

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA INTEGRADO PÁTIO-PORTO NA CADEIA DO
MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO SIMULAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARISA MATEDI ALVES

VITÓRIA

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA INTEGRADO PÁTIO-PORTO NA CADEIA DO
MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO SIMULAÇÃO**

MARISA MATEDI ALVES

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha.

VITÓRIA

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A474s Alves, Marisa, 1979-
 SISTEMA INTEGRADO PÁTIO-PORTO NA CADEIA DO
 MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO SIMULAÇÃO / Marisa
 Alves. - 2019.
 162 f. : il.

 Orientador: Helder Roberto de Oliveira Rocha.
 Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) -
 Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

 1. Cadeia de Logística integrada. 2. Transporte de carga. 3.
 Planejamento. 4. Minérios de ferro. 5. Simulação
 (Computadores). I. Rocha, Helder Roberto de Oliveira. II.
 Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
 Título.

CDU: 621.3

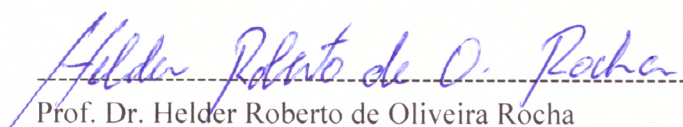
MARISA MATEDI ALVES

SISTEMA INTEGRADO PÁTIO-PORTO NA CADEIA DO MINÉRIO DE FERRO UTILIZANDO
SIMULAÇÃO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado, Vitória 18 de dezembro de 2019.


COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha

Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador



Prof.^a. Dra. Jussara Farias Fardin

Universidade Federal do Espírito Santo

Membro interno



Prof. Dr. José Leandro Félix Salles

Universidade Federal do Espírito Santo

Membro externo



Prof.^a. Dra. Marta Monteiro da Costa Cruz

Universidade Federal do Espírito Santo

Membro externo

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela paciência que me deu quando mais precisei dela. Em segundo lugar, à minha família pela força e entendimento quanto às minhas ausências, ao longo desse tempo de Mestrado.

Agradeço também, ao meu professor orientador Helder Roberto de Oliveira Rocha que sempre acreditou em mim. A professora Marta Monteiro da Costa Cruz pela dedicação durante a realização deste trabalho. Ao professor José Leandro Felix Salles pela coordenação do projeto e a professora Jussara Farias Fardin pelo pronto atendimento em participar da banca examinadora.

Aos meus colegas do curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica deixo o meu agradecimento, respeito e consideração pelo tempo que passamos juntos e pela dedicação ímpar por esse curso e a todos aqueles que direta e/ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Assim como, agradeço o apoio da Vale/Fapes edital n. 01/2015, termo de outorga 529/2016.

*“[...] Tudo isso requer a
habilidade de pensar
estrategicamente, traduzir as
estratégias em objetivos
específicos, coordenar
recursos e “pôr a mão na
massa” junto com os
trabalhadores em níveis
operacionais [...]”.*

(Bateman e Snell (1998))

*"Um certo dia chegamos à
conclusão do tempo perdido,
mas vemos o tempo ganho
nesse minuto de observação
e concluimos felizes que
nunca é tarde para
recomeçar. Por isso
recomeço com força
Hercúlea."*

(José Denti Filho)

Resumo

A indústria de mineração brasileira tem grande importância para a economia do país, sendo responsável por grande parte das exportações e pela geração de empregos. Com as mudanças ocorridas no cenário econômico mundial e crises que afetaram o Brasil, cresce a necessidade de utilização de tecnologias para guiar o planejamento e direcionar os investimentos em melhorias, de modo que as empresas possam aumentar a produtividade e eficiência e se tornarem mais competitivas. Desta forma, foi proposto desenvolver um modelo de simulação de eventos discretos de um sistema integrado pátio-porto, simplificado, com o objetivo de auxiliar nas análises de distribuição de lotes carregados de minério de ferro e pelota em pátio de estocagem e na atracação e carregamento de navios em nível tático, visando mostrar uma forma construtiva do projeto de modelagem, através de um passo-a-passo na criação de blocos para a implementação de simuladores. O simulador trata do transporte de minério de ferro desde a mina, passando pelos viradores de vagão, pátio de estocagem e porto, acrescentando as pelotas advindas das usinas, focando no empilhamento, no estoque, na recuperação e no carregamento dos produtos em navios nos berços. Foi utilizado o *software* Arena para a implementação do modelo de simulação, no qual foi possível analisar a ocupação dos pátios, avaliar a ocupação dos recursos disponíveis (viradores de vagão, usinas, empilhadeiras, recuperadoras, empilhadeiras/recuperadoras e carregadores de navios), levantar dados de filas e de número de navios, avaliar o carregamento dos navios e levantar o giro de estoque. O modelo desenvolvido considerou dados baseados em valores reais, para um tempo de simulação de 120 dias, cinco replicações, quatro cenários, que se diferenciam, basicamente, quanto à frequência de chegada dos tipos de navios (*panamax*, *capesize* e *valemax*) e as regras de atracação nos berços. Os resultados mostraram uma ocupação dos viradores de 53%, ocupação de pátio e usinas em torno de 80% e um giro de estoque, para cada cenário, em torno de 3,4 vezes. Além disso, diferentes estratégias de carregamento de navio são propostas com objetivo de aumentar a eficiência operacional no volume embarcado, na fila de navios e outros para o sistema pátio-porto.

Palavras-chave: Simulação, Sistema integrado pátio de estocagem-porto, Planejamento, Mineração.

Abstract

The Brazilian mining industry is of great importance for the country's economy, being responsible for a large part of exports and job creation. With the changes in the world economic scenario and crises that affected Brazil, there is a growing need to use technologies to guide planning and direct investments in improvements, so that companies can increase productivity and efficiency and become more competitive. In this way, it was proposed to develop a simulation model of discrete events for an integrated yard-port system, simplified, with the objective of assisting in the analysis of distribution of lots loaded with iron ore and pellets in the storage yard and in the berthing and loading of ships at the tactical level, aiming to show a constructive form of the modeling project, through a step-by-step in the creation of blocks for the implementation of simulators. The simulator deals with the transport of iron ore from the mine, through car dumpers, storage yard and port, adding pellets from the plants, focusing on stacking, stocking, retrieving and loading products on ships in the berths. Arena software was used to implement the simulation model, in which it was possible to analyze the occupation of the yards, assess the occupation of available resources (car dumpers, plants, stackers, reclaimers, stack-reclaimers and ship loaders), collect queue data and number of ships, assess ship loading and raise stock turnover. The model developed considered data based on real values, for a simulation time of 120 days, five replications, four scenarios, which differ, basically, as to the frequency of arrival of the types of ships (panamax, capesize and valemax) and the berthing rules. The results showed an occupancy of the car dumpers of 53%, occupation of the yard and plants around 80% and a stock turnover of stock, for each scenario, around 3.4 times. In addition, different ship loading strategies are proposed with the objective of increasing operational efficiency in the volume shipped, in the ship queue and others for the yard-port system.

Keywords: Simulation, Integrated Storage Yard-Port System, Planning, Mining.

Lista de Figuras

Figura 1 – Histórico do preço do minério de ferro (62% Fe).....	14
Figura 2 – Produção Mineral Brasileira (62% Fe).	14
Figura 3 – Sistema de transporte, com entradas e saídas.....	25
Figura 4 – Fluxograma básico de planejamento de transportes.....	27
Figura 5 – Formas para se estudar um sistema, segundo Law e Kelton (1991).	30
Figura 6 – Processo de decisão com modelos de simulação	36
Figura 7 – Processo de decisão com modelos de otimização	36
Figura 8 – Etapas do processo de modelagem e simulação.....	41
Figura 9 – Classificação dos modelos de simulação, segundo Law e Kelton (1991). ...	42
Figura 10 – Pátio de estocagem de minério de ferro no Porto de Tubarão (área nova) .	63
Figura 11 – Diagrama do modelo simplificado	65
Figura 12 – Pátio de estocagem de minério de ferro no Porto de Tubarão (área velha)	66
Figura 13 – Layout dos pátios e equipamentos da área nova.	68
Figura 14 – Layout dos pátios e equipamentos da área velha	68
Figura 15 – Píer 1, Norte e Sul e Píer 2.....	69
Figura 16 – Layout da área portuária.....	69
Figura 17 – Fluxograma referente à operação de estocar material no pátio.....	74
Figura 18 – Fluxograma referente à operação dos navios	76
Figura 19 – Fluxograma referente à operação de carregamento dos navios	78
Figura 20 – Ocupação acumulada dos pátios (tempo de <i>warm up</i>) - cenário 1 (1 replicação)	98
Figura 21 – Estoque acumulado dos pátios (tempo de <i>warm up</i>) - cenário 1 (1 replicação)	98
Figura 22 – Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios (tempo de <i>warm up</i>) – cenário 1 (1 replicação).....	99
Figura 23 – Layout de representação do cenário 1	99
Figura 24 - Ocupação acumulada dos pátios – cenário 1 (5 replicações).....	101
Figura 25 – Estoque acumulado dos pátios - cenário 1 (5 replicações)	101
Figura 26 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 1 (5 replicações).....	102
Figura 27 – Layout de representação do cenário 2	104
Figura 28 - Ocupação acumulada dos pátios – cenário 2 (5 replicações).....	105
Figura 29 - Estoque acumulado dos pátios - cenário 2 (5 replicações)	105
Figura 30 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 2 (5 replicações).....	106
Figura 31 – Layout de representação do cenário 3	108
Figura 32 - Ocupação acumulada dos pátios - cenário 3 (5 replicações)	109
Figura 33 - Estoque acumulado dos pátios - cenário 3 (5 replicações)	110
Figura 34 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 3 (5 replicações).....	110
Figura 35 – Layout de representação do cenário 4	112
Figura 36 - Ocupação acumulada dos pátios - cenário 4 (5 replicações)	113

Figura 37 - Estoque acumulado dos pátios - cenário 4 (5 replicações)	114
Figura 38 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 4 (5 replicações).....	114
Figura 39 – Ocupação dos pátios.....	117
Figura 40 – Ocupação das usinas e viradores.....	118
Figura 41 – Ocupação das empilhadeiras, recuperadoras, máquinas híbridas e carregadores.....	118
Figura 42 – Tempo médio em Fila	119
Figura 43 – Número de navios que desatracam e quantidade de navios em fila para atracar	120
Figura 44 – Estoque, empilhamento e recuperação dos pátios (100 dias).....	121
Figura 45 – Giro de estoque (100 dias)	121

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resumo dos principais trabalhos pesquisados e relacionados à simulação e transporte de carga.....	62
Tabela 2 – Capacidade dos pátios	66
Tabela 3 – Localização e a produtividade dos equipamentos	67
Tabela 4 – Produtividade dos equipamentos de empilhamento	82
Tabela 5 – Intervalo entre chegadas dos navios – cenários de 1 a 3	83
Tabela 6 – Intervalo entre chegadas dos navios – cenário 4	83
Tabela 7 – Capacidade dos navios.....	84
Tabela 8 – Produtividade dos carregadores e equipamentos que recuperam	85
Tabela 9 – Falha dos viradores	87
Tabela 10 – Dados de entrada do modelo.....	89
Tabela 11 – Resultado do cenário 1.....	100
Tabela 12 – Valores médios acumulados dos pátios - Cenário 1	103
Tabela 13 – Resultado do cenário 2.....	104
Tabela 14 - Valores médios acumulados dos pátios - Cenário 2.....	107
Tabela 15 – Resultado do cenário 3.....	108
Tabela 16 - Valores médios acumulados dos pátios - Cenário 3.....	111
Tabela 17 – Resultado do cenário 4.....	112
Tabela 18 - Valores médios acumulados dos pátios – Cenário 4	115

Lista de Siglas

MF	<i>Minério de Ferro</i>
PE	<i>Pelotas</i>
PO	<i>Pesquisa Operacional</i>
EFVM	<i>Estrada de Ferro Vitória a Minas</i>
CG	<i>Carga Geral</i>
OTM	<i>Operador de Transporte Multimodal</i>
TRIA	<i>Função Triangular ou Distribuição Triangular</i>
VV	<i>Virador de vagão</i>
SED	<i>Simulador de eventos discretos</i>
T ou TON.	<i>Toneladas</i>

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos.....	21
1.2	Estrutura da Dissertação	22
2	Referencial Teórico	23
2.1	Logística e Planejamento de Transportes	23
2.2	Modelagem de sistemas	29
2.2.1	Conceitos, características e benefícios da modelagem	29
2.2.2	Tipos de modelos	34
2.3	Simulação computacional	37
2.3.1	Conceitos, características e benefícios da simulação	37
2.3.2	Modelo de Simulação propriamente dito	41
2.3.2.1	Elementos de um Modelo de Simulação.....	43
2.3.3	Simulação de eventos discretos versus simulação contínua	45
2.3.4	Simulação usando o Arena.....	47
2.3.5	O método de Monte Carlo	49
2.3.5.1	Principais componentes do método de Monte Carlo	50
2.4	Trabalhos relacionados	51
2.4.1	Os trabalhos relacionados à simulação e transporte de carga	53
2.4.2	Os trabalhos relacionados ao uso combinado entre otimização e simulação	60
3	Caso Estudado	63
3.1	Pátio de estocagem.....	64
3.2	Sistema portuário.....	68
3.3	Princípios para a modelagem do problema	70
3.3.1	A operação de estocar material no pátio.....	72
3.3.2	A operação dos navios	74
3.3.3	A operação de carregamento dos navios.....	76
3.4	Limitações do sistema	78
3.5	Coleta de dados.....	80
3.5.1	Dados referentes à operação de estocar material no pátio	81
3.5.1.1	Taxa de produtividade das usinas	81

3.5.1.2	Taxa de produtividade dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento ...	81
3.5.1.3	Capacidade dos pátios.....	81
3.5.2	Dados referentes à operação dos navios	82
3.5.2.1	Tempo médio entre chegadas de navios	82
3.5.2.2	Tempo de criação dos navios	83
3.5.2.3	Demanda de lotes por rota	83
3.5.2.4	Capacidade dos navios	84
3.5.2.5	Berço para atracação por tipo de navio.....	84
3.5.3	Dados referentes à operação de carregamento dos navios	84
3.5.3.1	Taxa de produtividade dos carregadores e dos equipamentos responsáveis pela recuperação.....	85
3.5.4	Dados referentes à operação de chegada de lotes no pátio de Tubarão para descarga por rota	86
3.6	Cenários de simulação.....	87
3.7	Metodologia para construção do modelo de simulação	89
3.8	O modelo de simulação.....	91
3.9	Ferramentas e parâmetros de simulação	95
4	Resultados	97
4.1	Cenário 1	99
4.2	Cenário 2	103
4.3	Cenário 3	107
4.4	Cenário 4	111
4.5	Análise dos resultados.....	115
5	Conclusões e Recomendações.....	122
	Referências Bibliográficas.....	124
	Glossário.....	134
	Apêndice – Modelo de Simulação.....	135

1 Introdução

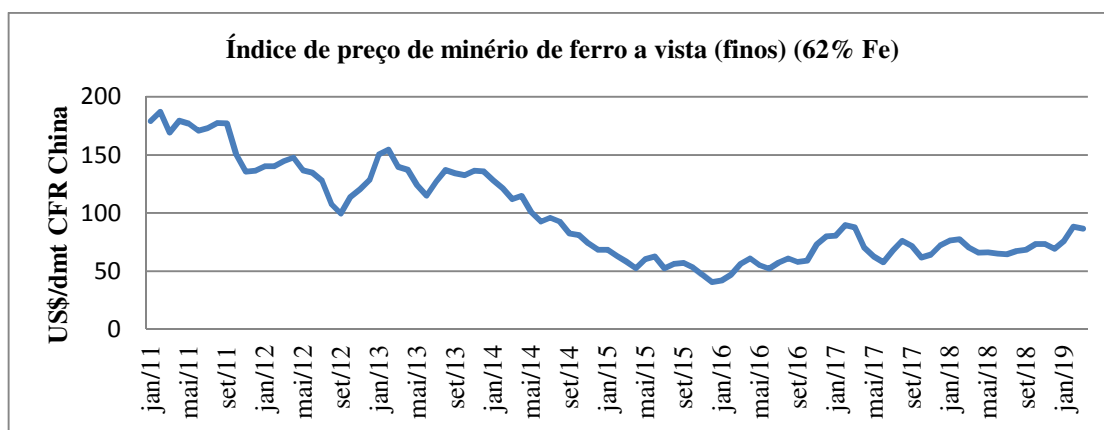
A indústria do minério tem um importante papel na economia brasileira, tanto para o abastecimento do mercado interno, quanto o mercado externo (exportações), sendo responsável por 1,4% do PIB, considerando que toda a atividade industrial brasileira representa uma porção de 23,8% do PIB. Além disso, a mineração corresponde a 13% de todas as exportações do país e também tem o papel de geração de empregos diretamente e indiretamente. Dentre os produtos minerais exportados no ano de 2017, por este seguimento, o minério de ferro (MF) é o principal, representando 62% dos minérios exportados (IBRAM, 2018).

Nos últimos anos, a economia mundial tem passado por várias mudanças e crises, e o Brasil não deixou de sofrer esses efeitos, seja por fatores externos ou internos. Segundo O Petróleo (2018), a China é o principal importador de minério de ferro brasileiro, com cerca de 61% das exportações deste mineral. Segundo Index Mundi (2018), a China teve redução na sua taxa de crescimento do PIB a partir de 2010, desacelerando não só a economia do próprio país, mas também a economia mundial e afetando diretamente as exportações de minério brasileiras.

Nesse contexto de instabilidade, a indústria do minério tem sido impactada pelos efeitos das mudanças no mercado mundial nos últimos anos, como pode ser visto no gráfico da Figura 1, que de acordo com Index Mundi (2019), percebe-se a queda no preço do minério de ferro, iniciada em 2014, alcançando valores muito baixos em 2016, e oscilando em um patamar mais baixo nos últimos anos, quando comparado aos anos anteriores. Nota-se que o preço que estava em torno de 130 US\$/dmt, tem oscilado em torno de 70 US\$/dmt.

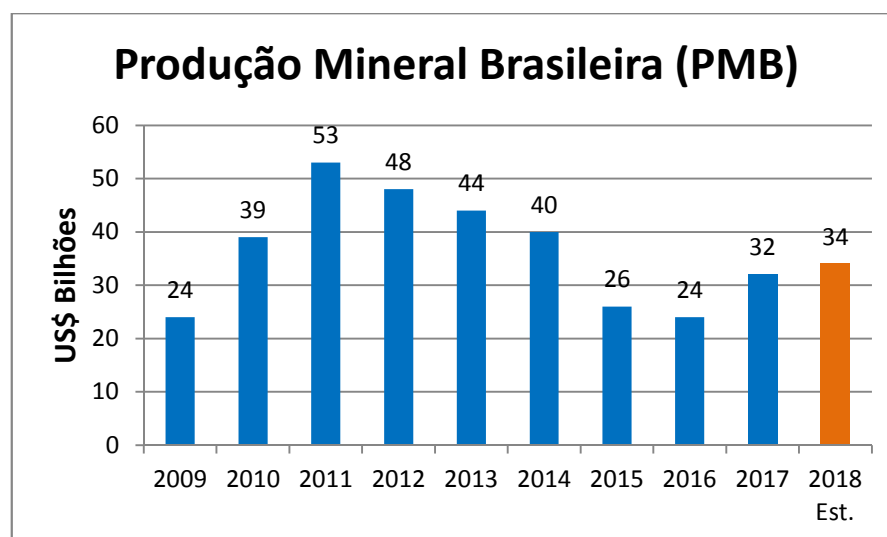
Também deve ser ressaltado o efeito na Produção Mineral Brasileira (PMB) que sofre um efeito similar ao preço do minério de ferro, como pode ser visto na Figura 2. Segundo IBRAM (2018), a produção, em bilhões de dólares americanos, caiu em 2015 e 2016, recuperando-se em 2017 e 2018, porém, assim como na Figura 1, mantém um patamar inferior ao apresentado em anos anteriores.

