer ocupação por vez (não fazendo diferença a quantidade de vagões distribuídos na composição),

No caso dos postos de abastecimento, um posto com dois pontos para abastecer consegue operar com duas locomotivas ao mesmo tempo, logo a capacidade da operação de abastecimento foi calculada em função do número de pontos de abastecimento (dois) e não em função do número de postos (um).

No caso do terminal, a capacidade foi considerada como sendo uma unidade, pois a informação necessária para modelagem seria de que o terminal estaria ou não estaria efetuando a descarga. Dessa forma, quando a descarga fosse desocupada, o próximo trem a entrar no pátio seria diretamente direcionado para o terminal e quando a descarga estivesse ocupada os trens que chegassem ao pátio seriam direcionados para as linhas de espera (ocupadas de acordo com a capacidade medida em comprimento).

Como a entrada do pátio, no caso dos pontos de acesso sentido Margem Esquerda e Cremalheira pode ser feita através de duas linhas, para a representação do pátio na modelagem foram criadas duas Seções de Bloqueio para entrada dos trens. A fila nestas Seções de Bloqueio definia a fila para entrada no pátio.

# 3.3.IMPLANTAÇÃO

Seguindo o modelo conceitual, foram abordadas as principais lógicas envolvidas no funcionamento do modelo.

A inicialização das entidades no modelo foi feita através da lógica de entrada de trens (mostrada na Figura 14). Nesta etapa, as entidades criadas no módulo *Create* não foram associadas aos trens. Estas entidades, com função de auxílio na leitura da matriz de demanda, foram enviadas à estrutura denominada *Submodel*, onde foi feita a leitura da matriz de demanda. Nas lógicas localizadas dentro dos *Submodels*, foi realizada a leitura dos valores contidos na matriz de demanda. Após esta etapa foram "criados" os trens: as entidades criadas na lógica de entrada foram multiplicadas de acordo com a necessidade indicada pela matriz de demanda. A lógica também "marcou" as entidades - que passaram a corresponder a trens - com atributos que representavam a origem e o destino dos trens, essas informações foram necessárias na distribuição dos trens no modelo.

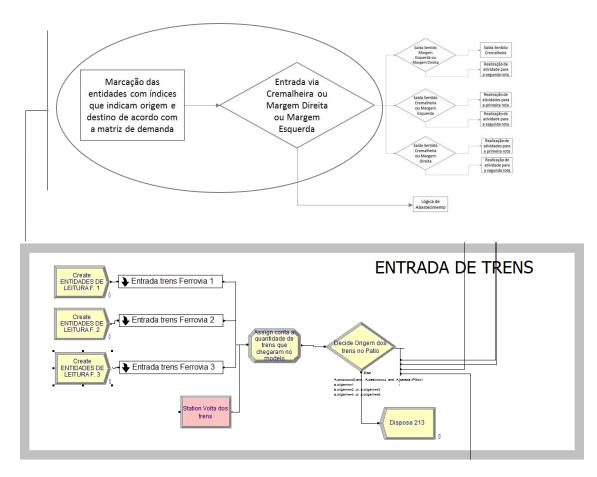


Figura 14 – Representação da modelagem conceitual no *software*. Fonte: Autora, 2017

O módulo *Decide* contido na lógica da Figura 14 foi responsável pela distribuição das entidades no modelo de simulação. Pode-se notar a existência de algumas conexões feitas no módulo pelo lado direito. Para cada linha conectada ao módulo existe uma lógica corresponde (assim como mostrado no modelo conceitual) que corresponde a uma segunda distribuição de acordo com os destinos marcados nas entidades.

A partir do primeiro módulo de tomada de decisão (que direcionou os trens para as três diferentes entradas do pátio de acordo com o atributo definido na lógica de entrada) as entidades (agora representando trens) foram novamente distribuídas de acordo com o destino. O resultado desta separação foram as rotas realizadas pelos trens dentro do pátio.

As Figuras 15 à 17, apesar de não oferecerem uma visão detalhada do modelo de simulação – levando em consideração que, devido ao fim acadêmico desta obra, informações específicas sobre os processos envolvidos no transporte de carga são menos relevantes e, por isso, foram omitidos – demonstram como o modelo conceitual evolui se transformando no modelo de simulação. A partir das ilustrações é possível identificar os grandes quadros em

cinza. Em cada quadro estão o conjunto de atividades (agrupadas em macro etapas apresentadas no tópico "Formulação") atreladas aos pares origem/destino da entidade. Ou seja, os pontos por onde foram realizadas as entradas no pátio e os pontos por onde foram realizadas as saídas do pátio definiram quais foram as atividades realizadas e recursos ocupados pelo trem.

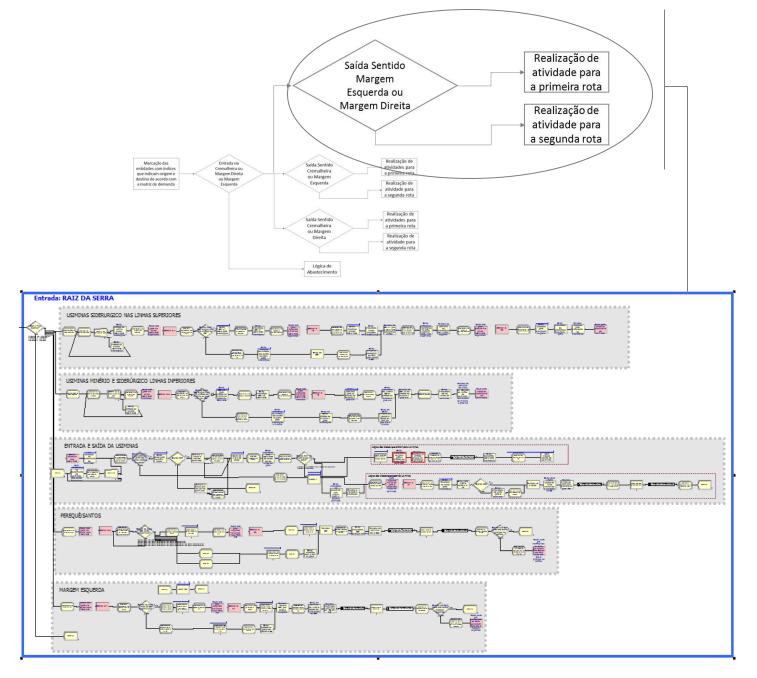
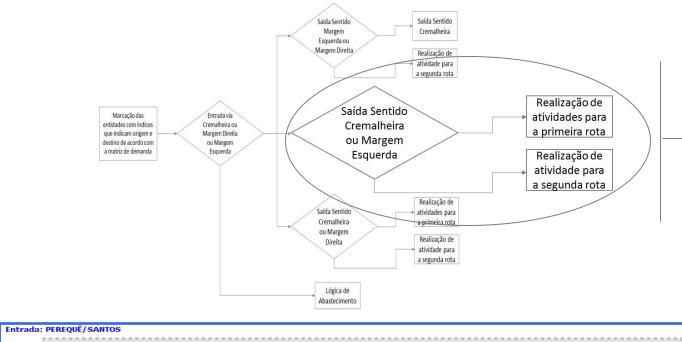


Figura 15 - Representação da modelagem conceitual no *software*. Fonte: Autora, 2017