Figura 1 – Histórico do preço do minério de ferro (62% Fe).



Fonte: Index Mundi, (2019)

Figura 2 – Produção Mineral Brasileira (62% Fe).



Fonte: IBRAM, (2018)

Segundo Vieira e Cruz (2016), o Brasil perdeu a liderança do mercado mundial de exportação de minério de ferro para a Austrália em 2009. E, de acordo com DCI (2018) essa situação se mantém até hoje, apesar do aumento nos investimentos nos últimos anos. Nesse contexto de disputa pela liderança no mercado mundial de exportação de minério e a redução de preço e da PMB, destaca-se a necessidade de implementação de melhorias na estrutura existente, levando em consideração as possíveis limitações, e também de um melhor planejamento nos níveis estratégico, tático e operacional, de modo que as empresas consigam aumentar a produtividade, lucros e se tornarem mais competitivas mundialmente.

Além de todos os fatores e dados informados até o momento em relação ao mercado brasileiro e mundial de mineração, sabe-se que a China é o principal importador de

minério brasileiro, sendo responsável por mais da metade das importações. Além disso, através de visitas técnicas em uma empresa de mineração, localizada no ES-Brasil, verificou-se que o tempo total desde a produção até o desembarque do produto nos portos da China é de aproximadamente 45 dias. Nesse cenário de intensa competição, é de grande importância a verificação de gargalos e de possíveis melhorias e também a redução desse tempo.

A situação atual das rodovias e ferrovias do país influencia e muito para “O custo Brasil”. Para alavancar a competitividade da indústria extrativa mineral brasileira é determinante o investimento em infraestrutura, visto que as dificuldades no transporte do minério é um dos principais gargalos para o desenvolvimento (DCI, 2018).

O transporte é um fator decisivo para o crescimento econômico de qualquer país, portanto um sistema de transporte de mercadorias ou serviços, bem integrado em todas as suas etapas da cadeia produtiva, a que pertence, desde a origem do item até o seu destino, deve ser alcançado pela indústria do minério, que tem nos modais ferroviário e marítimo alguns dos seus grandes alicerces.

DCI (2018) complementa, afirmando que o setor minerador realmente se beneficiaria com questões fiscais, logísticas e ambientais. Portanto, um dos principais entraves para o desenvolvimento da mineração no Brasil são problemas durante a mobilidade da carga, aqui podemos citar, desde a mina, passando pela ferrovia (sistema ferroviário por completo), pátio de estocagem dos produtos do MF e o porto.

De acordo com Silveira (2017) existem diversas combinações de modais possíveis, como exemplo a junção rodo-ferro-hidroviária, que une os três modais rodoviário, ferroviário e hidroviário. Ainda segundo Silveira (2017), conforme citado por Martins *et. al.* (2014) a intermodalidade, como é basicamente chamada à combinação entre os modais, é utilizada em operações que envolvem exportação de produtos, tais como as *commodities*, uma vez que a operação ferroviária tem seu destino em um terminal de carga portuário, que embarca os produtos para os navios. Além de possuir terminais de carga, que são oriundas do modal rodoviário, principal integrador de transporte, devido a grande flexibilidade. Silveira (2017) de acordo com Ballou (2009) afirma que a flexibilidade do modal rodoviário é dada pela prestação de serviço porta-a-porta, sem a utilização de uma infraestrutura complexa quando comparado a outros modais.

Adicionalmente, pode-se verificar que o uso da intermodalidade é importante para a globalização, ou seja, uma facilitadora na internacionalização do mercado de *commodities*. Daí, ao se pensar no escoamento de produtos para mercados continentais lembra-se dos portos e aeroportos, que conforme Silveira (2017), segundo Ballou (2009) o transporte internacional tem nos modais marítimo e aéreo a sua grande participação por mais de 99% do peso total transportado.

Silveira (2017) confirma que o transporte intermodal é motivado, também, do ponto de vista da redução de custos, pois faz uso das principais vantagens de cada meio de transporte em cada segmento do percurso, baixando os custos inerentes ao transporte. De acordo com Silveira (2017), conforme Batalha (2008), os modais de transporte ferroviário e hidroviário são os mais econômicos, em termos do transporte de grandes cargas. Porém a disponibilidade e flexibilidade são alguns dos entraves desses modais, o que os leva a serem combinados a outros meios de transporte para o escoamento da produção em trajetos que não estão disponíveis.

Em contrapartida, o transporte ferroviário apresenta como outras desvantagens, o tempo de entrega (baixa velocidade) e a necessidade de uma infraestrutura de alto custo e de material rodante (locomotivas e vagões), mas com a vantagem da sua economia de escala, devido à capacidade de movimentação, assim, os altos custos são compensados, quando comparados ao rodoviário.

O transporte aquaviário, com ênfase ao transporte marítimo (transoceânico) para longas distâncias e sem se importar quanto ao tempo de trajeto são boas vantagens, quando escolhidos como o meio de transporte para graneis, quando se fala de internacionalização de mercadorias. Entretanto, a disponibilidade (de rotas) e a entrega do produto até o local do cliente final são principais desvantagens, portanto, assim como a ferrovia, o marítimo também é combinado a outros modais de maior flexibilidade e disponibilidade.

Além do transporte intermodal, o multimodal também visa à melhoria da qualidade e da produtividade dos transportes e tem como diferenças básicas: o documento de transporte e a responsabilidade da carga (PORTOGENTE, 2016). Na prática, no Brasil é comumente realizada a intermodalidade (COMEXBLOG.COM, 2019; PORTOGENTE, 2016). Mesmo o termo Transporte Intermodal não possuir mais base jurídica, pois a Lei 6.288/75, que o definiu, foi revogada pela Lei 9.611/98, a qual definiu o conceito de Transporte Multimodal, e ainda o termo não foi substituído pelo de Transporte

Multimodal, pois há diferenças conceituais que perduram entre os dois termos (ANTT, 2019).

Uma revisão bibliográfica foi feita por Juliá (2010), abordando diversas pesquisas, entre os anos de 1998 e 2008, que utilizaram simulação, otimização e outros algoritmos para resolver problemas relacionados à logística e transporte de diferentes produtos. Cada artigo utilizava diferentes técnicas com foco nas diferentes áreas da cadeia de transporte de *commodities*, sendo que o autor em questão desenvolveu sua pesquisa com o objetivo de construir uma ferramenta de simulação que auxiliasse no dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto da indústria de minério de ferro, similar ao presente trabalho, porém a pesquisa, em questão, apresenta uma “didática”, chamada de *as built*, utilizada para a construção passo-a-passo de um esquema de modelagem computacional de uma cadeia produtiva do MF, com o mesmo foco, de Juliá (2010), ou seja, sistema integrado do pátio de estocagem-porto.

A busca por ferramentas que auxiliem no planejamento e implementação de melhorias é de grande relevância. Uma dessas ferramentas é a simulação computacional, amplamente utilizada para este propósito. Contudo, esta ferramenta deve ser aplicada de maneira correta, seguindo uma metodologia para evitar erros e para que esta possibilite o desenvolvimento de um modelo próximo ao real, (BANKS *et. al.*, 2009; PEDGEN *et. al.*, 1995).

Através da simulação, pode-se construir uma representação do sistema real, em um ambiente virtual, onde a situação atual do sistema pode ser examinada de maneira plausível, a fim de identificar: falhas, gargalos e limitações. Além disso, também podem ser feitas projeções, análises de cenários com o objetivo de verificar a viabilidade e os possíveis ganhos, em caso de implementação de melhorias, de maneira segura e prática. A simulação também pode ser utilizada em conjunto com técnicas de otimização para construir soluções e melhorias baseadas nos cenários atuais das empresas.

Trabalhos mais recentes também utilizaram a simulação como ferramenta para analisar a cadeia de minério de ferro, como por exemplo, Vieira e Cruz (2016) e Vieira (2018), que analisaram cenários na distribuição de lotes de minério na rota ferroviária-porto, com o objetivo de auxiliar as equipes no planejamento tático da ferrovia.

Em Zampirolli (2016) e Zampirolli (2017), o objeto de estudo foi desde as minas até a área portuária da cadeia do minério, incluindo aspectos do pátio de estocagem, assim como em Juliá (2010), quanto ao pátio e porto, porém em mineradoras diferentes. A

autora utilizou a simulação de eventos discretos para analisar a capacidade dos equipamentos instalados no pátio, a alocação de materiais nos pátios e outros elementos relacionados ao porto para verificar a possibilidade de aumentar a capacidade de embarque de minério no terminal portuário.

Os autores citados utilizaram a simulação de eventos discretos como técnica para a resolução de problemas vinculados ao planejamento da cadeia logística do minério de ferro. Foi utilizado o *software* Arena, cujas aplicações são descritas em Kelton *et al.* (2003), Kelton *et al.* (2014). e Prado (2014). O Arena é uma ferramenta para construção de modelos de simulação, que utiliza um ambiente gráfico e fluxogramas para a reprodução dos sistemas.

Em meio às publicações dos trabalhos citados anteriormente, pode-se abordar aqui a importância de se incluir a logística, também, dentro de processos de negócios, como é mencionado por Baldam *et al.* (2007), que afirma, ainda, que a logística é um processo operacional, ou seja, destinado a desenvolver a atividade fim da empresa. Assim sendo, o Gerenciamento de Processos de Negócios (BPM) é central para as transformações contemporâneas na gestão das companhias ou organizações, apoiando-se em diversos simuladores poderosos (por exemplo: *iThink* e Arena), para a área de BPM (BALDAM *et al.*, 2007).

Muitos autores também estudaram o comportamento operacional, planejamento e outros, em pátios de estocagem e portos diversos. Com isso, verifica-se a importância do tipo de estudo para o problema de pesquisa a ser apresentado. Fernandes (2001) e Babu *et al.* (2015) estudaram, como área de estudo o pátio de estocagem e porto, porém para terminal de contêineres e veículos, assemelhando-se ao estudo de Juliá (2010); e planejamento do pátio, agendamento de navios e trens do terminal portuário de carvão, respectivamente.

Já os trabalhos de Molck (2002), Ago *et al.* (2007), Boland *et al.* (2012) e Vianen *et al.* (2012) concentraram-se no pátio de estocagem, cada autor com a sua ênfase e tipo de terminal portuário, desde a: alocação ótima de produtos de MF; a alocação de produtos, incluindo o roteamento de materiais por correias transportadoras em indústria siderúrgica; planejamento do pátio de carvão para alcançar alta produtividade e o dimensionamento via cálculo do fator de armazenamento de carvão e MF, respectivamente. Fioroni *et al.* (2010) foca no porto, pois estuda o sistema de carregamento do MF, ao passo do equilíbrio entre chegada de produtos e navios.

Focando em ferrovia, pátio e porto estão os estudos de Netto *et. al.* (2015) e Menezes (2016). Netto *et. al.* (2015) desenvolve uma metodologia para determinar a capacidade de um porto de MF, através de níveis de serviço. Já Menezes (2016) em sua tese formula de forma integrada os problemas de planejamento, sequenciamento e alocação. Zhen (2016) e Servare Junior *et. al.* (2018) trata do pátio e porto, com a movimentação do MF dentro do sistema de armazenamento e o abastecimento dos navios.

Segundo Juliá (2010) um terminal de exportação de MF deve ser altamente especializado, com alta produtividade em seus serviços prestados, em termos de toneladas e tipo de MF movimentado por hora, e apresentar baixo custo, por se tratar de uma *commodity*. Além disso, o autor chama a atenção ao fato da empresa, caso estudado, estar geograficamente distante dos principais centros consumidores, gerando assim uma desvantagem competitiva, ao se pensar no custo do frete.

Diante do contexto do cenário mundial da competitividade, ao mesmo tempo de incertezas quanto ao preço do minério e o futuro desta *commodity*, em se tratando de um país como o Brasil que é muito dependente da exportação do MF, motiva a operação de análise integrada do sistema pátio-porto, desde a chegada do material produzido via correias transportadoras, sendo estocado no pátio até o embarque nos navios.

Adiciona-se, a tudo o que foi exposto até aqui, o levantamento bibliográfico realizado, com foco, ao dimensionamento e a operacionalidade de sistemas de pátio de estocagem e porto. Sejam esses sistemas integrados para o bom escoamento do produto, ou não, sendo analisados de forma separada, porém mostrando a importância de cada uma das partes, tornou-se possível verificar oportunidades de contribuição através dos estudos discutidos e questões levantadas em função da grande relevância do problema.

Sendo assim, os principais motivadores para a realização deste trabalho de pesquisa estão na importância do transporte marítimo para o Brasil, país de proporções continentais; a grande dependência do Brasil na exportação do MF; a importância de um estudo logístico integrado entre pátio e porto dentro da necessidade de crescimento econômico do país, que perdeu a liderança de exportador e quedas nos preços do minério e a facilidade em elaborar estudos complexos e de precisão através de *softwares* de simulação que integram rotinas que permitam previsões de processos futuros.

Além do mais, foi verificada uma lacuna em potencial dentro dos vários estudos para a empresa do caso estudado. Buscou-se na literatura trabalhos de simulação computacionais de eventos discretos, que descrevem o passo-a-passo de “protótipos” relacionados à cadeia produtiva do MF, ou que estejam relacionados mais diretamente ao caso aqui estudado. Sendo um desses trabalhos, o de Vieira (2018), cuja empresa estudada coincide com a do presente trabalho, para a criação de uma ferramenta para o planejamento, desde a mina até a descarga dos lotes de MF por rota de destino nos viradores de vagão, antes da entrada do pátio de estocagem.

E, outros trabalhos, para a criação de uma ferramenta para o planejamento das etapas seguintes, que são etapas integradas de pátio de estocagem-porto, cujos trabalhos mais relacionados estão em Juliá (2010), Netto (2015) e em Zampirolli (2016), que utilizam simulação dentro do sistema pátio-porto. O primeiro não apresenta a mesma empresa deste estudo de caso, mas contém um passo-a-passo para a modelagem, o segundo e o terceiro apresentam a mesma empresa do trabalho em questão, porém o segundo não expõe a modelagem computacional, ou “protótipo”, com seus pormenores, além de ser para um estudo de caso diferente, e o terceiro não mostra o *as built* do “protótipo” modelado, apesar do caso estudado ser similar.

Portanto, o trabalho proposto é uma continuidade do estudo de Vieira (2018), dando sequência à cadeia do MF modelada por ela, uma vez que Vieira (2018) simula o percurso dos lotes de MF desde a mina até a descarga nos viradores de vagão, ou seja, não adentra ao sistema integrado pátio de estocagem-porto, que se relaciona aos trabalhos de Juliá (2010), Netto (2015) e Zampirolli (2016). Assim, o estudo de caso em questão dá seguimento ao percurso dos lotes de MF, citado anteriormente, passando pelo pátio de estocagem até chegar ao porto (navios). Parte dos lotes de MF passa pelas usinas de pelotização, transformando-se em lotes de PE e após seguem ao sistema integrado pátio de estocagem-porto.

Dessa forma, uma oportunidade de criar uma extensão do planejamento no contexto de importância do processo logístico dentro do universo de gestão organizacional, a fim de antecipar análises de problemas reais da cadeia do minério de ferro do sistema integrado pátio-porto, através da demonstração do *as built* de um sistema real de pátio-porto, mostrou-se desafiador para o desenvolvimento da pesquisa inserida no sistema pátio-porto da empresa alvo deste estudo, a Vale.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta dissertação foi desenvolver uma ferramenta de simulação de eventos discretos complementar ao estudo de Vieira (2018), ao dar prosseguimento ao percurso do MF dentro do contexto da cadeia produtiva modelada pela autora citada, de forma sucinta, desde a chegada dos lotes de MF e PE ao pátio de estocagem do porto até o navio, ou seja, após a etapa de descarga via viradores de vagões, de onde finalizou o escopo de Vieira (2018).

Além disso, visou fomentar uma forma mais construtiva possível, com a visão na forma *as built* do projeto de modelagem, ou melhor, como foi construído um simulador simplificado do terminal portuário de Tubarão.

De uma forma geral, o objetivo é analisar a ocupação de um sistema integrado pátio-porto da cadeia do minério de ferro e seus recursos, com o uso de simulação por eventos discretos.

1.1.2 Objetivos Específicos

De uma forma geral, o objetivo é analisar a ocupação de um sistema integrado pátio-porto da cadeia do minério de ferro e seus recursos, com o uso de simulação por eventos discretos.

- Desenvolver um modelo de simulação que represente a cadeia produtiva do MF, com o percurso do MF desde a mina, com a chegada de lotes de vagões carregados de MF ao pátio de estocagem, por fim embarcados em navios, tendo uma parcela desses lotes de MF transformados em PE.
- Analisar o planejamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro utilizando simulação, de acordo com ALVES *et. al.* (2018).
- Analisar a ocupação dos pátios de MF e PE em diferentes cenários de chegada de navios e regras de atracação nos píeres/berços.
- Avaliar a ocupação dos ativos disponíveis (viradores, usinas, máquinas empilhadeiras, máquinas recuperadoras, máquinas híbridas e carregadores de navios) em diferentes cenários.

- Levantar o tempo médio em fila de navios por berço, o número de navios que desatracam e a quantidade de navios em fila que aguardam para atracar em algum berço em diferentes cenários.
- Avaliar a eficiência do sistema, quanto ao carregamento dos navios.
- Levantar o giro de estoque em diferentes cenários.

Todos os dados necessários para o desenvolvimento do modelo de simulação foram adquiridos via pesquisa bibliográfica, levantamento de campo, internet e estimados, mas sempre como base os dados reais.

1.2 Estrutura da Dissertação

O trabalho está dividido em cinco capítulos:

O segundo capítulo apresenta o referencial teórico que abordou conceitos e aspectos da logística e do planejamento de transporte nos diferentes níveis: estratégico, tático e operacional. Destacam-se, também, os aspectos da modelagem e simulação computacional, e por fim, os trabalhos relacionados.

O terceiro capítulo descreve o estudo de caso, através da contextualização do problema e a metodologia de construção do modelo de simulação da cadeia logística integrada pátio-porto desenvolvido no contexto da aplicação ao Terminal Portuário de Tubarão, discutindo e exemplificando os recursos fornecidos pelo simulador.

O quarto capítulo é dedicado às análises e aplicações que o simulador realizou, segundo o planejamento tático, com uma duração de 120 dias, ou seja, quatro meses.

Por fim, o quinto capítulo contém as conclusões e recomendações obtidas a partir das contribuições propostas na dissertação e discussão dos resultados.

2 Referencial Teórico

O objetivo deste capítulo é descrever a teoria relacionada à metodologia usada para a confecção do modelo de simulação de algumas etapas da cadeia do minério de ferro. Na primeira seção serão apresentados os conceitos históricos de logística, passando pelos sistemas de transportes e os níveis de planejamento. Na segunda seção são detalhados os conceitos e importâncias de modelos matemáticos para a simplificação do mundo real. Na terceira seção são expostos conceitos e características da simulação, a classificação dos modelos de simulação, os elementos principais usados na modelagem e por fim a simulação usando o *software* Arena. Na última seção do capítulo são detalhados alguns trabalhos relacionados à pesquisa em questão.