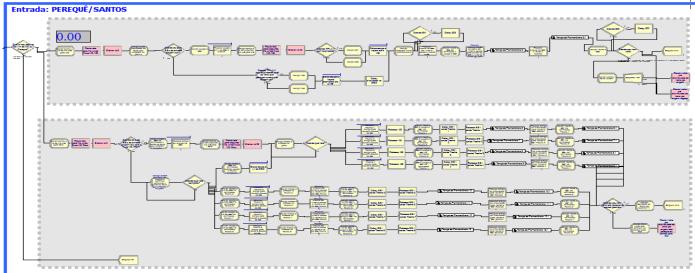


Figura 16 - Representação em software do modelo conceitual. Fonte: Autora, 2017

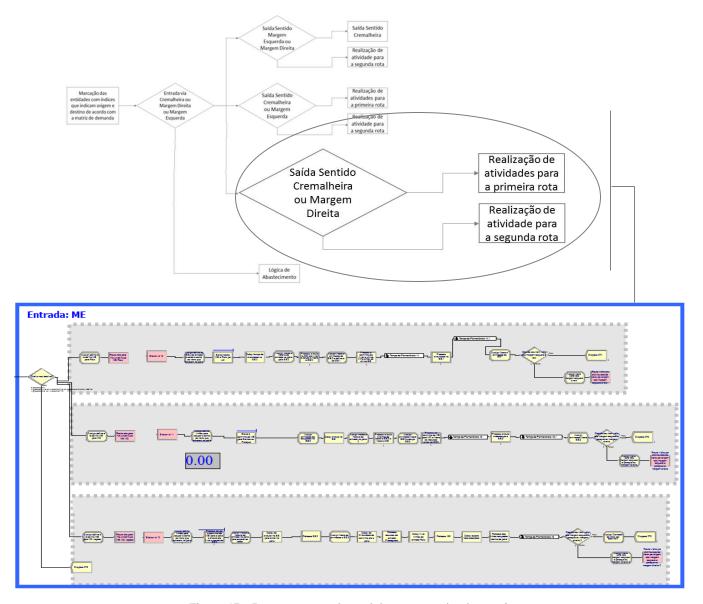


Figura 17 - Representação da modelagem conceitual no *software*. Fonte: Autora, 2017

A partir das rotas definidas por origem e destino, foram modeladas as atividades realizadas pelos trens. As lógicas que representam a operação podem ser resumidas em um mesmo padrão que compreende:

i. Verificação para ocupação da primeira Seção de Bloqueio do pátio de acordo com a origem: O primeiro componente da lógica é um módulo *Decide* que verifica se o recurso referente à Seção de Bloqueio de entrada do pátio está disponível. Se o recurso não estiver ocupado, a entidade que representa o trem segue para a próxima etapa da lógica. Caso o recurso esteja ocupado, a entidade entra em fila até que o recurso esteja disponível. A verificação de disponibilidade de recurso é feita após a realização de qualquer evento no sistema (considerando que evento é uma atividade que consome tempo) mesmo que este evento não

tenha relação com a lógica local. A verificação inicial garante que um trem não fará ocupação de uma linha já ocupada por outro trem, além de configurar a fila de cada uma das entradas do pátio.

- ii. Ocupação da Seção de Bloqueio e circulação até o pátio: Ao ser identificada a oportunidade para ocupação da primeira Seção de Bloqueio, é feita a ocupação da mesma (configura-se o recurso referente à Seção de Bloqueio como ocupado no módulo *Process*).
- iii. Liberação da primeira Seção de Bloqueio do pátio e ocupação das linhas de circulação: Depois de ser computado o tempo necessário para circulação na primeira Seção de Bloqueio (tempo das atividades pode ser inserido através do módulo *Delay* ou pode ser configurado no módulo *Process*), a entidade passa pela verificação de disponibilidade dos recursos que representam as linhas de circulação do pátio. Se houver disponibilidade a entidade faz a ocupação do recurso correspondente às linhas e em seguida, a desocupação do recurso referente à Seção de Bloqueio anterior.

A ordem destes procedimentos é de suma importância para o funcionamento correto da modelagem porque se, por exemplo, a liberação da primeira Seção de Bloqueio for feita antes da ocupação do recurso correspondente à linha de circulação por onde o trem passará no pátio, existirão chances de que o trem desocupe a primeira Seção de Bloqueio mas não consiga ocupar a linha de circulação (caso esta já esteja sendo ocupada por qualquer outro motivo), aguardando em fila sem ocupar qualquer recurso. Como foi considerado que todas as linhas do pátio estão sendo modeladas, a situação em que uma entidade não ocupa nenhum recurso, depois de já ter ocupado a primeira e Seção de Bloqueio, corresponde, na prática, ao desaparecimento do trem do pátio, o que não poderia acontecer.

- iv. Circulação pelo pátio e liberação das linhas de circulação: Após a ocupação dos recursos correspondentes à circulação, a entidade passa pelo módulo onde será computado o tempo de circulação nas linhas ocupadas (através do módulo *Delay*) para então ser feita a ocupação da Seção de Bloqueio de saída do pátio. O próximo passo é a desocupação do recurso referente à linha de circulação do pátio, feita neste momento para que não haja risco de que a Seção de Bloqueio não esteja disponível para ocupação quando a linha de circulação estiver desocupada (o que causaria o mesmo efeito de "desaparecimento" dos trens do pátio mencionado no parágrafo anterior).
- v. Circulação pela Seção de Bloqueio de saída e redirecionamento da entidade: Após ocupar a Seção de Bloqueio, a entidade passará pelo módulo *Delay* de circulação que representa o tempo de circulação pelo local. Depois disso, esta última Seção de Bloqueio será