2.1 Logística e Planejamento de Transportes

O conceito de logística evoluiu historicamente, ao mesmo passo, que a evolução da gestão industrial. Segundo Jamil *et al.* (2016), o desenvolvimento da logística passou por etapas, assim sendo, em 1960 o enfoque era na integração da logística interna com ênfase ao custo e a atividade sistêmica. A partir de 1980, o foco é no cliente, e a ênfase é na produtividade e nos custos de estoque. De acordo com o CLM – *Council of Logistical Management*, em 1986, a definição de logística passou a ser:

Logística é o processo de planejamento, implementação e controle da eficiência, do custo efetivo do fluxo e estocagem dos materiais, do inventário de materiais em processo de fabricação, das mercadorias acabadas e correspondentes informações, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com a finalidade de ajustar às necessidades do cliente (JAMIL *et al.*, 2016, p. 383).

Ainda, conforme Jamil *et al.* (2016) a última etapa, que corresponde a atualidade, é a “logística como elemento diferenciador”, pois é vista como forma de obter vantagem competitiva. Nota-se, também, o conceito de gerenciamento da cadeia de suprimentos (*supply chain management*). E, é nesse contexto de mudanças, que na década de 2000, o *Council of Logistical Management* - CLM, muda o nome da organização para o *Council of Supply Chain Management Professionals* – CSCMP, mais precisamente, segundo o Jornal do Comércio online (2004), a partir de 1º de janeiro de 2005. A definição de logística, conforme o novo conselho passa a ser:

A gestão logística é a parte da gestão da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla o fluxo eficiente e efetivo e reverte o fluxo e o armazenamento de bens, serviços e informações relacionadas entre o ponto

de origem e o ponto de consumo para atender aos requisitos dos clientes (CSCMP, 2018, *definitions and glossary*).

De acordo com Bateman e Snell (1998, p.466), “hoje em dia a logística é muitas vezes uma parte importante do programa estratégico de uma empresa e uma fonte potencial de vantagem competitiva”. Acrescenta-se ainda, que a logística é uma imensa massa de produtos de uma empresa, movendo-se por meio de caminhões, trens, aviões e navios. Com isso, a competição dos dias atuais, citada na Introdução, é baseada no tempo, o que coloca na logística o seu papel de importância frente a redução do tempo de manufatura e de apressar a entrega dos produtos até os clientes. A velocidade é essencial, pois a qualidade dos produtos já é atingida pelos grandes concorrentes, mas o tempo transformou-se em vantagem competitiva crucial para atingir a liderança do mercado (BATEMAN e SNELL, 1998).

Bateman e Snell (1998, p. 33) completam o assunto definindo o que é uma organização. “Uma organização é um sistema administrado, projetado e operado para atingir determinado conjunto de objetivos”. Para tanto, torna-se interessante e importante definir, também, o conceito de sistema, que de acordo com Kawamoto (2015, p. 15), “o sistema é definido como um conjunto de partes que se interagem de modo a atingir um determinado fim, de acordo com um plano ou princípio”. Ou, pode ser ainda definido, como “um conjunto de procedimentos, doutrinas, ideias ou princípios, logicamente ordenados e coesos com intenção de descrever, explicar ou dirigir o funcionamento de um todo”. Kawamoto (2015) também diz que há várias definições de sistema e o que difere é a ênfase que se dá ao que mais interessar ao procurar resolver um problema.

Ainda, de acordo com Kawamoto (2015), existem os principais elementos relacionados aos conceitos de sistema: o meio ambiente, entrada (recursos), saídas (resultados), retroalimentação (controle) e modelo. O meio ambiente de um sistema pode ser definido como todos os objetos que não fazem parte do sistema, porém exerce alguma influência sobre a sua operação, o qual envolve a definição da fronteira do sistema. Recursos ou insumos (entrada) podem ser: pessoas, materiais, informações, isto é, tudo aquilo que é fornecido ao sistema e que são processados, obtendo-se no final a saída (produtos ou resultados).

De acordo com as definições acima, Kawamoto (2015) denomina, para o caso específico do sistema de transporte, nota-se na Figura 3, como o conjunto de partes

(vias, veículos, terminais), que ao interagirem promovem o deslocamento de pessoas e mercadorias no espaço, conforme vontade dos usuários, regras estabelecidas e programação dos operadores.

Figura 3 – Sistema de transporte, com entradas e saídas.



Fonte: Adaptado de Kawamoto (2015)

Kawamoto (2015) afirma que em um sistema de transporte urbano o seu ambiente é constituído de atividades desenvolvidas, como por exemplo, nas indústrias. Os insumos (entradas do sistema) são consumidos na produção de transporte e as cargas a serem transportadas. A saída são as coisas transportadas e os subprodutos indesejáveis podem ser: o monóxido de carbono, os ruídos, etc..

Acrescentam-se, nesse contexto, os transportes, que segundo SEBRAE (2019) podem ser definidos como sendo um ramo de atividade econômica. A principal função é interligar a produção e o consumo de bens. Diante disso, um país socialmente desenvolvido tem sempre um sistema de movimentação de pessoas e bens eficientes, assim, percebe-se cada vez mais o papel relevante dos sistemas de transporte no desenvolvimento da humanidade, uma vez que o transporte influencia as atividades, como, por exemplo: industrial, comercial (interno e externo) e prestação de serviços.

No caso do transporte de cargas, em particular, Crainic e Laporte (1997) dizem que é uma das atividades de maior importância da atualidade, não apenas pela sua parcela referente ao produto nacional bruto de uma nação, mas também pelo aumento da influência que o transporte e a distribuição de mercadorias têm no desempenho de praticamente todos os outros ramos econômicos. A indústria do transporte de cargas, assim como todos os outros setores da economia devem atingir altos níveis de desempenho. Diminuir custos, aumentar os lucros, ao mesmo tempo em que compete em um mercado cada vez mais aberto e competitivo. Sendo assim, um aumento na

ênfase da qualidade, confiabilidade, tempo reduzido do serviço de transporte oferecido, as exigências do cliente, além do alto investimento requerido e planejamento de longo prazo para a implantação mostra o quanto é complexo o sistema, e o quanto se exige em termos de níveis de decisão. Além disso, o transporte de cargas tem de se adaptar a mudanças políticas, sociais, condições econômicas e tendências. E, diante dessa realidade, faz-se necessário o uso de métodos e ferramentas mais precisas e eficientes capazes de auxiliarem no planejamento e nos processos de tomada de decisão.

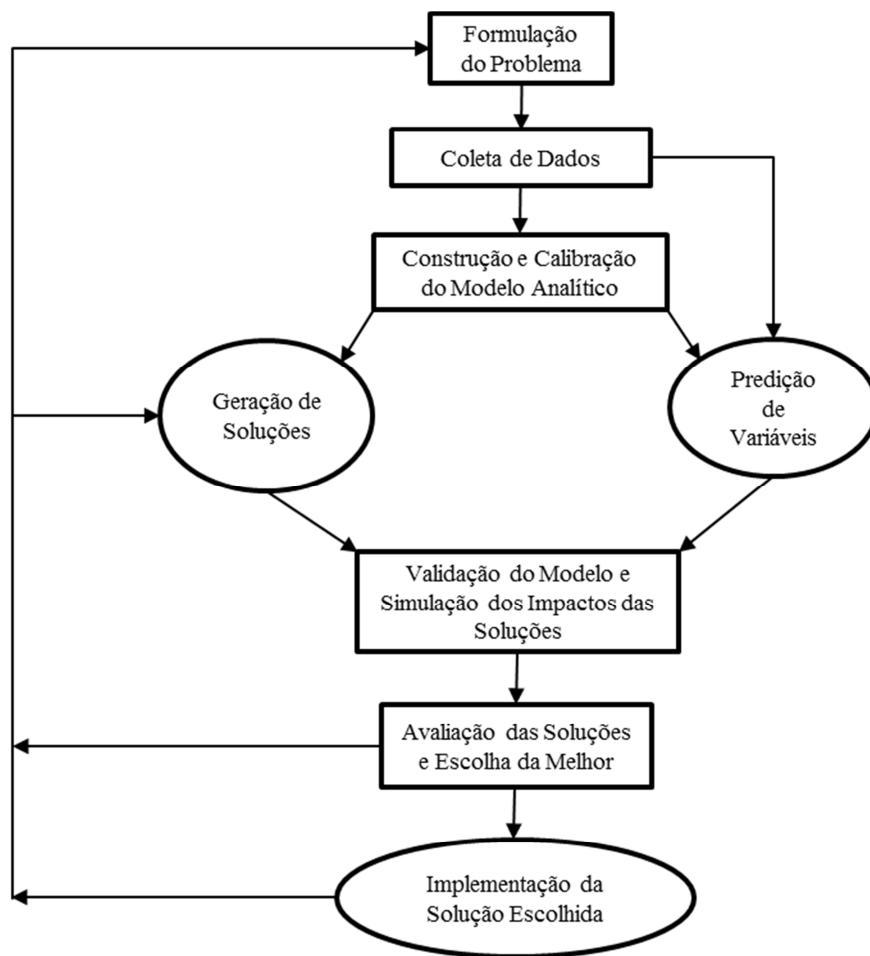
Campos (2013) diz, ainda, que um plano de transporte pode ser de longo, médio ou curto prazo e sua duração depende da urgência para a resolução do problema, dos recursos disponíveis e dos objetivos que se deseja alcançar. E, pode compreender as seguintes etapas:

- 1) Definição dos objetivos e prazos;
- 2) Diagnóstico dos sistemas de transportes;
- 3) Coleta de dados;
- 4) Escolha dos modelos a serem utilizados para avaliação da demanda futura;
- 5) Levantamento das alternativas de oferta de transporte;
- 6) Avaliação das alternativas de transporte;
- 7) Escolha da alternativa de transporte;
- 8) Desenvolvimento do plano de transporte acompanhado de um programa de financiamento;
- 9) Implementação das alternativas de acordo com um cronograma de desembolso de recursos;
- 10) Atualização dos procedimentos.

Os procedimentos de análise e previsão da demanda têm como propósito contribuir nas tomadas de decisão, quanto a mudanças que sejam necessárias no sistema de transporte. Essas mudanças podem estar relacionadas com medidas operacionais de curto prazo, através de ações imediatas, ou podem estar relacionadas com medidas não tão imediatas, que necessitam de um prazo maior, médio e longo prazo, para serem implementadas. Estas últimas medidas são os planos de médio e longo prazo, que por normalmente envolverem um elevado custo, requerem muita das vezes maiores recursos (CAMPOS, 2013).

Segue na Figura 4 um fluxograma básico de planejamento de transportes.

Figura 4 – Fluxograma básico de planejamento de transportes.



Fonte: Campos (2013)

De acordo com Marinov *et al.* (2013) o planejamento é uma atividade gerencial que pode facilitar a tomada de decisão e melhorar o desempenho do sistema. Segundo Bateman e Snell (1998, p.121), “o planejamento é o processo consciente e sistemático de tomar decisões sobre objetivos e atividades que uma pessoa, um grupo, uma unidade de trabalho ou uma organização buscarão no futuro”. Além disso, que o planejamento é uma função administrativa importante e que não se constitui a uma resposta casual a uma crise, mas sim ao esforço que tem um determinado propósito. Provê aos indivíduos e unidades de trabalho um roteiro claro que deve ser seguido em suas atividades futuras.

Ainda, segundo Crainic e Laporte (1997), Marinov *et al.* (2013) e Bateman e Snell (1998) existem três níveis de planejamento, que dependem do nível de decisão que se deseja tomar e são eles: o estratégico, o tático e o operacional.

De acordo com Crainic e Laporte (1997), Marinov *et al.* (2013) e Bateman e Snell (1998), o planejamento estratégico visa tomada de decisão para os objetivos e estratégias de longo prazo e assim envolve as partes principais da organização, isto é, os altos níveis de gestão. Acrescenta Bateman e Snell (1998), que as ações, ou exemplos de estratégias que a organização implementa devem ser direcionadas em áreas que satisfaçam as necessidades dos consumidores, portanto Crainic e Laporte (1997) e Marinov *et al.* (2013) identificam como exemplos dessas áreas citadas: a escolha de localização de terminais de carga e descarga, centros de distribuição, aquisição de equipamentos (ativos) diversos, como: vagões, locomotivas e guindastes. Deve-se ter cautela neste planejamento, pois altos investimentos e com prazos maiores podem impactar negativamente nas mudanças estruturais, se não forem vislumbrados com antecedência à sua preparação.

De acordo com Bateman e Snell (1998) o planejamento tático está relacionado às decisões de médio prazo de uma empresa, sendo responsável por traduzir os objetivos e planos estratégicos mais amplos, aplicando-os em áreas de atuação mais específicas e funcionais. Além disso, Crainic e Laporte (1997) e Marinov *et al.* (2013) propõem a utilização racional e eficiente dos recursos envolvidos. Como afirmado por Crainic e Laporte (1997), alguns exemplos de planejamento tático relacionados à área de transporte, são: rota de transporte, definição da disponibilidade e taxa de utilização dos ativos e controle de tráfego.

Crainic e Laporte (1997) dizem que o planejamento operacional é realizado pela gerência local em um ambiente dinâmico. O fator tempo é o mais importante, pois as decisões devem ser tomadas com maior urgência. De acordo com Marinov *et al.* (2013) é para planejamento de curto prazo, o que pode ser efetuado no mesmo dia da entrega do serviço. Neste nível de gestão, os planos, calendários e horários são programados em uma base diária, a fim de que o sistema forneça o serviço. Alguns exemplos, segundo Crainic e Laporte (1997), para este caso, que podem estar relacionados à área de transporte, são as especificidades dos equipamentos, através das manutenções programadas, a escala de mão-de-obra e despacho de veículos.

Essa divisão clássica mostra como as informações fluem entre os níveis de tomada de decisão e como são definidas as regras políticas. O nível estratégico estabelece as regras políticas gerais para as decisões a serem tomadas no nível tático, que determina

as regras e limites para o nível operacional, que opera o sistema de transporte. O fluxo de informações, também, segue uma rota inversa, fornecendo informações essenciais para o processo de tomada de decisão, segundo uma retroalimentação, para que o nível de planejamento imediatamente mais alto seja atualizado. Esta hierarquia impossibilita a formação de um modelo exclusivo para o planejamento de sistemas de transporte de cargas e, assim, cria possibilidades de formulações de modelos, que abordem problemas específicos em níveis específicos de tomada de decisão (CRAINIC E LAPORTE, 1997).

2.2 Modelagem de sistemas

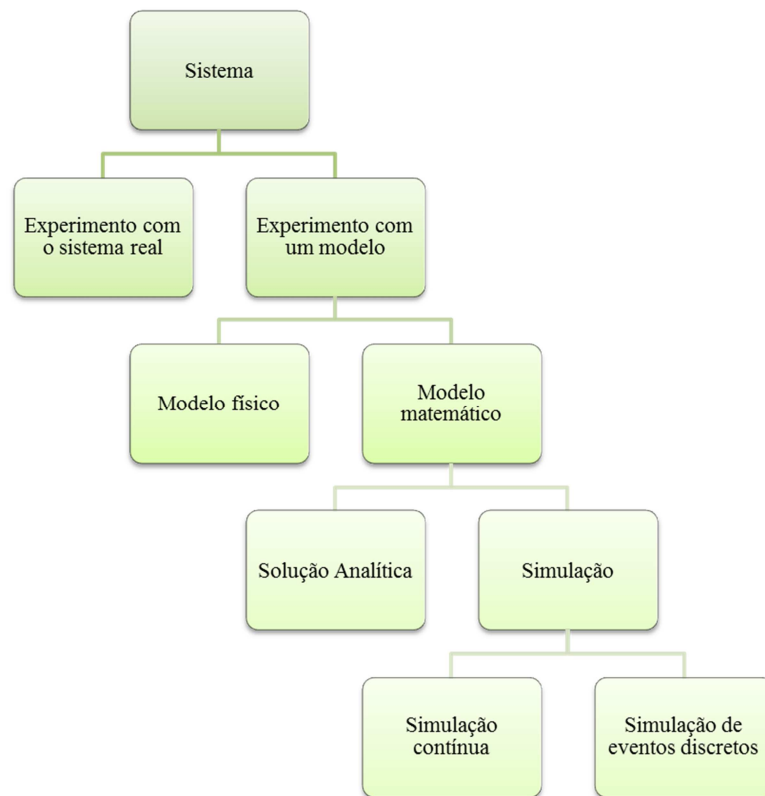
Com a finalidade de facilitar o entendimento sobre simulação computacional, faz-se necessário destacar alguns conceitos e características relevantes. Diante disso, apresentam-se descrições de algumas definições importantes adotadas neste estudo: sistemas, modelos, modelagem matemática, variáveis e tipos de modelos.

2.2.1 Conceitos, características e benefícios da modelagem

Os sistemas, via de regra, são representados por modelos. O modelo é uma abstração, ou melhor, uma representação mais simples de um sistema, para ser mais fácil a análise. Portanto, usam-se modelos, basicamente, por simplificar o sistema real, já que a sua complexidade, torna-se impossível de ser modelado com todas as características e aspectos da realidade. O modelo é construído através de observações e medidas da realidade, para assim serem experimentados. Ele deve ser confrontado constantemente com a realidade e assim adequar-se com os objetivos estabelecidos, para tal, esse confronto só será válido se os objetivos forem definidos em termos operacionais, que permitam uma verificação adequada dos resultados (KAWAMOTO, 2005).

Segundo Law e Kelton (1991), um sistema pode ser estudado sob as diferentes maneiras, que são abordadas no diagrama da Figura 5. O diagrama ilustra as diferentes maneiras possíveis para se desenvolver estudos de sistemas. A simulação abordada neste trabalho pode ser entendida, como uma das técnicas que se usa experimento com um modelo do sistema real, pois seria muito complexo realizar o experimento com o próprio sistema real.

Figura 5 – Formas para se estudar um sistema, segundo Law e Kelton (1991).



Fonte: Adaptada de Sakurada e Miyake (2009)

Como na maioria dos casos raramente é possível desenvolver experimento com o sistema real, pois se torna dispendioso e prejudicial para tal sistema. Por esses motivos, normalmente é necessária à construção de um modelo e estudá-lo, como um substituto do sistema atual. Ao usar um modelo é importante saber se ele reflete com precisão o sistema, referente aos propósitos das decisões que deverão ser tomadas, com isso se valida o modelo (LAW e KELTON, 1991).

É mencionado por Banks *et. al* (2009) que os modelos podem ser classificados, como: modelos matemáticos ou modelos físicos. Um modelo matemático usa notação simbólica e equações matemáticas, para tanto um modelo de simulação é um tipo específico de um modelo matemático de um sistema. Um modelo físico é uma versão maior ou menor de um objeto. Acrescentam Law e Kelton (1991) que os modelos físicos são imagens de um objeto, como: cabines de pilotagem usadas em treinamentos de pilotos ou simplesmente miniaturas de objetos, no entanto, tem a sua utilidade para estudar sistemas de engenharia ou gestão, não sendo geralmente de interesse em pesquisa operacional e análise de sistemas.

Segundo, Aguirre (2007, p.51) a “modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais”. Esse modelo é um análogo matemático que representa algumas das características analisadas em certo sistema. Há muitas técnicas de se obter modelos matemáticos, duas delas são: modelagem caixa branca (modelagem pela física ou natureza do processo) e a modelagem caixa preta (identificação de sistemas, caixa preta ou empírica). Na primeira, faz-se necessário o conhecimento do sistema, isto é, conhecer as relações matemáticas que representam os fenômenos envolvidos. A segunda modelagem usa técnicas alternativas para obter o modelo matemático. Essas técnicas caracterizam-se por ser necessário pouco ou nenhum conhecimento do sistema referido.