desocupada e a entidade passará por uma lógica que fará a troca do valor dos atributos de origem e destino das entidades (o que era destino será origem e o que era origem será destino). Isso deve ser feito porque, como foi mencionado no item Formulação, os valores da matriz demanda representam pares de trem, o que significa que todo trem que entra no pátio, sairá, circulará até seu destino, fará carga ou descarga, voltará pelo mesmo caminho de onde veio e entrará novamente no pátio pelo mesmo local de onde saiu, circulando por este e saindo pelo local por onde ele havia entrado no percurso de ida.

Os passos apresentados acima descrevem resumidamente a lógica existente no modelo conceitual, entretanto, deve-se ter em mente que existem outras lógicas associadas a estas que foram destacadas - responsáveis pela modelagem de processos mais específicos característicos de cada rota - e não serão descritas aqui. Em alguns casos, essas lógicas particulares podem ser usadas em vários outros modelos de simulação, é o caso da lógica que detecta erros na modelagem, que apesar de simples, permite a identificação de problemas que impediriam o funcionamento correto do sistema.

A lógica de identificação de erros está representada na Figura 18. Ela consiste na verificação diária dos valores das variáveis que marcam em que momento a entidade (ou trem) ocupou o recurso que caracteriza entrada no pátio. Para cada rota a ser seguida pelos trens, sabese o tempo esperado para realização de todas as atividades sem que haja filas. O módulo *Decide* faz a comparação dos tempos de entrada dos trens no pátio com o tempo instantâneo de simulação, se a diferença entre os dois valores for muito maior que o valor esperado para realização de todas as atividades da rota do trem, então a entidade passará por um módulo *Assign*, que fará a ativação da variável indicando erro (conferindo a esta o valor de uma unidade). Como o módulo *Create* está configurado para a leitura diariamente, a varificação é feita todos os dias da simulação. Se não houver problemas durante o processo, o valor da variável de verificação será sempre zero. Caso alguma entidade permaneça parada por muito tempo em qualquer ponto da lógica, a variável irá indicar o problema, recebendo o valor um.

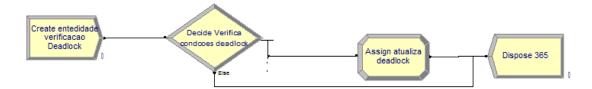


Figura 18 - Lógica responsável pela identificação de erros de lógica. Fonte: Autora, 2017

A utilidade desta lógica fica clara quando constatado o fato de que vários erros cometidos na construção do modelo, de fácil correção, provocam um comportamento errado

das entidades. Esses erros podem ser, por exemplo, um cadastro incorreto de valor de tempo no módulo *Delay* (tanto na expressão quanto na unidade), ou a não desocupação de um recurso anteriormente ocupado.

## 3.4. VALIDAÇÃO, EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE

As três últimas etapas apesar de apresentarem características distintas, por natureza das atividades e resultados a serem apresentados, foram reunidas em um único tópico. Nesta etapa, com o modelo de simulação pronto, foram rodados diversos cenários usados tanto na validação quanto em análise de sensibilidade.

A validação do modelo de simulação consiste na comparação dos resultados simulados com informações reais. Para isso, é importante estar preparado para críticas tanto em relação à modelagem (identificação de razões para variações maiores dos que as esperadas) quanto em relação aos dados coletados (ter ciência das fontes dos dados e forma de medição auxilia no entendimento de quão precisas e concretas são as informações que servirão de base para validação).

Os parâmetros usados para validação do modelo foram tempo de fila, tempo de permanência e demanda (principais dados de saída).

É importante destacar que as informações de demanda, tempos e indicadores de resultados mostrados nesse trabalho foram alterados por solicitação da companhia de forma a manter o sigilo dos dados e portanto, não correspondem à realidade.