Aguirre (2007) acrescenta que as finalidades para o uso de um modelo são das mais diversas, ao longo da história, como por exemplo: explicar fenômenos em sistemas sociais, biomédicos, equipamentos, sistemas de monitoração e controle, predição, estimação de estados, simulação e outros. Portanto, no contexto de cada problema de modelagem deverá ser analisado o seu propósito.

De acordo com Law e Kelton (1991) a construção de um modelo matemático deve responder questões de interesse sobre o sistema representado. Se o modelo é simples a sua expressão matemática será possível trabalhar as quantidades para obter uma solução exata e analítica. Por exemplo, o cálculo do tempo da equação: $d=rt$, distância (d) e velocidade (r) são conhecidas, então o tempo (t) será muito simples, solução apenas com o papel e lápis, mas alguns casos obter a solução é muito complexa, exigindo recursos de computação.

Se uma solução analítica para um modelo matemático está disponível e computacionalmente torna-se eficiente, assim, faz-se eficiente também estudar o modelo dessa forma, sem o uso de simulação. Porém muitos modelos matemáticos são altamente complexos, impossibilitando uma solução analítica possível. Neste caso, o modelo deve ser estudado por meio de simulação, ou seja, exercendo numericamente o modelo para as entradas em questão, para ver como eles afetam as medidas de desempenho de saída (LAW E KELTON, 1991).

A simulação de eventos discretos a técnica de modelagem utilizada neste trabalho, que descreve um processo ou sistema, a fim de criar cenários e configurações que antes

não poderiam ser analisados no real. Segundo Banks *et. al* (2009) e Law e Kelton (1991), ela diz respeito à modelagem de um sistema à medida que ele evolui ao longo do tempo por uma representação na qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos separados no tempo, ou seja apenas em um conjunto discreto de pontos no tempo.

Law e Kelton (1991) acrescentam que em termos mais matemáticos, pode-se dizer que o sistema pode mudar em apenas um número contável de pontos no tempo. Esses pontos no tempo são aqueles em que um evento ocorre, onde um evento é definido como uma ocorrência instantânea que pode alterar o estado do sistema. Nos subitens 2.3.2.1 e 2.3.3 serão mais bem detalhadas algumas definições apresentadas neste parágrafo.

De acordo com Ragsdale (2011) o uso de modelos na solução de problemas e análise de decisão, não é de agora e muito menos está subordinado ao uso de computadores. Na última década, o uso de planilhas eletrônicas, para criar modelos, tem sido muito utilizado para analisar e avaliar alternativas de decisão. Esses modelos usam o computador para representar fenômenos do mundo real, através de implementações de lógicas e conjuntos matemáticos. Assim, denominou-se a “ciência da decisão” ou “pesquisa de operações”, ou melhor, a ciência da gestão, que usa computadores, estatísticas e matemáticas para resolver problemas do mundo real.

Dessa forma, torna-se mais barato examinar problemas de decisão usando um modelo, sendo mais versátil, pois não é preciso construir o real, para a análise das características específicas, que representam o objetivo requerido. Para complementar, quanto a uma das vantagens de se utilizar modelos, Vieira (2018, p.23), para o caso de ferrovia, exemplifica sobre “[...] os efeitos da utilização de uma linha férrea extra numa ferrovia singela não podem ser medidos se ela não existe, mas podem ser calculados e/ou mesmo simulados”.

É exposto por Hillier e Lieberman (2013) que para os problemas reais não existem somente um único modelo “correto”. Ao se testar o modelo, obtém-se uma sucessão de modelos cada vez mais fiéis em se tratando da representação do problema. O modelo matemático descreve um problema de forma bastante concisa, o que torna a estrutura do problema mais compreensível e ajuda a revelar relacionamentos de causa-efeito. Finalmente, para Hillier e Lieberman (2013), “um modelo matemático forma uma ponte

para o emprego de técnicas matemáticas e computadores potentes para analisar o problema”.

Assim sendo, de acordo com Andrade (2015) durante o processo de construção de um modelo, devem-se identificar todas as variáveis envolvidas (fatores envolvidos), as quais fornecem elementos para a análise e conclusão da situação que envolva uma decisão. Essas variáveis podem assumir diversos valores durante o desenvolvimento da solução. Elas podem ser classificadas em três categorias:

Variáveis de decisão

Aquelas que servirão de base para a tomada de decisão pelo gerente. Por exemplo, a variável como sendo a “taxa de retorno” de cada alternativa do projeto, a fim de obter o máximo retorno na aplicação de dinheiro em um determinado projeto.

Variáveis controláveis ou endógenas

É gerada pelo próprio modelo durante o processo de solução, sendo dependente dos dados fornecidos. No exemplo de aplicação de dinheiro em um projeto, a variável controlável pode ser o “valor final” do investimento.

Variáveis não controláveis ou exógenas

São os dados externos fornecidos ao modelo que devem ser considerados. Para o exemplo do investimento é a projeção de consumo do produto da fábrica. Um tipo especial para essas variáveis são as aleatórias ou estatísticas, que apresentam frequências ou probabilidades, referentes a seus valores de ocorrência. Para complementar, geralmente, todos os problemas de decisão apresentam algum grau de incerteza, que é representada por variáveis aleatórias.

Segundo Andrade (2015) a metodologia de PO é mais desenvolvida para a resolução de problemas que podem ser representados por modelos matemáticos. O modelo mais apropriado para cada contexto depende de fatores, como: a natureza matemática das relações entre as variáveis, os objetivos do encarregado da decisão, a extensão do controle sobre as variáveis de decisão e o nível de incerteza associado ao ambiente da decisão.

Mas, o modelo deve ser uma representação válida do problema, ou seja, deve ser capaz de prever ou não os efeitos à escolha de caminhos alternativos com uma precisão considerável para consentir uma decisão sensata. Para tal, deve-se obter uma correlação alta entre o valor previsto pelo modelo e o mundo real, assim realiza-se uma bateria de testes suficiente e por consequência alterações no modelo. A validação do modelo é realizada durante a construção do modelo matemático e iniciar por uma versão bem simples para atingir o modelo mais elaborado e complexo, que represente bem o problema real. Deve-se perseguir sempre a relação entre a precisão e a tratabilidade do modelo (HILLIER e LIEBERMAN, 2013).

2.2.2 Tipos de modelos

Segundo Aguirre (2007) existem vários tipos de modelos matemáticos. A seguir são apresentados alguns dos mais comuns:

Modelos estáticos e dinâmicos:

Os estáticos relacionam variáveis sem a sua dependência no tempo e são normalmente representados por equações algébricas. Os modelos dinâmicos são quando a dependência temporal é desejada e são compostos por equações diferenciais ou a diferenças (no caso discreto no tempo), podendo incluir equações algébricas. Ainda, conforme Aguirre (2007, p.57) “todo sistema real é, em última análise, dinâmico”. Portanto, para descrever um sistema por um modelo estático, torna-se viável quando variações no tempo não são relevantes, isto é, sistema real que apresenta a dinâmica muito rápida ou muito lenta, comparada a escala de tempo em questão.

Modelos discretos e contínuos

Referem-se ao tempo. Modelos dinâmicos contínuos são representados por equações diferenciais, que descrevem modelos que evoluem continuamente no tempo. Ao passo que, os modelos dinâmicos discretos no tempo são representados por equações a diferenças e o sistema evolui em tempos discretos.

Modelos determinísticos e estocásticos

A diferença entre esses dois modelos é a presença ou ausência de variáveis aleatórias. Os modelos estocásticos são os que lidam com fontes de incerteza presentes

nos sistemas reais e fazem o uso de variáveis e parâmetros aleatórios. Os modelos determinísticos apresentam variáveis e parâmetros determinísticos. O estocástico é uma aproximação de alguma função densidade de probabilidade condicional, que relaciona a saída a uma sequência de valores históricos, a saída como sendo, por exemplo, a esperança matemática de uma variável aleatória.

Segundo Paragon (2018) um modelo determinístico é aquele que não possui variáveis aleatórias, ou seja, um conjunto conhecido de dados de entrada gera-se um único conjunto de resultados de saída. O modelo estocástico é o que possui variáveis aleatórias (uma ou mais) como entrada, gerando saídas também aleatórias. É utilizada quando se tem pelo menos uma das características operacionais do sistema dada por uma função de probabilidade. Por esse motivo, as saídas de um modelo estocástico são estimativas das características do sistema original, real.

Normalmente, os modelos estocásticos são mais complexos que os determinísticos. Assim sendo, a desvantagem de se utilizar um simulador com dados determinísticos está no caso de se usar valores médios e com isso não observar ou considerar o impacto individual que cada valor provoca no sistema, e isso pode ser muito significativo. Por exemplo, o funcionamento de uma agência bancária (simulação estocástica) envolve variáveis aleatórias, como: intervalo entre chegadas e o tempo de duração dos serviços prestados. Logo, o número médio de clientes esperando e a duração média de espera de um cliente deve ser tratada como estimativas estatísticas das medidas reais do sistema (PARAGON, 2018).

Ao se usar os próprios dados coletados, obtém-se um melhor resultado, em contra partida será restrito apenas ao número de coletas. Quando os valores terminam, recomeça-se a simulação do primeiro valor, repetindo-se e gerando resultados bastante idênticos aos do período anterior. Outro inconveniente é que as ocorrências (como quebras ou sobrecargas) serão reproduzidas sempre da mesma forma, sem a variação que é observada no sistema real. Isto pode esconder situações que, na prática, ocorrem no sistema (PARAGON, 2018).

Andrade (2015) acrescenta que dependendo da natureza das variáveis que formam o modelo (descrito no subitem 2.2.1), podem-se classificá-los em duas categorias: modelos estocásticos ou probabilísticos e determinísticos. Para os casos estocásticos, apresentam variáveis aleatórias (de decisão, endógenas ou exógenas) e têm-se os

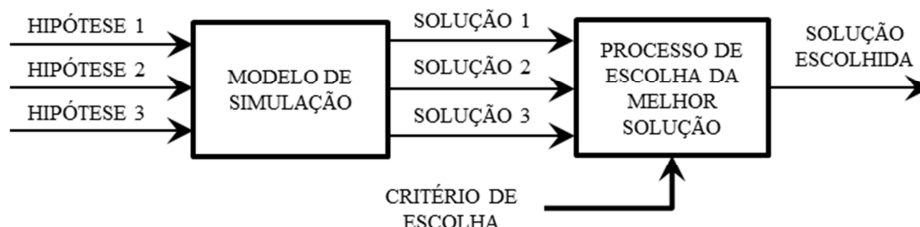
modelos de análise de risco (Simulação de Monte Carlo) e os modelos de congestionamento (Teoria das Filas). Os determinísticos tratam das variáveis que podem ser consideradas quanto ao conhecimento *a priori* e com certeza. Como toda decisão, refere-se a um estado futuro de um sistema, têm-se incertezas. Porém em casos como problemas de curto prazo, pode-se desprezar a incerteza. Nesse grupo estão os modelos de alocação de recursos (programação linear) e os modelos de programação de transporte.

Ainda de acordo com Andrade (2015) os modelos podem ser classificados quanto ao processo de resolução para a obtenção da solução, como:

Modelos de simulação e de otimização

Os modelos de simulação oferecem uma representação do mundo real, permitindo a geração e a análise de alternativas, antes mesmo de sua implementação. Dessa forma, flexibiliza-se a escolha da melhor ação. Assim, o gestor pode criar possibilidades futuras e testar alternativas, procurando responder a questões do tipo: “E se...?”, “O que acontecerá se...?”. O critério de escolha da melhor alternativa não está atrelado a estrutura do modelo, tal como representa a Figura 6.

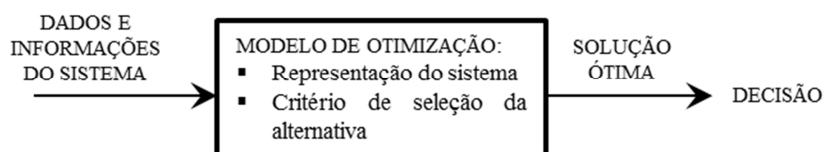
Figura 6 – Processo de decisão com modelos de simulação



Fonte: Andrade (2015)

A Figura 7 ilustra o processo para um modelo de otimização.

Figura 7 – Processo de decisão com modelos de otimização



Fonte: Andrade (2015)

O modelo de otimização não permite flexibilidade na escolha das alternativas, pois é estruturado para obter uma única “solução ótima” (alternativa ótima). A melhor alternativa é encontrada através de uma análise matemática, que é processada por algoritmos. A “solução ótima” é tomada como sugestão para a decisão real. Os modelos são mais especializados e são úteis em problemas, nos quais as variáveis podem assumir muitos valores ou apresentar variação a intervalos grandes.

2.3 Simulação computacional

Simulação pode ser classificada em duas categorias: não computacional e computacional (CHWIF *et. al.*, 2006). Sawicki *et. al.* (2015) definem ambas, como: a simulação não computacional utiliza um modelo físico para conseguir as informações sobre o comportamento do sistema em questão, por exemplo, um protótipo de um automóvel que pode ser incluído em uma câmara de ar para obter dados sobre sua aerodinâmica. A simulação computacional é um processo que descreve um sistema real através de um modelo computacional. Através deste modelo experimentos poderão ser feitos, para entender o comportamento e funcionamento do sistema.

Segundo Coelho e Coelho (2015) através de um modelo (equação matemática), pode-se responder a questões sobre o sistema sem a realização de experimentos e assim calcular ou decidir sobre o comportamento de tal sistema, sob determinadas condições operacionais. O uso do modelo para simulação do sistema caracteriza-se por ser de baixo custo e seguro para a experimentação do sistema. Todavia, a adequação dos resultados de simulação depende do modelo matemático do sistema.

2.3.1 Conceitos, características e benefícios da simulação

A simulação possui várias definições que podem ser encontradas em livros como Pedgen *et. al.* (1995), Banks *et. al.* (2009), Kelton *et. al.* (2003) e Prado (2014). De maneira geral, trata-se da construção de uma representação virtual de um processo real, utilizando equações, algoritmos ou construções gráficas (blocos e fluxogramas). Essa representação tem o objetivo de reproduzir o comportamento do processo ou sistema de maneira mais próxima possível do real. A essa representação geralmente é dado o nome de modelo computacional.

De acordo com Hillier e Liberman (2013), a simulação é uma técnica-chave de PO. Como o próprio nome indica, a pesquisa operacional compreende “pesquisa sobre operações”, cujo surgimento se deu na necessidade de se encontrar o melhor caminho (ou solução ótima) para solucionar problemas reais, na tomada de decisões, podendo ser de alta complexidade. Várias ferramentas de PO, como programação linear, programação dinâmica, teoria das filas e teoria do inventário se desenvolveram ao longo dos anos, mas a simulação se destaca diante as demais técnicas e é a mais utilizada.

Baldam *et. al.* (2007) diz que “simulação e otimização (*simulation/ optimization*) que permitem a comparação dos processos atuais com os modelos futuros, além de fazer a análise de risco. Ainda menciona-se, que a simulação é baseada na imitação de processos de um problema real, que se utiliza de fórmulas e suposições matemáticas. A operação do processo é observada sem ao menos estar ocorrendo na realidade. O intuito básico desses *softwares* é fazer previsões sobre o processo em questão, seja novo ou modificado, quanto aos gargalos, possíveis economias e impactos na operação futura.

Essa ferramenta tem ganhado popularidade, por ser: flexível, poderosa e intuitiva. Para tal, utiliza-se de um computador para simular (imitar) a operação de um processo ou sistema. Ela, em geral, é empregada para análises de risco em sistemas financeiros e também é muito usada para analisar sistemas estocásticos que operam indefinidamente (HILLIER e LIEBERMAN, 2013).

Para esses sistemas, Hillier e Lieberman (2013) mencionam que o computador gera e registra, aleatoriamente, as ocorrências dos vários eventos que comandam o sistema, como se eles operassem fisicamente. O uso do computador facilita o projeto, devido a sua velocidade, que fazem com que anos de operação sejam simulados em poucos segundos. Assim avaliar e comparar alternativas antes de escolher a de melhor desempenho operacional de um determinado projeto ou procedimento é obtido através da simulação.

Hillier e Lieberman (2013) acrescentam que, geralmente, a simulação é usada quando o sistema estocástico envolvido é muito complexo e torna-se desfavorável analisá-lo segundo modelos matemáticos (por exemplo, modelos de filas). Logo o uso da simulação normalmente é a única abordagem prática para o problema.

De acordo com Sawicki *et. al.* (2015, p. 7), “a simulação não prevê o futuro, mas pode prever o comportamento de um sistema com base em seus dados de entrada e em

um conjunto de regras”. Segundo Aalst (2015), infelizmente a simulação pode apresentar algumas desvantagens, como:

- Um estudo de simulação pode ser demorado, pois em algumas situações, para obter resultados confiáveis, requer tempo de simulação longo;
- A interpretação dos resultados obtidos pela simulação pode ser traiçoeira, pois os resultados devem representar a realidade;
- A simulação não fornece provas. Situações que podem acontecer na realidade podem não ser testemunhadas durante o experimento de simulação.

Banks *et.al.* (2009) menciona algumas outras possíveis desvantagens no uso da simulação:

- Requer um treinamento especial para a construção do modelo de simulação, pois é uma arte que requer tempo e experiência para a sua aprendizagem. Além disso, os modelos construídos por indivíduos diferentes podem ser semelhantes, mas improvável que sejam iguais;
- Complementando a segunda desvantagem mencionada por Aalst (2015), as saídas das simulações são na maioria das vezes aleatórias e costumam ter entradas também aleatórias, Por isso, pode ser difícil distinguir quando uma observação é o resultado de inter-relações do sistema ou de aleatoriedade, dificultando a interpretação dos resultados;
- Acrescenta-se ao primeiro item de Aalst (2015) que a modelagem e análise de simulação podem ser demoradas e caras. Economizar recursos para modelagem e análise pode resultar em um modelo ou análise, que não seja suficiente para a tarefa.

Mas, o autor diz que em defesa da simulação, essas três desvantagens, respectivamente, podem ser compensadas da seguinte forma:

- Os fornecedores de *software* de simulação têm desenvolvido ativamente pacotes, que contêm modelos, que precisam apenas de dados de entrada para sua operação;
- Muitos fornecedores de *software* de simulação desenvolveram recursos de análise de saída dentro de seus pacotes para realizar análises muito completas
- A simulação pode ser executada mais rapidamente hoje em dia, do que era ontem e será ainda mais rápida amanhã, isso devido aos avanços em *hardware* que permitem a rápida execução de cenários e devido aos avanços em pacotes de

simulação. Por exemplo, alguns *softwares* de simulação contêm construções para modelagem de manuseio de materiais que utilizam transportadores como empilhadeiras, transportadores e veículos guiados automaticamente.

Para Aalst (2015) não se deve fazer uso da simulação, caso o modelo analítico seja simples e puder ser usado. Ao compararem-se ambos os modelos, percebe-se que um modelo analítico é tipicamente menos detalhado e requer menos configurações de parâmetros. Vantagens reconhecidas da simulação são:

- A simulação é flexível. Qualquer cenário, por mais complexo que seja, pode ser investigado por meio dela;
- A simulação pode ser usada para responder a muitos questionamentos. É possível analisar: tempos de espera, taxas de utilização e porcentagens de falhas usando modelos;
- Simulação estimula a criatividade. A simulação desencadeia o “processamento do pensamento” sem restringir a solução de forma antecipada;
- A simulação é fácil de entender. Em contraste com muitos modelos analíticos, necessita-se de pouco conhecimento especializado para entender a técnica de análise utilizada. Assim, a simulação pode ser vista como eficaz na comunicação de ideias.

Acrescentando a essas vantagens, Pedgen *et. al.*(1995) descreve como a seguir:

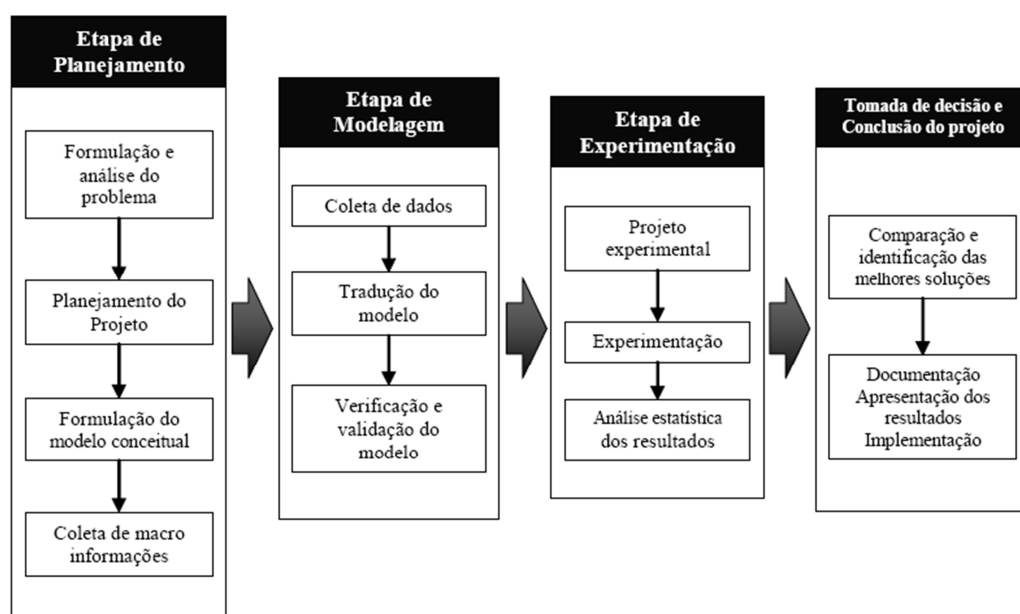
- A simulação permite explorar decisões, procedimentos operacionais, fluxos de informações e outras conclusões sem interromper as operações do sistema real;
- O tempo pode ser manipulado, comprimindo ou expandindo para permitir reproduzir os fenômenos sob investigação, de forma lenta ou acelerada, a fim de analisá-los melhor;
- Um estudo de simulação pode mostrar como o sistema opera, e não como os indivíduos pensam que ele opera.

Diante de todo o contexto descrito, a simulação possui várias funções, entre elas: descrever o comportamento de um sistema, o estudo e a análise de um processo, a construção de teorias e hipóteses, a prevenção ou planejamento de situações futuras e os efeitos de modificações inseridas no sistema. Dessa maneira, a simulação pode ser utilizada para identificar e resolver problemas, ou até para testar e implementar

melhorias em processos reais de maneira segura (PARAGON, 2018). As áreas de aplicação da simulação são diversas e uma das mais relevantes é a de logística, como no caso do presente trabalho.

De acordo com Freitas Filho (2008), os passos a serem percorridos na modelagem e simulação de um projeto são ilustrados através de etapas, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Etapas do processo de modelagem e simulação.



Fonte: Freitas Filho (2008)

Mas, é importante ressaltar a confiabilidade nos dados utilizados para obter os resultados de uma simulação, pois somente assim é que o modelo poderá imitar o sistema real. Dados inadequados, ou que não tenham peso para a situação real que se quer modelar podem gerar resultados inconclusivos para o sistema em estudo (VIEIRA, 2018). Pode ser acrescentada a essa discussão quanto à confiabilidade nos dados, o que está descrito no subitem 2.3.5, referente ao tamanho da amostra.

2.3.2 Modelo de Simulação propriamente dito

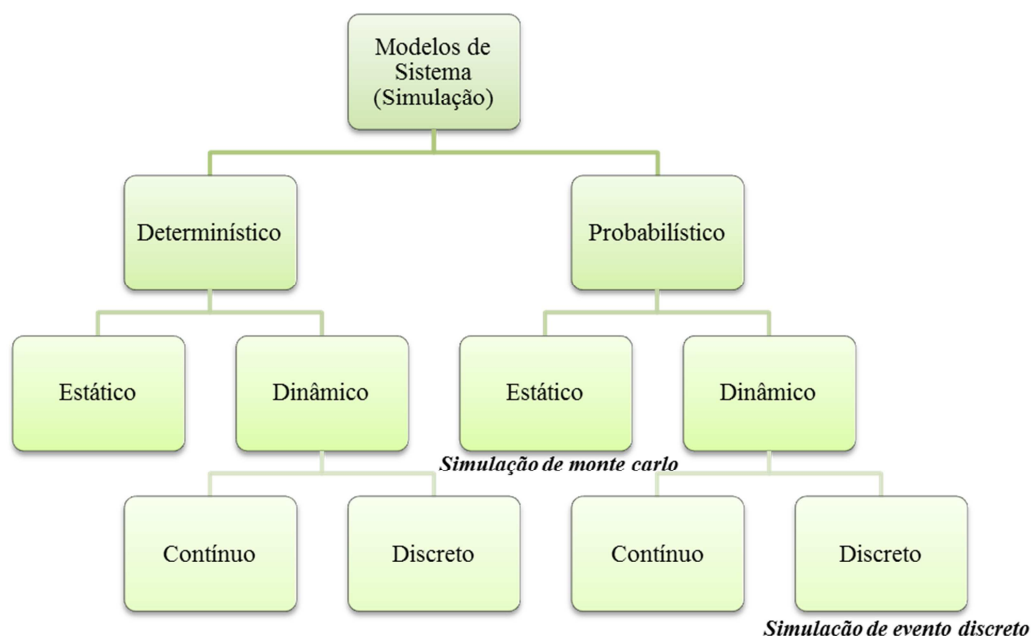
As simulações podem ser testadas na prática com equipes e equipamentos, que realmente serão envolvidos no processo futuro ou com o auxílio de programas de computadores. Mas, nem sempre é viável o uso de *softwares*, para os testes, obriga-se assim, o uso da modelagem, via simulação. A utilidade de um software de simulação é

muito grande, quando é possível estimar prazos, valores, tipos de eventos, frequência de ocorrência e etc. Para tal aplicação, em geral, os softwares independentes são os melhores, por exemplo, o Arena (BALDAM *et. al.*, 2007).

Hillier e Lieberman (2013, p.897) citam que “a simulação desempenha o mesmo papel em muitos estudos de PO”. Porém, o desempenho do sistema real é imitado com o uso de distribuições de probabilidades, que geram aleatoriamente diversos eventos que ocorrem no sistema. Para tal, um modelo de simulação sintetiza o sistema construindo-o, passo-a-passo, ou seja, componente por componente, evento por evento. Posteriormente, o modelo executa o sistema simulado, obtendo as estatísticas do desempenho resultante, sobre os diversos eventos gerados aleatoriamente para tal sistema. Isso tudo envolve um grande volume de dados, fazendo-se imprescindível o uso de um computador.

De acordo com Law e Kelton (1991) e Banks *et. al.* (2009), os modelos de simulação podem ser classificados, segundo três dimensões distintas, conforme os tipos de modelos, anteriormente descritos no subitem 2.2.2. Para ilustrar, segue o diagrama da Figura 9:

Figura 9 – Classificação dos modelos de simulação, segundo Law e Kelton (1991).



Fonte: Adaptada de Sawicki *et. al.* (2015)

Adicionalmente, Banks *et. al.* (2009) dizem que os modelos de simulação são analisados por métodos numéricos e não analíticos. Os métodos analíticos utilizam do

raciocínio dedutivo da matemática para resolver o modelo. Por exemplo, o cálculo diferencial pode ser usado para calcular a política de custo mínimo para alguns modelos de estoque. Os métodos numéricos empregam procedimentos computacionais para resolver modelos matemáticos. Os modelos de simulação que empregam os métodos numéricos são executados em vez de resolvidos, ou seja, um histórico artificial do sistema é gerado a partir dos pressupostos do modelo, e as observações são coletadas para serem analisadas e para estimar as medidas reais de desempenho do sistema.

Os autores Banks *et. al* (2009) e Law e Kelton (1991) mencionam que um modelo de simulação estático, algumas vezes chamado de uma simulação de Monte Carlo, representa um sistema em um determinado ponto no tempo, que será melhor detalhado no subitem 2.3.5. A simulação de evento discreto é a técnica usada neste trabalho e é mais bem detalhada no subitem 2.3.3. Por agora bastará dizer que o modelo de simulação discreto, dinâmico e estocástico (ou probabilístico) é chamado de modelo de simulação de evento discreto. Law e Kelton (1991) explicam que a decisão no uso de modelo discreto ou contínuo está no objetivo particular do estudo de tal sistema. Os autores também citam que os modelos determinísticos são casos específicos de modelos estocásticos.

2.3.2.1 Elementos de um Modelo de Simulação

Baseado em Banks *et. al.* (2009), Kelton *et. al.* (2014), Law e Kelton (1991) e Prado (2014), a seguir são descritos os elementos básicos usados na modelagem por simulação:

- **Entidades:** são os objetos de interesse no sistema. As entidades são também chamadas de clientes ou transações. São os objetos dinâmicos do sistema, que se movem por ele, mudam de *status*, afetam e são afetados por outras entidades e pelo estado do sistema (ativo ou passivo – em fila, por exemplo); e afetam as medidas de desempenho de saída. Elas, normalmente, são criadas, movem-se durante um período e por fim, descartadas quando saem. Porém, existem aquelas que nunca saem e permanecem circulando no sistema. Elas podem representar coisas “reais” em uma simulação. Muitas entidades podem estar presentes em uma mesma simulação, assim como as suas muitas realizações, para cada tipo de

entidade, fluuando no modelo de cada vez. Em algumas situações são criadas entidades *fake*, que não correspondam a coisa tangível, somente para cuidar de certas operações de modelagem, como exemplo, uma maneira de modelar as falhas de máquina, pois cria-se uma entidade, que se “esconde” durante o tempo de operação da máquina, esgota-se quando a máquina deveria quebrar e fica assim “triunfante” até o conserto, após recomeça o ciclo da máquina. Aqui, já se pode introduzir outra definição para sistema, ou seja, um sistema é uma coleção bem definida de entidades.

- **Atributos:** são valores de dados que caracterizam uma entidade. Portanto, as entidades são caracterizadas por atributos, os quais são valores específicos. Por exemplo, pessoa (entidades) tem como atributos: idade, peso, cor e outras características. Os atributos são propriedades comuns a todas as entidades, mas com um valor particular que pode ser distinto de uma entidade para a outra, para individualizar entidades. Uma analogia com a programação computacional tradicional, os atributos são variáveis locais, pois nesse caso, são locais para cada entidade individual. O ARENA, *software* de simulação, utilizado neste trabalho para a modelagem do caso estudado, controla atributos automaticamente, mas o programador poderá criar e usar os seus próprios atributos.
- **Variáveis:** também chamadas de variáveis globais (isto é, disponíveis para qualquer entidade), são informações que refletem algumas características / propriedades do sistema e independe da quantidade e tipo de entidades presentes. Os valores das variáveis podem ser alterados ou utilizados pelas entidades. Apesar de poder existir muitas diferentes variáveis em um modelo, cada uma é única. Existem dois tipos de variáveis, as internas ao ARENA (para um sistema de banco, o número de caixas ocupados, o número de clientes esperando na fila e outros) e as definidas pelo usuário (tempo médio de atendimento ou de serviço, tempo de trânsito e assim por diante). Diferente dos atributos, as variáveis não estão vinculadas a entidades específicas, mas, sim, ao sistema em geral. Fazendo uma analogia entre atributos e variáveis, podem-se entender os atributos, como *tags* incorporadas às entidades, movendo-se dentro do sistema, já as variáveis como regráveis, sendo escritas para o modelo do

sistema. Algumas variáveis anexas ao Arena para o modelo incluem o *status*: de uma ferramenta (ocupado ou inativo), do tempo (relógio da simulação) e do tamanho atual da fila.

- **Recursos:** são elementos estáticos do modelo, os quais são “disputados” pelas entidades. Uma entidade pode alocar um recurso, estando disponível e o libera, ao término do processo em questão, portanto a entidade ocupa um recurso, passa o tempo e o libera. Os recursos podem ser: máquinas, espaço limitado em uma área de armazenagem, pessoal e etc. Portanto, possuem capacidade de ocupação/ utilização e estados definidos, que podem ser modificados durante a simulação. O recurso é dado à entidade e não o contrário, para tanto, aos recursos podem ser associados filas, para a permanência das entidades que tentam ocupá-los quando indisponíveis. Por exemplo, em um processo de mineração: máquinas empilhadeiras, recuperadoras e outras.
- **Filas:** podem ser entendidas como um lugar de espera. Quando uma entidade não consegue seguir em frente, devido à limitação na capacidade de ocupação, por exemplo, recurso ocupado (estado do sistema), a entidade pode aguardar em uma fila. Portanto, o movimento da entidade pelo modelo poderá ser impedido. No Arena as filas possuem nomes e capacidades de representação. Segundo Carneiro (2008), “as entidades entram e saem das filas com base na mudança de estado do elemento do sistema associado à fila”.
- **Eventos:** “uma ocorrência instantânea que altera o estado de um sistema (como a chegada de um novo cliente)”, conforme Banks et. al. (2009, p. 107). Eventos são algo que ocorrem em um instante de tempo (simulado) que podem provocar alterações em: atributos, variáveis. Por exemplo, a chegada e partida de trens e navios.

2.3.3 Simulação de eventos discretos versus simulação contínua

A simulação pode ser classificada em duas amplas categorias, são: a simulação de eventos discretos e a simulação contínua, conforme Hillier e Lieberman (2013).

Segundo esses autores as categorias são caracterizadas e exemplificadas, como seguem:

A **simulação de eventos discretos** é aquela em que ocorrem alterações no estado do sistema, instantaneamente, em pontos aleatórios no tempo, como efeito da ocorrência de eventos discretos. Por exemplo, em um sistema de filas, os eventos discretos são a chegada e a saída de um cliente resultante da finalização desse serviço, ou seja, em um sistema de filas, no qual o estado do sistema é o número de clientes/entidades no sistema.

A **simulação contínua** é aquela em que ocorrem mudanças no estado do sistema, continuamente, ao longo do tempo. Por exemplo, o sistema é um avião em voo e o seu estado for a posição atual da aeronave, logo o estado muda continuamente ao longo do tempo. Algumas aplicações são realizadas nesses estudos de projetos de engenharia.

De acordo com Banks *et. al.* (2009) os modelos de simulação são analisados por métodos numéricos e não analíticos. Conforme Hillier e Lieberman (2013), os métodos analíticos podem ser usados, desde que sejam de simples resolução, que para o caso da simulação contínua, normalmente, exige o emprego do cálculo diferencial, que serve para descrever a taxa de mudança das variáveis de estado.

Logo, Law e Kelton (1991) afirmam que para a maioria dos modelos contínuos analíticos, as soluções não são possíveis, no entanto, técnicas de análise numérica, por exemplo, integração *Runge-Kutta*, é usada para integrar as equações diferenciais numericamente. Então, Hillier e Lieberman (2013) afirmam que a resolução do modelo tende a ser relativamente complexa.

Segundo Hillier e Lieberman (2013), na prática, a maioria das aplicações de simulação é de eventos discretos. Para tal, aproximam-se as mudanças contínuas de estado por mudanças ocasionais discretas de um sistema, possibilitando o uso de simulação de eventos discretos. Logo, a análise torna-se mais simples.

Law e Kelton (1991), Banks *et. al.* (2009) afirmam que a simulação de eventos discretos diz respeito à modelagem de um sistema, no qual as variáveis de estado mudam apenas em um conjunto de pontos separados no tempo. Matematicamente, pode-se dizer que o sistema pode mudar em apenas um número contável de pontos no tempo.

Esses pontos no tempo são definidos por Law e Kelton (1991), como serem aqueles em que um evento ocorre, o qual é uma ocorrência instantânea que pode alterar o estado do sistema. Inicialmente, a simulação de eventos discretos pode ser realizada via

cálculos manuais, porém esses autores, juntamente com Banks *et. al.* (2009) relatam, que devido a grande quantidade de dados a serem armazenados e manipulados, para a maioria dos sistemas do mundo real, torna-se imprescindível para os modelos de simulação de eventos discretos, a realização das corridas com o auxílio de um computador digital.

Nesse contexto, Banks *et. al.* (2009) dizem que os métodos numéricos, empregados nas simulações de eventos discretos, utilizam procedimentos computacionais para "resolver" modelos matemáticos. No caso desses modelos de simulação, os modelos são "executados" ao invés de serem resolvidos, ou seja, valores históricos “artificiais” do sistema são gerados a partir do que é pressuposto para o modelo e as observações são coletadas para análise e para estimar as “reais” medidas de desempenho do sistema.

Segundo Kelton *et. al.* (2014), a maioria das simulações de eventos discretos é executada na orientação do evento, mesmo que faça a modelagem na orientação do processo. O Arena apresenta uma natureza hierárquica que permite entrar na orientação de eventos se for necessário recuperar o controle para modelar algo único.

Law e Kelton (1991) atentam para o fato que poucos sistemas, na prática, são totalmente discretos ou totalmente contínuos, porém como um tipo de mudança (instantaneamente em pontos espaçados ou continuamente em relação ao tempo) das variáveis de estado predomina, para a maioria dos sistemas, geralmente é possível classificar como sendo discreto ou contínuo. Da mesma forma é possível construir modelos com aspectos de ambas às simulações, resultando em uma simulação combinada discreto-contínua.

Historicamente, uma grande proporção dos estudos de simulação de eventos discretos envolveu modelagem de um sistema de filas no mundo real, ou pelo menos algum componente do sistema simulado era um sistema de filas.

Assim sendo, o presente trabalho é sobre simulação de sistemas de eventos discretos em que o modelo de interesse é analisado numericamente, com o auxílio de um computador, via o *software* Arena.

2.3.4 Simulação usando o Arena

O conceito de simulação atual é, segundo Prado (2014, p.29): “Simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital”. Portanto, é parte da

definição o uso do computador, para se chegar aos resultados. A partir de meados da década de 1980 surge a chamada simulação visual, a qual predomina até hoje, e tem o Arena como programa, que facilita enormemente a difusão do uso da simulação, uma vez que mostra na tela imagens do processo que está sendo simulado, como se tivesse sido filmado.

O *software* Arena é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, amplamente utilizado, que se baseia na modelagem por fluxogramas, e segundo Oliveira *et. al.* (2016) o Arena é o *software* mais mundialmente utilizado em *Supply Chain Simulation*. Ao realizar as simulações é possível utilizar indicadores para verificar o comportamento de variáveis e, ao final da simulação, são emitidos relatórios contendo os dados e informações das simulações. O *software* é utilizado tanto por empresas quanto para área acadêmica (ensino e pesquisa).