Para validação de fila não foram coletados dados reais para comparação com os valores obtidos com a simulação. Isso porque as informações de fila que a companhia possui não são compatíveis com a configuração do modelo de simulação, assim a tentativa de converter tais informações para dados que poderiam ser utilizados para validação, além de ser complexa, demandando muito tempo para construção, resultaria em uma base "poluída" e pouco confiável. A alternativa utilizada para validação de fila foi a análise de diversos cenários com demanda crescente. O cenário um se refere a demanda atual, do cenário dois ao cinco estão demandas dos próximos anos (que tendem a ser crescentes). Alguns dos cenários simulados estão apresentados abaixo. As demandas trabalhadas variam do menor para o maior patamar (cenário de um a cinco). Com esses valores é possível identificar a tendência de aumento no tempo de fila quando aumentado o número de trens circulando pelo pátio, um resultado coerente visto que todos os outros parâmetros foram mantidos fixos.

Um ponto de destaque na Tabela 2 são os altos valores de fila encontrados para o Cenário 5 de demanda, principalmente nos trechos Margem Direita – Margem Esquerda e Margem Esquerda – Margem Direita. Tais resultados demonstram que para a alta demanda o sistema entra em estado de saturação (existe uma quantidade muito grande de trens circula ndo, e levando em consideração a quantidade de recursos disponíveis, a fila gerada seria impraticável), o que significa que a empresa não teria condições de atender a demanda do Cenário 5. Outra informação obtida através da Tabela 2, é a maior sensibilidade dos trechos Margem Direita – Margem Esquerda e Margem Esquerda – Margem Direita em relação à demanda. Fica claro que é necessária uma maior preocupação com as cargas que circulam por esses trechos e com investimentos em aumento de capacidade nas regiões envolvidas.

	Tempo de Fila (horas)									
Cenário	Crema- MD	MD- Crema	Crema- ME	ME- Crema	MD-ME ME-MD		Abastecimento			
Cenário Demanda 1	1.2	1.5	2.1	1.8	2.7	2.0	0.6			
Cenário Demanda 2	1.1	1.4	2.9	2.5	3.8	3.1	1.0			
Cenário Demanda 3	1.4	1.8	4.1	3.6	5.4	4.6	1.6			
Cenário Demanda 4	2.0	2.6	5.8	5.3	9.8	9.4	2.7			
Cenário Demanda 5	3.6	3.3	8.9	8.5	610.4	475.3	6.6			

Tabela 2 - Resultados Usados na Validação de Fila do Modelo.

Fonte: Autora, 2017

Os dados de demanda foram validados a partir da observação dos resultados da simulação. Os valores da demanda são inseridos no modelo para que a simulação tenha início. Na validação, os valores de resposta foram verificados e é importante que o mesmo número apresentado na entrada esteja na saída. Isso indica que as entidades inicializadas de fato passaram por todas as lógicas modeladas e finalizaram a simulação.

Chegada (trens/dia)							Saída (trens/dia)							
Cenário	Crem a -MD	MD- Crem a	Crem a-ME	ME- Crem a	MD- ME	ME- MD	Abasteci mento	Crem a-MD	MD- Crem a	Crem a-ME	ME- Crem a	MD- ME	ME- MD	Abastecim ento
Cenário Demanda 1	4.5	4.6	2.2	2.4	20.6	20.3	7.4	4.5	4.6	2.2	2.4	20.6	20.3	6.9
Cenário Demanda 2	3.8	3.9	2.2	2.7	30.4	29.8	8.2	3.8	3.9	2.2	2.7	30.4	29.8	7.7
Cenário Demanda 3	3.3	3.5	2.4	2.9	35.6	34.9	8.8	3.3	3.5	2.4	2.9	35.6	34.9	8.3
Cenário Demanda 4	4.0	4.3	2.5	3.1	38.2	37.5	10.0	4.0	4.3	2.5	3.1	38.2	37.5	9.5
Cenário Demanda 5	4.9	5.4	2.7	3.4	39.9	38.2	10.4	4.9	5.4	2.7	3.4	39.0	37.4	9.5

Tabela 3 - Resultados Usados na Validação de Demanda do Modelo.

Fonte: Autora, 2017

Em alguns casos, os valores de chegada e saída de trens não serão iguais (como no caso da Tabela 3, no cenário de demanda 5). Como já mencionado, este é um indicador de um

cenário de saturação (o valor de fila encontrado para o mesmo cenário na Tabela 2 indica a mesma ocorrência). Nestas situações, pelo fato de a demanda ser muito superior à capacidade dos recursos modelados, ela não será atendida. Dessa forma, as entidades (ou trens) ficam estacionados em filas que não conseguem finalizar a simulação e acabam não sendo computadas na saída. Em cenários usados para validação, essa situação não pode acontecer, visto que a demanda inserida para validação é a realizada, logo já é sabido que a malha possui capacidade para transporte.