Prado (2014) diz que o Arena apresenta blocos ou módulos que são usados para descrever uma aplicação real, o que facilita a programação. A presença de uma interface gráfica para o usuário automatiza e muito a tarefa de simulação, pois ao mesmo tempo em que reduz a necessidade do teclado, aumenta a utilização do mouse. Além disso, podem ser utilizadas ferramentas úteis, para a construção dos modelos de simulação:

- *Input Analyzer*: Analisador de dados de entrada, a fim de escolher a melhor distribuição estatística que se aplica aos dados reais do processo estudado;
- *Output Analyzer*: Analisador de resultados, durante a simulação, com diversos recursos para análise gráfica e de comparações estatísticas.

O Arena apresenta características básicas e de acordo com o autor Prado (2014), mostram o sistema a ser modelado como constituído de estações de trabalho, onde as entidades recebem algum serviço, que compreende um ou mais recursos, que prestam serviços as entidades/clientes, que se movimentam através do sistema. De acordo com a lógica de programação fornecida para o modelo, o *software* manuseia todos os dados surgidos durante a simulação, como o tempo de espera na fila, taxa de utilização de atendentes, etc. Pode também realizar animações próximas a realidade e ao final da simulação são gerados relatórios, que contém os principais resultados do processo.

2.3.5 O método de Monte Carlo

Além da simulação de eventos discretos existem outros tipos, como simulação contínua e até mesmo a simulação combinada discreto-contínua (comentadas em 2.3.3) e, ainda, a simulação de Monte Carlo, ou conforme, Law e Kelton (1991) pode também ser chamada, do método de simulação durante Segunda Guerra Mundial, quando esta abordagem foi aplicada a problemas relacionados ao desenvolvimento da bomba atômica, adicionalmente, e de acordo com Amorim (2005) o nome também foi escolhido, durante o *Projeto Manhattan da Segunda Grande Guerra*, por causa da simulação estatística similar com jogos de azar ou de chances, e também por que a capital de Mônaco era conhecida por cassinos de jogos de azar.

Law e Kelton (1991) definem a simulação de Monte Carlo como um esquema que emprega números aleatórios, ou seja, variáveis aleatórias. Este tipo de simulação é usado para resolver determinados problemas estocásticos ou determinísticos, os quais a dependência temporal não desempenha nenhum papel substancial. Assim, as simulações de Monte Carlo são geralmente estáticas e não dinâmicas como observado no diagrama da Figura 9. Conforme o autor, a sua definição, quanto à simulação de Monte Carlo apresentada é mais restritiva, pois alguns autores a definem como sendo qualquer simulação que envolva números aleatórios.

Ao chegar uma entidade/cliente a uma estação de trabalho, a duração do atendimento para um determinado cliente é diferente de outro, posto que o processo é randômico e é descrito por uma distribuição de probabilidade. O método utiliza números aleatórios e a função de probabilidades que descreve o sistema real. Logo, o Arena utiliza o método de Monte Carlo para obter o valor da duração daquele atendimento específico (PRADO, 2014).

Por esse método é efetuado um sorteio para a duração do atendimento, o processo de chegada, para o deslocamento entre estações de trabalho, etc. Assim, para se obter resultados confiáveis o tamanho da amostra deve ser adequado, caso seja aumentado esse tamanho o resultado não se altera, mas se diminuído pode fornecer resultados diferentes do real (PRADO, 2014).

De acordo com Amorim (2005) o método tem hoje aplicação em diversos campos, desde simulações de complexos fenômenos físicos como o transporte de radiação na

atmosfera terrestre até problemas urbanos de congestionamento de tráfego. Os métodos de simulação estatística são diferentes dos métodos numéricos convencionais, os quais se utilizam de equações diferenciais ordinárias ou parciais de processos físicos ou matemáticos.

Por Monte Carlo, o processo físico não necessita da equação diferencial para descrever o seu comportamento, porém necessita-se das funções de densidade de probabilidade (fdp). Com as fdp, as simulações são realizadas em diversas rodadas e o resultado se dará pela média das observações. Para aplicações práticas, estima-se a variância deste resultado médio, assim como o número de tentativas de Monte Carlo, a fim de obter erro estatístico (AMORIM, 2005).

O método pode ser usado, segundo Amorim (2005), tanto para simular processos aleatórios (estatísticos) que possam ser descritos por fdp, quanto para processos sem conteúdo estocástico. Como exemplo: a avaliação de uma integral definida ou a inversão de um sistema de equações lineares. Nesses casos são feitas analogias com fdp, permitindo o propósito da simulação. Pertencem ao método de Monte Carlo todos os métodos de algum sistema, que envolvem simulações estatísticas, que representem ou não um processo físico real.

A seguir o subitem 2.5.1.1, que descreve resumidamente os principais componentes do método, segundo Amorim (2005).

2.3.5.1 Principais componentes do método de Monte Carlo

Os componentes básicos de Monte Carlo são:

- **Funções de densidade de probabilidade (fdp):** Descrição do sistema físico ou matemático por uma fdp.
- **Gerador de números aleatórios:** Gerador de números aleatórios distribuição uniforme em $[0;1]$.
- **Regra de amostragem:** Amostragem a partir das fdp associada aos números aleatórios.
- **Resultados:** Acumulados em resumos.
- **Estimativa de erro:** Estimação do erro estatístico (variância) como função do número de tentativas e outras quantidades.

Dessa forma, tanto o Arena, quanto o Simio, ambos os *softwares* comercializados pela Paragon *Decision Science*, são simuladores estocásticos, que são capacitados a imitar a aleatoriedade do sistema real, via distribuições probabilísticas, com isso representam matematicamente as chances de ocorrência de todos os valores possíveis para um processo do sistema especificado. Conjuntamente com um sistema gerador de números aleatórios, nomeado como o “Método de Monte Carlo”, reproduzem o comportamento do sistema com todas as possibilidades e combinações, dessa forma não existem limites para o período de tempo desejado pelo usuário (PARAGON, 2018).

2.4 Trabalhos relacionados

Segundo Silveira (2017) o ambiente de ferrovias e portos apresenta um caráter altamente dinâmico, com alterações frequentes no universo de decisão e a incerteza com relação aos horários de chegada e envio de produtos, que dificulta sua modelagem analítica. Aliás, a abrangência de múltiplos agentes e a presença de diversos produtos, equipamentos, origens e destinos aumentam ainda mais sua complexidade.

Com isso, autores como: Fanti *et. al.* (2015), Chwif e Medina (2015) e Fioroni *et. al.* (2013) descrevem a simulação como método (ferramenta) de vantagens sem igual ao se imitar sistemas reais: logísticos; de ferrovias, portos e de operações de pátios; terminais ferroviários e trens de carga e passageiros, respectivamente. Portanto, nesses ambientes a simulação traz muitos benefícios ao se lidar com as aleatoriedades e incertezas do sistema real.

A revisão de literatura efetuada, para compor o presente trabalho de pesquisa, fez uso de algumas referências no tema à base de: artigos (periódicos e anais), dissertações, teses e outros. Esses trabalhos visam enriquecer o estudo relacionado aos três ambientes (sistemas): ferroviário, portuário e pátio de estocagem, apresentando pelo menos um desses em cada autor revisado, juntamente com: o objetivo, a análise da técnica e *software* utilizados, a fim de contribuir para o tema. Além disso, investigar sobre os componentes que integram o sistema pátio-porto.

A seguir dará início a sequência de trabalhos correlatos encontrados na bibliografia, envolvendo alguns dos ambientes anteriormente descritos.

No estudo de Crainic e Laporte (1997) é apresentado para cada um dos níveis clássicos de tomada de decisão, uma breve revisão de literatura relacionada à otimização, sequenciamento e planejamento para problemas de operação do transporte de cargas, principalmente o modal ferroviário. Para cada um dos níveis são praticados modelos, com exemplos e equações matemáticas. No nível estratégico traz os modelos: de localização, de projeto de rede e o planejamento multimodal regional.

No tático são apresentados os seguintes modelos: os projetos em rede de serviço para o transporte intermodal e os problemas de roteamento de veículos (VRP – *Vehicle Routing Problem*). Para o primeiro caso, apresentam produtos inseridos em uma rede de serviço de transporte interligados por terminais, sendo atendidos por diferentes ativos e seguindo rotas diferentes. Para o caso de VRP, as soluções são possíveis por otimização; e quando os problemas são mais complexos, a resolução é por heurísticas e metaheurísticas. Como metaheurísticas mais utilizadas na época: o *Simulated Annealing*, *Tabu Search* e *Genetic Algorithm*. No nível operacional é mencionada a modelagem dinâmica para suporte operacional e o roteamento capacitado com incertezas.

Dando continuidade ao estudo de revisão de literatura, Marinov *et. al.* (2013) abordam sobre os níveis de gestão para o planejamento ferroviário, seguido pelos sistemas de apoio à decisão para o controle do tráfego ferroviário. Para o modal ferroviário são discutidos: formas de operação de trens, problema de controle de tráfego e despacho de trem, *layouts* e esquemas técnicos de pátios ferroviários e desempenho de terminais, bem como projeto de cronograma. Além disso, a avaliação do comportamento de sistemas e redes ferroviárias, através de: métodos analíticos, de técnicas de simulação e pacotes de *software* são também mencionados. Tudo isso é conceituado e exemplificado, para se conseguir avaliar a capacidade ferroviária e a utilização de uma ferrovia. A capacidade de uma ferrovia é definida como sendo a utilização máxima possível, para um determinado número de trens, independente da demanda e dos recursos disponíveis.

Em Marinov e Viegas (2009) e Marinov *et. al.* (2011, 2013 e 2014) são descritos os tipos de pátios de triagem ferroviários (*flat-shunted yard*, *hump yard* e *gravity yards*) e suas variações. É possível entender esses três tipos de modelos de pátios e, assim, como

são feitas as suas avaliações de capacidade, pautado nas características operacionais do pátio.

2.4.1 Os trabalhos relacionados à simulação e transporte de carga

Essa parte do estudo procura mostrar alguns trabalhos desenvolvidos na área de simulação ferroviária e/ou portuária, podendo englobar, ou não, trabalhos sobre pátios de estocagem, diversos, encontrados nas principais literaturas sobre o assunto. Além disso, são apresentados os principais trabalhos em simulação, que foram utilizados diretamente para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional desta dissertação.

Com uma abordagem cronológica e, também, do que mais se aproxima do assunto desta pesquisa estarão os trabalhos dos autores, que se seguem.

Fioroni *et al.* (2004) apresenta um modelo de simulação do Pátio Ferroviário de Tubarão, localizado em Vitória no Espírito Santo (ES), Brasil, que foi criado com um nível de abstração de cunho estratégico. Operações ferroviárias do pátio (de separação, consolidação, classificação, manutenção, carga e descarga de diversos tipos de vagão) basicamente se dividem em operações de MF e carga geral (CG). O sistema de simulação desenvolvido possibilitou o estudo de dimensionamento do pátio e avaliação de novos investimentos. Os resultados mostram que o estudo pode ser aplicado no sistema logístico brasileiro, que é carente de infraestrutura ferroviária e dependente do modal rodoviário. Apesar do tempo dispendioso gasto para a construção da ferramenta pela equipe técnica, o ganho na produtividade do pátio e na aplicação correta dos recursos financeiros em investimentos de infraestrutura suplantam, pelo bom desempenho que é proporcionado para as empresas.

Ainda referente ao estudo de malha ferroviária, foi desenvolvida uma ferramenta para representar qualquer rede ferroviária de carga, com infraestrutura detalhada e personalizável, de forma a adotar um nível maior de detalhe, que incluía toda a rede ferroviária de movimento dos trens, com o objetivo em avaliar o impacto de mudanças de infraestrutura em linhas ferroviárias e terminais de carga e descarga da MRS Logística no Brasil, adotada como um estudo de caso. O modelo pode ser usado para análises táticas (reconfiguração de rotas de trens). Após, cenários de futuros planos de

investimento foram experimentados no simulador, fornecendo decisões seguras para a MRS. (FIORONI *et. al.*, 2005).

Com uma abordagem de aumento de produção de MF para os próximos anos na região Norte do Brasil, o Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira (TFPM) em São Luís-MA, operado pela VALE, tem a sua importância no escoamento do minério de Carajás, portanto o estudo refere-se à capacidade de atendimento ao crescimento desta demanda. O modelo simula a operação do circuito de MF, desde a recepção dos trens com vagões carregados até a formação dos trens com vagões vazios. Com a modelagem do TFPM foi possível observar que para o cenário atual a utilização das linhas do pátio de recepção e do complexo dos viradores já estava acima de 90%, e para volumes de 130MTPA e 150MTPA a situação era pior, indicando a necessidade de aumento do número destes recursos para o não comprometimento do volume de descarga projetado (CARNEIRO, 2008).

Meireles (2010) desenvolveu um modelo de simulação ferroviário, que retratou a EFVM em seus aspectos gerais, sem o foco nos níveis de planejamento ferroviário (operacional, tático ou estratégico), e consequentemente nas tomadas de decisões. O escopo do trabalho desenvolvido teve como principal característica a circulação dos trens de minério de ferro ao longo da malha ferroviária de linha dupla. Os trens de CG e de passageiros foram desconsiderados. O detalhamento dos pontos de carga (minas) e de descarga (porto) do sistema logístico não foram incluídos. Optou por criar um modelo para avaliar a capacidade de transporte de MF na visão integrada do sistema (mina, ferrovia e porto).

Os trabalhos de Carneiro (2008) e Meireles (2010) criam modelos para avaliar as capacidades de transporte de MF de uma ferrovia, para um sistema integrado (mina, ferrovia e porto), cujo parâmetro é a circulação e estadia do vagão. Mas, ambos os trabalhos não deram atenção ao destino da carga após a etapa de descarga, via disponibilidade do virador de vagão, ou mesmo se há rota de destino disponível. Portanto, diante desta lacuna, quanto aos dois pontos mencionados, na melhoria da produtividade da cadeia e dos ativos envolvidos, a pesquisa de Vieira e Cruz (2016) e um estudo mais completo de dissertação de Vieira (2018) fizeram-se necessárias.

Vieira e Cruz (2016) e Vieira (2018) desenvolveram uma ferramenta de auxílio no planejamento tático ferroviário, para estudar cenários na distribuição de lotes carregados de MF da EFVM por rota de transferência do Porto de Tubarão no ES. Ambos os trabalhos, basicamente, apresentaram modelos de simulação que representaram a chegada de lotes de vagões do tipo GDE carregados de MF ao pátio ferroviário de descarga do Porto de Tubarão, assim como a distribuição nos viradores e as rotas de transferência. Além disso, avaliaram a capacidade de descarga dos viradores de vagões e das rotas de correias transportadoras, que transferem o MF para os pátios de estocagem, que ficam dentro do porto, porém sem tratar da operacionalidade e rotas dentro desses pátios. O modelo para Vieira e Cruz (2016) foi mais simplificado e o de Vieira (2018) considerou todos os cinco viradores de vagões e as sete macro rotas de descarga.

Assim como o trabalho de Meireles (2010), que desenvolveu um modelo de simulação que descreve em circuito fechado a cadeia logística do MF na EFVM, abordando trens vazios e carregados, e de forma integrada, os autores: Faria e Cruz (2015) e Faria (2016), também, o fizeram. Porém, contemplaram várias melhorias e inseriram novos recursos que antes não existiam no estudo de Meireles (2010). O trabalho de dissertação de mestrado de Faria (2016) envolve simulação via ARENA, como os trabalhos citados, e desenvolve as recomendações de Meireles (2010), a fim de complementar tal estudo.

Faria (2016) implementou uma ferramenta de apoio à decisão, uma vez que diferente de Meireles (2010), o qual não enfatizou as áreas de planejamento logístico, visou análises nos três níveis de planejamento (operacional, tático e estratégico), segundo os indicadores oriundos do modelo. Faria (2016) apresenta um escopo do modelo implementado, que inseriu em relação ao autor anterior, todos os tipos de trens: passageiros, CG, minério mercado interno em vagões GFE's e GFD's. As atividades ao longo da malha ferroviária, além das atividades produtivas dos principais clientes e o detalhamento de todos os pontos de carga e descarga, além dos *templates* ferroviários nos ramis singelos. Os resultados obtidos pela simulação foram satisfatórios e adequados ao sistema real.

Muitos são os trabalhos de simulação na área ferroviária, pois o simulador é uma ferramenta de apoio à tomada de decisões de investimento, uma vez que proporciona

segurança. No Brasil as empresas não dão bastante atenção ao modal ferroviário, em comparação as empresas norte-americanas e europeias. O modal ferroviário brasileiro necessita de uma melhor infraestrutura.

Woroniuk e Marinov (2013) empregaram uma série de modelos de simulação construídos no ARENA, para avaliar o nível de utilização de seções ao longo de uma rota ferroviária. No estudo de linhas e redes ferroviárias de carga são descritos métodos e conceitos analíticos. A rota ferroviária no leste da Espanha foi o caso estudado e foi possível verificar o aumento do nível de utilização ao longo da rota a partir do cenário atual, com alterações feitas nas regras de tráfego, variando-se o número total de serviços operados na linha.

O trabalho de Marinov e Viegas (2009) desenvolve uma modelagem para análise e avaliação de operações de pátio ferroviário (*flat-shunted*). A principal idéia é simular as operações de pátio dividindo em segmentos, de forma que se analise separadamente, formando um sistema de rede de filas interconectados, que interajam uns aos outros, e que o impacto global das operações do trem de carga seja capturado, permitindo estudar a capacidade de processamento dos pátios. Com o objetivo de avaliar as capacidades de desempenho dos pátios de manobra, via comparação pelo operador de transporte, entre o que é improvisado e o que é programado. Nota-se que uma operação ferroviária programada é mais rentável, ou seja, uma melhor utilização da ferrovia. Marinov e Viegas (2011) também analisaram uma empresa ferroviária portuguesa e operações em pátio ferroviário, com o intuito de avaliar os impactos de dois padrões básicos de tráfego: operação improvisada e operação estruturada.

Em Juliá (2010) é relatado em sua justificativa de pesquisa, uma lacuna, que se assemelha a algumas considerações feitas por Fernandes (2001), o qual diz que muitos estudos encontrados na literatura discutem o dimensionamento e análise operacional de sistemas de pátio e porto. Mas, ainda não são trabalhos voltados ao desenvolvimento de modelos que analisam a operação do sistema portuário (porto) integrado a sistemas que vem antes, como os pátios de estocagem. A ênfase é dada apenas ao problema da interface porto/navio (equilibrar o número de berços com o volume de tráfego de embarcações), de forma separada da capacidade dos pátios de estocagem. Assim, deixa-se de lado o complexo problema, que é o escoamento da produção do MF, que utiliza de forma essencial as áreas de pátio do porto, para a exportação dessas *commodities*.

O trabalho de Fernandes (2001) trata do dimensionamento econômico-operacional de terminais portuários especializados em contêineres e veículos, sob essa nova visão do sistema integrado pátio-porto. A proposta de Juliá (2010) se assemelha ao trabalho proposto por Fernandes (2001), no entanto para granel sólidos (MF e pelotas), e sem a alteração do *layout* do pátio e da sua capacidade, mas sim de novas configurações do sistema integrado pátio-porto, como novos berços e equipamentos.

Fioroni *et. al.* (2010) destaca que os portos devem ser eficientes, pois são estruturas de maior relevância no escoamento de produtos para a exportação, daí a sua grande importância para os países. O autor desenvolve em sua pesquisa um estudo de portos de minérios no Porto do Açu, em fase de construção. O modelo de simulação trata do equilíbrio entre a chegada de produtos e de navios, a fim de se evitar atrasos, de forma a atender os prazos de entrega e os horários de chegada do navio.

Dentro desse mesmo contexto de importância dos portos para os países, mencionado pelo autor anterior, Fioroni *et. al.* (2013) confirma o mesmo sobre as ferrovias, as quais tem na simulação uma maneira rápida e econômica para testar cenários de tomada de decisão, sem a realização dos investimentos estruturais. O estudo de caso é realizado na Colômbia, para o transporte de carvão da mina ao porto em uma ferrovia de trens em um ciclo fechado, através de uma abordagem orientada de sinal. Ao longo do trajeto o trem deve respeitar os sinais verde, amarelo e vermelho, tendo somente o conhecimento do seu destino e caminho a ser percorrido. O modelo foi utilizado para determinar gargalos do sistema da empresa e para expandir sua capacidade de operação.

Caballini e Sacone (2015) estudaram o porto ferroviário como um sistema composto por subsistemas. O caso foi baseado em um estudo do ciclo ferroviário de cada subsistema de um porto ferroviário na Itália, que recebe produtos (de importação e exportação) de três terminais de contêineres. A simulação não foi baseada em eventos discretos, mas sim na simulação Dinâmica de Sistemas (SD) e utilizou dados reais, de forma a analisar quatro cenários, que avaliaram o desempenho dos terminais por mudanças na quantidade de recursos móveis (guindastes ferroviários e outros) e infraestrutura (número de linhas nos pátios ferroviários), melhoria das operações ferroviárias de manobra e dispor de um porto seco para um dos terminais de contêineres.

Dentro do conceito de logística estratégica de escoamento da produção para exportação e abastecimento do mercado interno estão os trabalhos de Lopes (2008) e Lopes *et.al.*(2011), que destacam o mercado de grãos, base de todas as cadeias produtivas, no Estado do Pará para o transporte multimodal (hidrovia e rodovia) do MF granulado pelo rio Tocantins. O estudo como objetivo a análise da capacidade produtiva para o planejamento logístico e obtendo a tomada de decisão. O trabalho aborda a integração dos diversos modais de transporte, priorizando o hidroviário, principalmente para o transporte de carga no interior do Brasil, para produtos de baixo valor agregado e alto volume de carga em relação aos outros modais de maior importância no país, o rodoviário e o ferroviário. O modelo mostrou ser eficiente, com soluções coerentes, auxiliando a tomada de decisão, podendo ser de grande importância para o planejamento de operações.

Outros dois trabalhos que fazem uso do transporte multimodal estão: Lopes (2017) e Lopes *et. al.* (2017), que tratam do transporte de carga de granel agrícola, a soja. Ambos os trabalhos mostram a realidade da exportação da soja, como um produto com baixos custos de produção, porém leva desvantagem quando entra na rede logística de escoamento brasileira. O primeiro autor apresenta um projeto de simulação no auxílio à decisões estratégicas da logística de escoamento de soja, por meio da simulação. Para tal, o Brasil foi dividido em 19 regiões produtoras, de forma a compor 20 rotas de Norte a Sul do país, para cada origem, e destinados aos atuais portos exportadores de soja, pelos principais eixos de transportes, construídos ou projetados. Ao final das simulações de um ano, foram analisados muitos cenários e alguns deles apresentaram as alternativas que melhor reduzem os custos logísticos do sistema estudado. O estudo de Lopes *et. al.* (2017) tem o mesmo interesse quanto ao transporte de soja, mas o sistema logístico de exportação do produto limita-se ao estado de Mato Grosso (MT), também, auxilia na tomada de decisão estratégica, baseando-se nos custos de rota e na disponibilidade de portos. Para simulações de três meses, os resultados indicam na necessidade de desenvolvimento do Porto de Vitória e dos Portos do norte do país, bem como o fluxo logístico multimodal desses portos. Apesar do Porto de Vitória ser a melhor opção para exportar soja brasileira, seguida pelos portos do norte do Brasil.

O artigo de Netto *et. al.* (2015) apresenta o estudo de uma metodologia para dimensionar e avaliar a capacidade de terminais portuários, baseado em simulação como principal ferramenta na verificação dos níveis de serviço ofertados pelo terminal. Uma

abordagem sistêmica é considerada no modelo de simulação, que representa as operações no terminal. O terminal do caso estudado exporta MF produzido no Brasil e tem o seu nome revelado no trabalho de Zampirolli (2016) e Zampirolli (2017), como sendo o Terminal Portuário de Ponta da Madeira (TPPM). A capacidade do terminal é dada pela menor capacidade de componentes e subsistema, ou seja, pelo gargalo. A metodologia testa cenários de aumento de capacidade do terminal, limitando-se ao gargalo operacional de utilização dos berços. Para tal, Netto *et. al.* (2015) considera a exportação de dois tipos distintos de MF, o *pellet feed* e o *sínter feed*. O terminal foi dividido em três subsistemas: de descarga, de armazenamento e carregamento, após é construído o modelo de simulação, via modelo conceitual e por fim, aplica-se o conceito de capacidade associado ao nível de serviço, para obter a capacidade do terminal, conforme as expansões, e investigar o subsistema-gargalo do sistema. A abordagem sistêmica (divisão de subsistemas) pode ser considerada para qualquer tipo de terminal portuário, já que todos eles podem ser divididos em três tipos descritos anteriormente.

Dando continuidade ao estudo, anterior, do sistema portuário (ferrovia, pátio de estocagem e porto) do MF, o dimensionamento de sua capacidade e uma modelagem que pode ser utilizada para a geração de diversos cenários de portos de exportação. A modelagem computacional da autora Zampirolli (2016) e Zampirolli (2017) apresenta uma ferramenta genérica de modelagem e simulação de terminais portuários, cujo objetivo foi apresentar o aumento do volume embarcado de MF do Terminal Portuário de Tubarão no ES. Esse ganho em capacidade não necessitou de investimentos extras de CAPEX, pois para isso não houve grandes mudanças físicas (ampliação do porto) e/ou infraestruturais. O modelo conceitual detalhado, que é utilizado para a confecção do modelo computacional apresenta quatro das etapas, que constituem a cadeia de MF da VALE: mina, ferrovia, descarga e porto. Foi possível verificar a utilização de um “produto único” suficiente para aumentar a capacidade de embarque do MF no terminal portuário específico, aumentando o volume embarcado ao final das rodadas de simulação.

O simulador desenvolvido, no trabalho em questão, teve como referência para a modelagem do sistema pátio-porto, a ênfase dada nos trabalhos de Juliá (2010), Netto *et. al.* (2015) e Zampirolli (2016), quanto à idealização de um modelo conceitual da cadeia logística do MF (pátio-porto), o qual fundamentou a criação de um “protótipo” simplificado, que contribuisse para o preenchimento de uma lacuna, sobre a ausência de

uma modelagem explicativa por etapas na elaboração de um possível sistema desde o pátio até o porto.

Além das características e importâncias notadas também nos demais trabalhos relacionados, que devem ser obedecidos em um trabalho de importância dentro do estudo em logística, de intermodalidade e referente a uma cadeia de suprimentos, que se propõe em nível acadêmico, de forma a fazer parte da ciência, e que de acordo com Crainic *et. al.* (2018) o complexo sistema de transporte intermodal de mercadorias apresenta uma taxonomia própria e nova para estruturar a literatura relevante e recente, que envolve a interação de uma ampla gama de partes interessadas: os tomadores de decisão, operações e atividades de planejamento.

Devido a essa complexidade, a simulação é muito estudada e usada no campo da pesquisa operacional, construindo modelos, métodos e ferramentas para gerenciar as atividades de transporte e apoiar os processos de tomada de decisões. A taxonomia proposta aparece como um instrumento útil para classificar a literatura, apoiar a adição de análises, identificar tendências e caminhos futuros de sistemas de transporte intermodal em várias dimensões, por exemplo, os objetivos de simulação.

A Tabela 1 apresenta um resumo comparativo entre os principais trabalhos pesquisados e relacionados à simulação e transporte de carga, a fim de mobilizar a sua grande importância em estudos acadêmicos.

2.4.2 Os trabalhos relacionados ao uso combinado entre otimização e simulação

Nesta seção são descritos, de forma sucinta, alguns trabalhos relevantes relacionados ao estudo em questão, que utilizam técnicas híbridas, ou seja, o uso combinado de técnicas/software de otimização e de simulação.

Em malhas ferroviárias, porém brasileiras, abordamos dois trabalhos: a tese de Fioroni (2008), que considera a característica específica de trens de ciclo (trens percorrendo um ciclo fechado) e as interferências, utilizando as ferramentas de otimização: a *Optquest*, que fica “acoplada” ao simulador Arena, e a GAMS. E, o estudo de Pedreira Júnior (2015), que no contexto de exportação de *commodities*, desenvolveu um estudo ferroviário, em fase de construção, de integração Oeste Leste

(FIOL), entre Tocantins – TO e Bahia (BA), para o escoamento tanto de MF e produtos agrícolas, utilizando modelagem matemática, simulação e otimização (*Optquest*).

Fanti *et al.* (2015) e Silveira (2017) abordam a intermodalidade (ferroviário, rodoviário e hidroviário). A primeira autora aborda o fluxo de mercadorias entre um porto marítimo (Trieste) e um porto seco (Ferneti). O módulo de simulação estima os indicadores de desempenho e os fornecem aos módulos de otimização. Silveira (2017) aborda como meio de transporte de longas distâncias. Nesse estudo visa o transporte de *commodities* (da mineração e indústria agrícola), desenvolvendo uma metodologia de otimização via simulação, para dimensionar a infraestrutura do sistema.

Percebe-se, mais uma vez, o uso das ferramentas computacionais dentro do contexto de planejamento da produção para as malhas ferroviárias e em geral para o transporte de cargas, desde a sua origem até o destino, para os clientes, E, a utilização do *software* Arena, também como simulador-otimizador, uma vez que possui um módulo de otimização chamado *Optquest* acoplado, o qual é capaz de realizar otimizações em cenários pré-determinados.

Por fim, segundo Alrabghi e Tiwari (2015) dentro do contexto do estado da arte na otimização baseada em simulação para sistemas de manutenção (importantes na modelagem de sistemas logísticos complexos e que, também, importa a produtividade de equipamentos) a simulação de eventos discretos foi a técnica mais relatada para modelar esses tipos de sistemas, enquanto que os Algoritmos Genéticos, foram os métodos de otimização mais comentados na literatura.

Tabela 1 – Resumo dos principais trabalhos pesquisados e relacionados à simulação e transporte de carga

Referência (Ano)	Título	Objetivo principal	Aplicação	Software
Fioroni <i>et. al.</i> (2004)	Estudo estratégico de dimensionamento da infraestrutura do pátio ferroviário de Tubarão através de simulação	Desenvolver um modelo de simulação para estudo estratégico do Pátio ferroviário.	Pátio ferroviário (Brasil: Tubarão em Vitória-ES/VALE)	ARENA
Carneiro (2008)	Simulação do circuito de minério do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira (TFPM)	Elaborar um modelo para simular a operação de um pátio ferroviário.	Pátio ferroviário (Brasil: Carajás e SL - TFPM)	ARENA
Juliá (2010)	Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro	Desenvolver uma ferramenta de apoio à tomada de decisão via simulação, para um sistema integrado pátio-porto, a fim de dimensionamento de capacidade em uma empresa do ramo de mineração de MF.	Pátio e porto (Brasil: Anchieta – ES/ Samarco Mineração)	ARENA
Meireles (2010)	Modelagem e simulação da malha ferroviária em circuito fechado da Estrada de Ferro Vitória a Minas	Desenvolver um modelo de simulação para a cadeia logística do minério de ferro.	Ferrovia (Brasil: EFVM)	ARENA
Lopes <i>et. al.</i> (2011)	Simulação do transporte de minério de ferro na hidrovia do Araguaia-Tocantins	Desenvolver um modelo de simulação para um sistema multimodal de minério de ferro, a fim de redimensionar sua capacidade produtiva, segundo planejamento logístico e tomada de decisão.	Multimodal (Brasil: PA)	EXTEND™ ARENA
Netto <i>et. al.</i> (2015)	<i>Analysis of capacity associated to levels of service at port terminals using systemic approach and simulation of discrete events</i>	Apresentar uma metodologia de determinação da capacidade de um porto a partir dos níveis de serviço oferecidos, utilizando um modelo de simulação.	Ferrovia, pátio e porto (Brasil: Terminal de MF)	ARENA
Zampirolli (2016) /Zampirolli (2017)	Alternativas para aumento de capacidade de um terminal portuário de minério de ferro.	Testar um modelo de simulação de aumento de capacidade sem a necessidade de interferência na estrutura física, mas sim no tipo de produto movimentado e nas atuais variáveis do sistema.	Ferrovia, pátio de estocagem e porto (Brasil: Vitória – ES/VALE)	ARENA
Faria (2016)	Análise do planejamento ferroviário: uma abordagem utilizando simulação de eventos discretos	Desenvolver um modelo de simulação da cadeia logística em circuito fechado do minério de ferro, para análise de aumento de capacidade de transporte, como ferramenta de suporte aos níveis de tomada de decisão, avaliando de forma integrada o transporte de MF, CG e de passageiros.	Ferrovia (Brasil: EFVM)	ARENA
Vieira e Cruz (2016)	Uma análise da distribuição de lotes carregados de minério de ferro ferrovia-porto: uma abordagem por simulação a eventos discretos	Modelo de simulação simplificado de um pátio ferroviário de descarga de minério de ferro por rota de destino (Ferrovia-Porto), a fim de analisar lotes carregados em nível tático	Ferrovia (Brasil: EFVM)	ARENA
Vieira (2018)	Distribuição de lotes carregados de minério de ferro ferrovia-porto: uma abordagem por simulação a eventos discretos	Modelo de simulação simplificado e completo de um pátio de descarga de minério de ferro por rota de destino (Ferrovia-Porto) em nível tático. Avaliados trens maiores para verificar ociosidade.	Ferrovia (Brasil: EFVM)	ARENA

Fonte: O próprio autor.

3 Caso Estudado

A construção do modelo de simulação de eventos discretos foi baseada nas características e particularidades de uma empresa de mineração, a Vale S. A., que tem suas operações de pátio e porto localizadas no Espírito Santo. A Figura 10 ilustra um exemplo de pátio de estocagem de minério de ferro no Porto de Tubarão.

Figura 10 – Pátio de estocagem de minério de ferro no Porto de Tubarão (área nova)



Fonte: Google Maps (2019)

Neste capítulo serão descritos os principais elementos que compõem o pátio de armazenamento de minérios e o porto estudados e como o minério flui através destes elementos, desde a descarga do minério pelos viradores de vagões até o embarque pelos navios. Aqui faremos diferenciação entre os dois produtos, MF e PE.

Segundo Vieira (2018), o carregamento do MF é feito em vagões do tipo GDE nos pontos de carga, formando-se, assim, os trens em lotes de 84 vagões ou múltiplos. Para a pesquisa em questão será adotado vagão com 70 ton.

O sistema analisado (pátio de estocagem e porto) é parte de uma cadeia de suprimentos de minério de ferro. Foi considerada uma versão simplificada, com o

objetivo de planejar melhorias relacionadas à estocagem dos produtos no pátio e posterior embarque dos mesmos nos navios. Essas situações podem produzir gargalos de escoamento, atrasos e perda de produtividade, o que torna essas análises inevitáveis.

Essa versão simplificada do sistema foi baseada, basicamente, em trabalhos de Vieira (2018), Juliá (2010) e Zampirolli (2016), que desenvolveram simulações da cadeia (ou parte dela) de empresas brasileiras do ramo de extração de minério.

3.1 Pátio de estocagem

O pátio analisado faz parte da cadeia logística para exploração, processamento, transporte e exportação de minérios, composto basicamente pelas seguintes partes: mina, ferrovia e porto. O complexo mina-ferrovia-porto tem o percurso do MF, iniciando-se pela sua extração nas minas, o seu processamento, o transporte através de ferrovias, a descarga do MF dos vagões em viradores e o seu transporte via correias transportadoras até o pátio de estocagem, ou ainda, o transporte ao invés dos pátios, para as usinas, onde ocorre a pelotização (formação de PE, com diâmetros específicos para cada destino) com posterior estocagem nos pátios e, por último, o embarque destes produtos nos navios, onde serão enviados para os clientes.

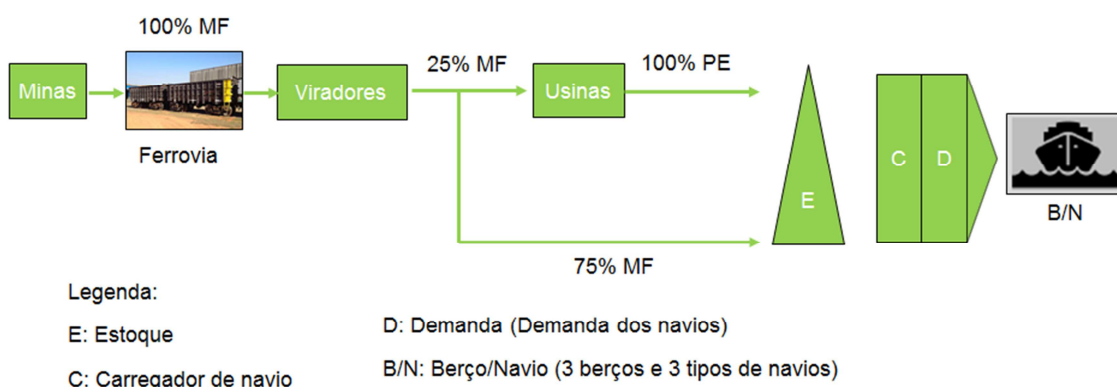
O minério de ferro extraído das minas passa por processamento e em seguida é transportado pela ferrovia. Como exemplo é citado dois tipos de produtos: finos (*sinter feed*) e super finos (*pellet feed*). Esses produtos chegam pelas ferrovias, passando por viradores de vagões, que são equipamentos responsáveis pela descarga do minério em correias transportadoras (MORAES, 2005) e (VALE, 2018). No modelo em questão são considerados 5 viradores de vagões, e para a análise deste estudo, chamou-se ambos os tipos de produtos (finos e super finos), apenas de MF.

A destinação do lote depende da demanda de cada tipo de produto e do seu destino final, portanto, a partir dos viradores, o MF pode ter dois destinos: aproximadamente 75% são encaminhados para os pátios de estocagem (demanda porto), e aproximadamente 25% deve ser encaminhado para as usinas de pelotização (demanda pelotização) (VIEIRA, 2018). No pátio de estocagem são construídas pilhas de minérios que aguardam para serem carregadas nos navios. Já o MF, que segue para as usinas de pelotização, onde serve de principal matéria-prima para a fabricação de PE, e

posteriormente seguirá para o pátio de estocagem. Dessa forma, o trabalho de pesquisa considera que toda a produção da empresa passa pelo seu pátio de estocagem de minério.

Portanto, a maior parte do produto embarcado no porto é de MF, levando em consideração a demanda individual de cada cliente. A Figura 11 mostra um diagrama do modelo simplificado, baseado em informações de visitas técnicas na empresa de mineração e informações de Santoro (2017).

Figura 11 – Diagrama do modelo simplificado



Fonte: Próprio autor e Santoro (2017)

Sabe-se que a pesquisa em questão é uma continuidade do simulador de Vieira (2018), o qual focou em uma modelagem, a partir das chegadas dos trens carregados de MF no pátio de destino (Porto), mas sem modelar o pátio em si, com os elementos que o constitui. Assim sendo, o presente trabalho modelou a trajetória do lote de MF desde a chegada ao pátio de estocagem do porto, isto é, após a descarga nos viradores e transferência de lotes por rota (rotas diretamente para as usinas, ou diretamente para estoque no pátio) até o seu destino final, que é o embarque nos navios.