Para análise de capacidade foram configurados dois cenários a serem simulados como propostas para aumento de capacidade.

O cenário base (linhas 1 e 2 da Tabela 4) são referentes ao modelo de operação atual.

Os cenários mostrados nas linhas 3 e 4 consideram a melhoria de produtividade em uma das atividades realizadas no pátio, ou seja, através de investimento seria possível melhorar a operação diminuindo o tempo de atividade.

Os cenários referentes às linhas 5 e 7 consideram a não realização da atividade de abastecimento no pátio, dessa forma todos os fluxos de locomotivas direcionados para as linhas de abastecimento, que competia com os trens de carga, passaria a não existir.

Para as três situações, foram realizadas simulações para diversos patamares de demanda. Mas apenas os resultados correspondentes ao ano de menor demanda e ano de maior demanda podem ser vistos na Tabela 4.

Cenário	Permanência Terminal Cliente		To	otal (trens/dia	Tempo Médio de Fila (horas)	Permanência Média no Sistema (Incluindo		
	Crema- Pátio	Pátio- Crema	Chegada	Entrada	Saída	(Hordo)	SB's) (horas)	
BASE - Demanda Baixa	6.3	7.2	13.3	13.2	13.2	1.3	1.3	
BASE - Demanda Alta	6.3	7.6	15.8	15.7	15.7	1.7	1.3	
Cenário com Melhoria em Processo - Demanda Baixa	6.3	6.7	13.3	13.2	13.2	0.9	1.3	
Cenário com Melhoria em Processo - Demanda Alta	6.3	7.2	15.8	15.7	15.7	1.3	1.3	
Cenário Sem Abastecimento - Demanda Baixa	6.3	6.7	12.5	12.5	12.5	0.9	1.3	
Sem Abastecimento - Demanda Alta	6.3	7.2	14.9	14.9	14.9	1.3	1.3	

Tabela 4 - Resumo Resultados Análise de Sensibilidade. Fonte: Autora, 2017

A partir da observação da tabela é possível afirmar que ambas as alternativas de aumento de capacidade (cenário com melhoria em processo e cenário sem abastecimento) mostram resultados positivos (principalmente em ralação ao tempo de fila). No caso dos cenários sem abastecimento, o total de trens/dia é reduzido pelo fato de que os trens que se destinavam ao pátio para esta atividade foram suprimidos da modelagem.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir das simulações rodadas com o modelo construído e seus resultados é possível afirmar que a ferramenta desenvolvida foi capaz de fornecer informações que tem papel importante na tomada de decisão gerencial da companhia. Nesse ponto é importante ressaltar que o objetivo da simulação é indicar quantitativamente o potencial de projetos de melhoria operacional, e através dela foi possível identificar gargalos e oportunidades.

Os resultados desse estudo, especificamente, permitiram a avaliação de algumas propostas para aumento de capacidade do pátio. Com base nos dados de fila simulados e em análises de investimentos é possível tomar decisões bem respaldadas.

A principal resposta dada pelo trabalho, entretanto, foi a descoberta de um ponto de maior sensibilidade para o aumento de capacidade: a atividade de abastecimento para um patamar elevado de demanda mostra resultados de fila que podem inviabilizar a operação. Como o aumento da demanda é dado em função do tempo, com as informações obtidas foi possível afirmar em que ano a atividade passa a ser crítica no pátio. Uma resposta como esta é extremamente útil visto que o tempo necessário para a construção de um novo posto é muito grande, logo, a antecipação da verificação de problemas como esse tem grande importância.

Como próximo passo fica clara a necessidade de identificação de alternativas para postos de localização de postos de abastecimento, mas isso exige a expansão do modelo construído para que possa ser possível abranger outros pátios.

Como último ponto, é necessário reconhecer que a utilidade do modelo não termina com a conclusão deste trabalho. Além de poder ser usado em outros estudos que visam melhoria operacional e aumento de capacidade para o próprio pátio, o modelo pode ser expandido, como foi comentado no parágrafo anterior, passando a integrar análises mais complexas com inclusão de trechos de circulação e outros terminais, o que ressalta o fato de que o fim deste trabalho pode ser um começo para outras pesquisas.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, Stênio Marcos Santos; GUIMARÃES, Irce Fernandes Gomes; SCHUCHTER, Dauber de Castro. **Avaliação dos benefícios da aplicação da simulação, através do software Arena 10.0, em uma empresa de transporte ferroviário**. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, 2009.

BNDES. Situação atual e perspectivas da infraestrutura de transportes e da Logística do Brasil. Rio de Janeiro, 2012.

BORGES Renata Massoli; CAMELO, Gustavo Rossa; COELHO, Antônio Sérgio; SOUZA, Rosimeri Maria. **Teoria Das Filas E Da Simulação Aplicada Ao Embarque De Minério De Ferro E Manganês No Terminal Marítimo De Ponta Da Madeira**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. São Paulo, 2010.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C.. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 3 ed. São Paulo: Bravart.

CORREA, H. L.; CORREA, C. A.. Administração da Produção e Operações: Manufatura e Serviços – Uma abordagem estratégica. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2009.

COSTA, Felipe Schneider. **Aprendizagem Estrutural de Redes Bayesiana pele Método de Monte Carlo e Cadeias de Markov**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

CHRISPIM, Eduardo Mathiasi. **Análise Da Operação Ferroviária Do Porto Do Rio De Janeiro Utilizando Simulação De Eventos Discretos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2017.

FIRONI, Marcelo Moretti; FRANZENE Luiz Augusto G.; HIRAMATSU, Nágissa Yuri; MACHADO, Marcelo Neder. **Análise de Investimentos em Infra-Estrutura Ferroviária usando Simulação de Eventos Discretos: Estudo de Caso**. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2005.

FIRONI, Marcelo Moretti. **Análise Da Operação Ferroviária Do Porto Do Rio De Janeiro Utilizando Simulação De Eventos Discretos**. Dissertação (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

DOGLIATTI, Maria Cristina. MATTOS, Néli Maria Costa. **Teoria de Filas**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

SILVA, Leonardo Cezário Ferreira da. **Uma metodologia para avaliação de layout de pátios ferroviários de carga em suporte a estudos estratégicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Instituto Militar de Engenharia, 2015.

SILVA, Liane Márcia Freitas e; PINTO, Marcel de Gois; SUBRAMANIAN, Anand. **Utilizando o software Arena como ferramenta de apoio ao ensino em Engenharia de Produção**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007.

KELTON, W. DAVID; SADOWSKI Randall P.; SADOWSKI, Debora A.. Simulation With Arena. 2 ed. MacGrawHill, 2002.

LEAL, Paulo de Oliveira Coelho Dutra; SILVA, Pericles Nunes; TORRES, Henrique Lima; IGNACIO, Anibal Alberto Vilcapoma. **Utilização da Simulação de Monte Carlo para Estudar o Lead Time do Processo de Compras de uma Empresa de Economia Mista**. XXI Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru, 2014.

KRUEGER, H.. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Montreal, 1999.

PEREIRA, Leandro R.. Simulação De Uma Operação Ferroviária Em Um Trecho De Capacidade De Circulação Reduzida: Sistema Cremalheira MRS Logística S.A. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de Juiz de For a, 2014.

ROSARIO, Keivison Pinto do; AZEVEDO, Rafaela Lopes; SILVA, Bruna Gabrielly Teixeira da; MARCELINO, Darley Ferreira; OLIVEIRA, Daniele Pereira de. **Aplicação da Teoria de Filas e Simulação de Monte Carlo em Uma Rede de Farmácias Localizada no Município de Castanhal, Pará**. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 2015.

SAKURADA, Nelson; MIYAKE Dario Ikuo. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. São Paulo, 2009.

SILVA, Liane Márcia Freitas e; PINTO, Marcel de Gois; SUBRAMANIAN, Anand. **Utilizando o software Arena como ferramenta de apoio ao ensino em engenharia de produção**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2017.

SOUZA, Thiago Francioli. A Simulação a Eventos Discretos como ferramenta de apoio à Tomada de Decisão em empresas do ramo de mineração: Aplicação em uma unidade da Yamana Gold. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

VILAÇA, R. **Infraestrutura e competitivida de logística, Tecnologia online**. Disponível em http://www.tecnologistica.com.br/artigos/infraestrutura-e-competitividade-logistica/ Ano: 2013.

ZAMPIROLLI, Joyce Milanez; LIBERATO, Thiago Bronzoni; TEIXEIRA, Rafel Ruback. **Proposta de Modelo de Simulação para Análise de Capacidade de Ponto de Carregamento de Minério de Ferro em Malha Ferroviária**. VI Encontro Capixaba de Engenharia de Produção. Itacibá-Cariacica, 2016.

CONTRAIL. Disponível em: http://sinnapse.com.br/contrail. Acesso em: 27 dez. 2016. MRS Logística S/A. Disponível em: <a href="http://www.mrs.com.br">http://www.mrs.com.br</a>. Acesso em: 01 mar. 2017

## ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE



#### UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA FACULDADE DE ENGENHARIA

## Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, Ot de de 2017.

Angre Braga Jonnea 2015 45025

Angre Braga Jonnea 113 181 456 86

ASSINATURA CPF

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

Art 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

# ANEXO 2 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins, que Avant estagiário/funcionário da empresa MRS possui autorização para divulgar o nome da empresa MRS bem como dados não confidencia is na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Juiz de Fora, O'fde dez mbro de 2017

Responsável da Empresa (carimbo da empresa)

Sabrina Marcal Veloso MATR: 30023374



#### Termo de Autorização para publicação de trabalhos acadêmicos em formato eletrônico no Repositório Institucional Digital da Produção Científica e Intelectual da UFJF

1. Identificação da material bibliográfico: ( )Tese ( ) Dissertação								
	(*) TCC graduação ( ) TCC Especialização							
2. Identificação da Tese ou Disser	ação							
Autor: Aniane Brago Consec								
Autor: Anane Brago Wineso  Matrícula: 201549015 CPF: 4318145686 Telefone fixo32 988931824  Telefone celular: E-mail: anone jornes @ engenhoua upit be								
Nome de orientedor: Granda C	E-mail: anone processo engentiona upt bl							
Nome do orientador: <u>Finnancia Manguel de Mineral Negueiro</u> Título do trabalho: <u>simuloção</u> de Eventos <u>Disculos como Finamento de Estudo de</u>								
Conscided a medelegim de um notio provideno								
Co-orientador: The la du euc	a doc sonta 160m na Marcal Vilasa							
Membros da Banca: Thetre Av	gusto dos sonos/ Eduardo Pestono de Aguian / Innondo							
Honores de Almado alos	uino							
Pós Graduação Stricto Sensu (Me	trado e Doutorado)							
	Curso:							
Á de Combonimentos	D. 1							
Area do Connecimento:	Palavras-chave: Data da defesa://							
	Data da defesa://							
Pós-graduação Lato Sensu (espec	ılização)							
Curso de Pós-Graduação:								
i caracteristics	Palavras-chave: Data da defesa://							
Area do Conhecimento:	Palavras-chave:							
	Data da defesa://							
Graduação								
_	_ (ထ်							
Palayras obayos	Operacional natise de Copocidoole, knovia							
3 Agência (s) de femento (se hom	er):							
5. Agenera (5) de fomento (5e nou	,1).							
Universidade Federal de Juiz de Folicença pública <i>Creative Commons</i> Permite uso comercial de sua obra? Permitir alterações em sua obra?	) sim () sim, desde que outros compartilhem pela mesma licença (🗡) não reitos Autorais e/ou por outras leis aplicáveis. Qualquer uso da obra que não o							
4. Informação de acesso ao docum Liberação para publicação: (★) To A restrição (parcial ou total) poderá deste prazo suscita justificativa junt meses. Especifique o (s) arquivo(s)	der mantida por até um ano a partir da data de autorização da publicação. A extensão à PROPP ou PROGRAD. Em caso de publicação parcial, o embargo será de 12							
O referido autor:	Declaração de distribuição não-exclusiva							
licença. Declara também que a en qualquer pessoa ou entidade. b) Se o documento entregue contés	e é seu trabalho original e que detém o direito de conceder os direitos contidos nesta rega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do							
detentor dos direitos de autor para o	onceder à Universidade Federal de Juiz de Fora os direitos requeridos por esta licença							

e que esse material, cujos direitos são de terceiros, está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdos do

e) Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a UFJF, declara

Assinatura do autor Juane hango Johneco

que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo contrato ou acordo.

documento entregue.