O estoque, conforme Figura 11, é composto pelos pátios onde os produtos ficam armazenados aguardando o embarque nos navios, de acordo com a demanda de cada navio. A área do estoque possui um total de 11 pátios onde são estocadas as pilhas de MF e de PE (4 pátios, de menor capacidade, que constituem a área velha, e 7 pátios, de maior capacidade, localizados em uma região chamada de área nova). A Figura 12 ilustra os pátios da área velha e a Figura 10, os pátios da área nova.

Figura 12 – Pátio de estocagem de minério de ferro no Porto de Tubarão (área velha)



Fonte: Google Maps (2019)

Os pátios da área velha são nomeados de A até D e os pátios da área nova são nomeados de E até J (e um pátio adicional nomeado como P). A Tabela 2 apresenta a capacidade, em toneladas, de cada um dos pátios de estocagem, somando uma capacidade total de 3.340.000 toneladas.

Tabela 2 – Capacidade dos pátios

Pátio	Capacidade (t)
A	204.000
B	175.000
C	175.000
D	195.000
E	386.000
F	375.000
G	385.000
H	385.000
I	400.000
J	330.000
P	330.000
TOTAL	3.340.000

Fonte: O próprio autor.

As pilhas são formadas nos pátios através de equipamentos que se movimentam entre os pátios e nem sempre estão disponíveis para todos os pátios, pois são compartilhados. A Tabela 3 mostra a sigla dos equipamentos, a descrição, pátio de atuação das máquinas e a taxa de produtividade nominal.

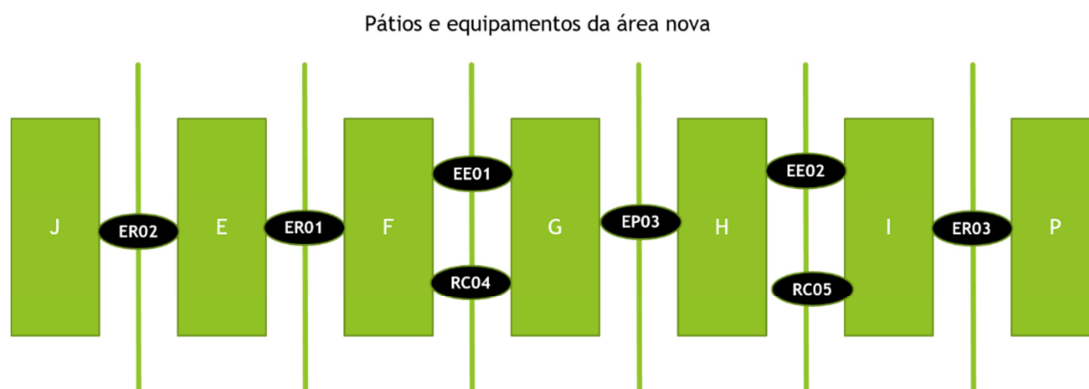
Tabela 3 – Localização e a produtividade dos equipamentos

Equipamento	Descrição	Pátios	Área	Produtividade (ton./h)
ER01	Empilhadeira/Recuperadora	E/F	Nova	8000
ER02	Empilhadeira/Recuperadora	J/E	Nova	8000
ER03	Empilhadeira/Recuperadora	I/P	Nova	8000
RC01	Recuperadora	A/B	Velha	6000
RC02A	Recuperadora	C/D	Velha	6000
RC03	Recuperadora	B/C	Velha	8000
RC04	Recuperadora	F/G	Nova	8000
RC05	Recuperadora	H/I	Nova	8000
EE01	Empilhadeira Escrava	F	Nova	16000
EE02	Empilhadeira Escrava	I	Nova	16000
EP01	Empilhadeira	A/B	Velha	6000
EP02	Empilhadeira	C/D	Velha	6000
EP03	Empilhadeira	G/H	Nova	16000
EP04	Empilhadeira	A	Velha	6000

Fonte: O próprio autor.

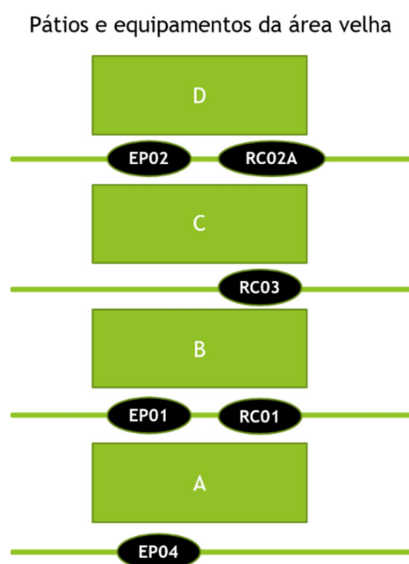
O procedimento de formação das pilhas é feito por um equipamento chamado empilhadeira e o procedimento de recuperação (retirada) das pilhas para embarque é feito por um equipamento chamado recuperadora. Existe outro equipamento que executa as duas funções, chamado de empilhadeira/recuperadora (híbrida) (*stacker-reclaimer*). As empilhadeiras escravas dependem da empilhadeira mestre (EP03) para operar, ou seja, as três empilhadeiras funcionam em conjunto e atendem aos pátios F, G, H e I, representando grande parte da movimentação de produtos na área nova. Porém, neste modelo simplificado, optou-se por inserir as empilhadeiras escravas como empilhadeiras de funcionamento independente por falta de detalhes do sistema real. As Figuras 13 e 14 mostram *layouts* contendo a posição dos equipamentos nos pátios, da área nova e da área velha, respectivamente.

Figura 13 – Layout dos pátios e equipamentos da área nova.



Fonte: Adaptado de Vale (2015)

Figura 14 – Layout dos pátios e equipamentos da área velha



Fonte: Adaptado de Vale (2015)

3.2 Sistema portuário

O sistema portuário, que foi base para a pesquisa é o Terminal Portuário de Minério de Ferro de Tubarão (TU), o qual tem o porto como na Figura 15.

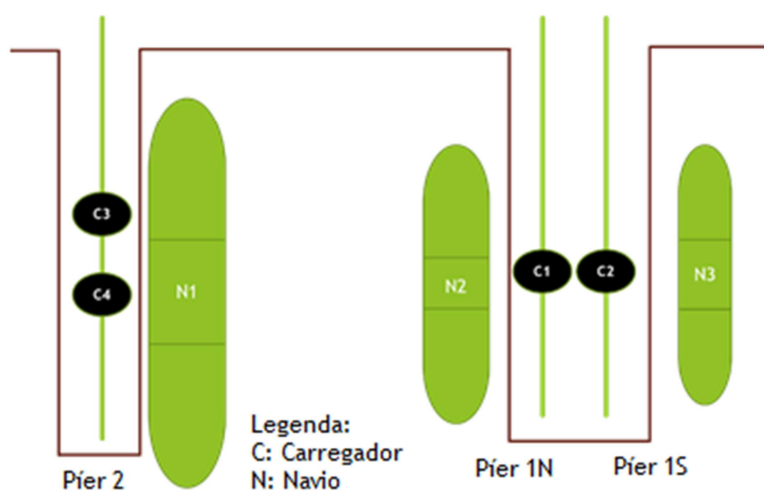
Neste trabalho, o porto estudado tem a sua finalidade limitada ao escoamento da produção, tanto de MF, quanto de PE. Toda a produção é escoada por uma área portuária, que possui três berços (1N, 1S e 2) distribuídos em 2 píeres (píer 1 e píer 2), onde os navios atracam para carregamento dos produtos, conforme Figura 16.

Figura 15 – Píer 1, Norte e Sul e Píer 2



Fonte: Vale (2015)

Figura 16 – Layout da área portuária



Fonte: Adaptado de Vale (2015)

O píer 2 comporta navios maiores (apenas 1 por vez) e possui 2 carregadores, e o outro píer (píer 1) possui, também, 2 carregadores e comporta 2 navios menores ao mesmo tempo.

Um total de três tipos de navios pode atracar no porto. O maior tipo com capacidade de carregar entre 180.000 e 390.000 tmn (toneladas métricas normais), chamados de navios *valemax*. Os demais tipos são os navios com capacidade de carregar entre 90.000 e 180.000 tmn (toneladas métricas normais), chamados de navios *capsize* e com capacidade de carregar entre 75.000 e 90.000 tmn (toneladas métricas normais), chamados de navios *panamax*.

Apenas os navios *valemax* podem atracar no píer 2, os demais navios podem atracar no píer 1, Norte (esquerda) e Sul (direita), de acordo com os cenários de simulação da seção 3.6.

Cada um dos três berços existentes no porto possui uma linha de carregamento, que funciona de forma diferente para os carregadores de navios (*ship loader*), que são equipamentos utilizados para carregamento de navios no cais, capazes de transferir a produção das correias transportadoras (desde os pátios) para os navios.

O berço 2 possui apenas uma linha de carregamento apesar de possuir dois carregadores de navios. Os carregadores não funcionam juntos, trabalham separadamente e de forma sequencial, ou seja, o material chega por correia transportadora e é embarcado através do carregador (C3), que carrega o produto nos porões, da primeira metade mais próxima do C3, do navio, e para compensar o peso, muda-se o carregador, para o C4 que passa a embarcar o próximo lote de produto para outros porões, da outra metade do navio, de forma a equilibrar o material. Portanto, o modelo simula uma única linha de carregamento para dois carregadores, com metade do produto sendo carregado pelo carregador C3 e a outra metade pelo carregador C4, até preencher todo o navio, de acordo com a sua capacidade máxima de carregamento.

Os berços 1N e 1S possuem duas linhas de carregamento, uma para cada carregador, porém com algumas particularidades. Para o píer 1, os carregadores podem trabalhar ao mesmo tempo, ambos embarcando produto no mesmo navio, ou cada carregador embarcando produto para cada um navio separadamente. Portanto, ambos os carregadores podem trabalhar em qualquer um dos berços (1N ou 1S), seja juntos no mesmo navio, ou separados por navio e berço.

3.3 Princípios para a modelagem do problema

O sistema integrado, que é proposto nesta pesquisa, é constituído por partes, chamadas de subsistemas. Estes subsistemas apresentam seus próprios objetivos que diferem entre si e que constituem o objetivo principal a ser desejado pelo todo. Portanto, cada parte do sistema tem os seus próprios objetivos que interagem e que alteram o resultado esperado, modificando o desempenho.

A análise integrada entre o pátio de estocagem e o porto permite entender o sistema como um todo, através da verificação dos efeitos causados ao se perturbar aspectos próprios de cada subsistema.

Com a finalidade de atingir os objetivos almejados, foram elaborados cenários, visando analisar possíveis impactos ao se alterar configurações de embarque de navios para aumento da capacidade do sistema pátio-porto em virtude da possibilidade de atracamento dos tipos de navios nos berços existentes.

O modelo de simulação desenvolvido considerou alguns pontos importantes da realidade pesquisada, para tanto se dispôs, além das referências bibliográficas pesquisadas e memorial descritivo disponível no site da empresa em Vale (2018), também de dados e informações do sistema obtidos, sobretudo em visitas técnicas e reuniões realizadas com colaboradores experientes da área de pátio e porto. Uma descrição detalhada do modelo codificado em linguagem ARENA pode ser encontrada no Apêndice. O modelo de simulação foi dividido em 3 (três) blocos, que são apresentados a seguir:

- **A operação de estocar material no pátio (Bloco 1)**, que envolve o processo de chegada de lotes de vagões carregados de MF, a escolha para envio de MF para o pátio, ou para as usinas para a fabricação de PE; e as lógicas de escolha do pátio, onde cada lote, referente a um tipo de material (MF ou PE) deve ser estocado, e qual equipamento será utilizado, para empilhar, a fim de estocar o material.
- **A operação dos navios (Bloco 2)**, que envolve o processo de chegada de navios, de escolha do berço para a atracação de cada tipo de navio, a desatracação dos navios e a saída dos navios carregados com o tipo de material embarcado.
- **A operação de carregamento dos navios (Bloco 3)**, que envolve as lógicas de escolha do pátio para a recuperação do material e a escolha do equipamento de recuperação (recuperadora) para retirar cada material do pátio a que pertence. As lógicas de escolha do carregador de navios a serem utilizadas para o embarque, e as lógicas para a formação do navio com carga completa.

Os dados utilizados para a construção do modelo foram oriundos de pesquisa bibliográfica, levantamento de campo, internet e estimados, porém baseados nos dados reais do Terminal Portuário de Minério de Ferro de Tubarão (TU) – pátio de estocagem e porto – para determinar o comportamento das variáveis de entrada do modelo. Essas variáveis estão detalhadas na seção 3.5.

Para cada bloco do modelo são descritas as variáveis de entrada. Já as alterações realizadas na lógica de operação do modelo para implementar os cenários de atracação e criação/chegada dos navios do sistema são descritas na seção 3.6.

3.3.1 A operação de estocar material no pátio

O bloco relativo à operação de estocar material no pátio (Bloco 1) inicia-se após a descarga pelos viradores dos lotes de MF. Esses lotes são direcionados pelas correias transportadoras que compõem as rotas para as pilhas de estocagem do porto (4 rotas) ou para as usinas de pelotização (3 rotas). Aqui, é quantificado o total de lotes descarregados. Contabiliza-se, a quantidade de lotes deste total que é direcionada imediatamente ao pátio de estocagem (área nova e área velha) e a outra quantidade de lotes que seguem para as 8 (oito) usinas de pelotização.

A quantidade de lotes de MF que seguem para as usinas passa por um processo de formação de PE. Para esse processo do sistema produtivo de pelotização foi utilizada a função Triangular (TRIA) para representar a produtividade de cada uma das usinas, detalhada na seção 3.5. Ao final desta ação, são encaminhados todos os lotes de MF e de PE para o pátio de estocagem (11 pátios no total), com a finalidade de armazenamento desses materiais em determinado pátio, porém antes disso, deve-se verificar a existência de espaço em pátio, e se as máquinas empilhadeiras, ou híbridas (empilhadeira/recuperadora), que o atendem estejam disponíveis, para assim carregar o material neste pátio em questão. A produtividade (ton./h) para esses equipamentos é também uma função TRIA, conforme seção 3.5.

A lógica para o empilhamento do MF e da PE é realizada simultaneamente. Para a lógica de empilhamento dos produtos é verificado se há espaço nos pátios da área nova e área velha, e se o equipamento, que atende aquele pátio está desocupado. Os pátios e equipamentos podem ser ocupados por qualquer produto (MF e/ou PE). A ocupação é

feita por lotes. Ao final, contabiliza-se a quantidade de lotes acumulado (em toneladas) de material empilhado de MF e PE e a quantidade em toneladas em estoque de MF e PE. Para tanto, o valor contabilizado em estoque é uma entrada para o Bloco 2, a operação dos navios.

As variáveis de entrada (independentes) deste bloco são:

- Taxa de produtividade das usinas;
- Taxa de produtividade dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento do material no pátio de estocagem (empilhadeira e máquina híbrida);
- Capacidade dos pátios.

As variáveis de saída (dependentes) deste bloco são:

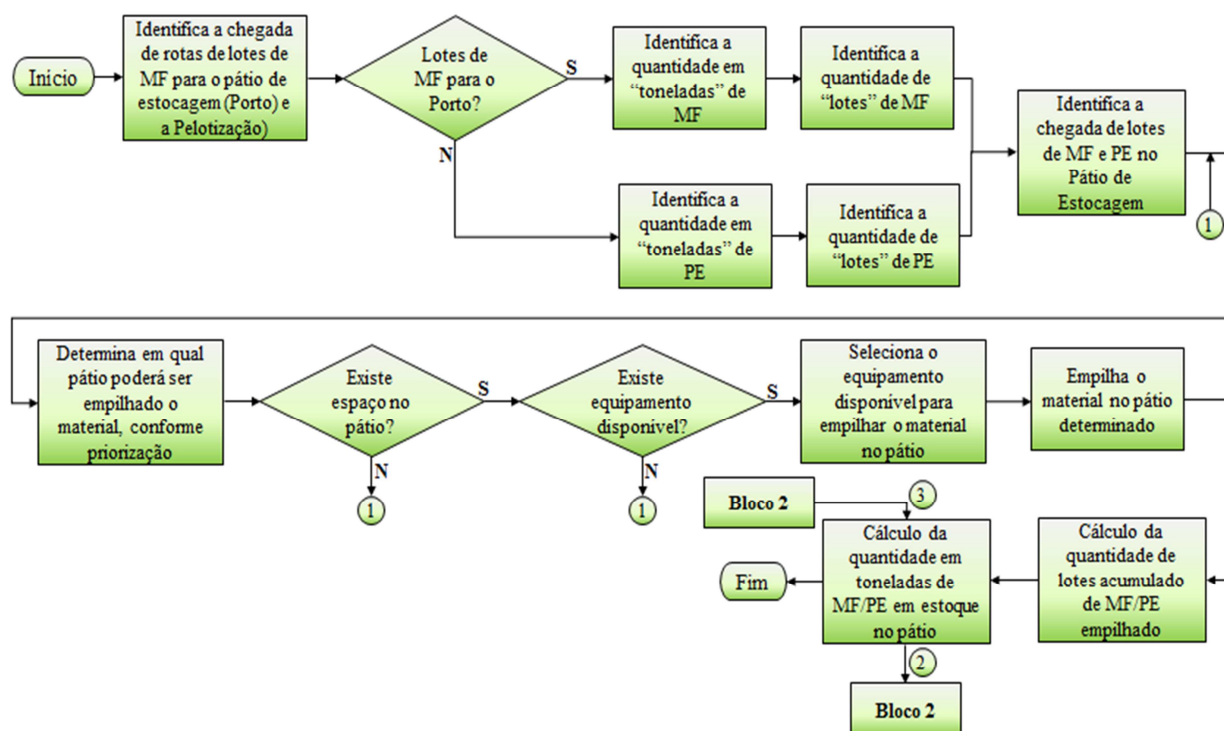
- Ocupação dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento do material no pátio (empilhadeira e híbrida);
- Ocupação das usinas;
- Ocupação acumulada dos pátios;
- Empilhamento acumulado dos pátios (MF/PE);
- Estoque acumulado dos pátios (MF/PE).

A variável intermediária (dentro do modelo):

- Estoque acumulado por pátio MF/PE (obs.: variáveis calculadas internamente no Bloco 1 e atualizada no Bloco 3).

A Figura 17 mostra o fluxograma referente à operação de estocar material no pátio (Bloco 1):

Figura 17 – Fluxograma referente à operação de estocar material no pátio



Fonte: O próprio autor.

3.3.2 A operação dos navios

O bloco relativo à operação dos navios (Bloco 2), inicia-se com a criação dos navios, detalhada na seção 3.5 (intervalo entre chegadas), sendo que cada tipo de navio (*panamax*, *cape-size* e *valemax*) é criado em momentos diferentes, ainda na seção 3.5, porém os valores (tempos de criação) se repetem para todos os cenários criados, e descritos na seção 3.6. Assim como foi utilizado no modelo de simulação de Vieira (2018), para o perfil da carga ferroviária (%Lote para o Porto = 75 e %Lote para Pelota = 25), o mesmo ocorre para a demanda de criação dos navios (%demanda de navios de MF = 75 e %demanda de navios de PE = 25). Portanto, para cada tipo de navio, 75% são de MF e o restante de PE.

Uma vez determinado o tipo de navio, a capacidade de embarque máxima, as possibilidades de berço para atracação que suportam aquele tipo de navio, o tipo de carga, que pode ser: MF ou PE, em seguida, o navio poderá atracar, caso tenha produto suficiente para o embarque completo do navio e o berço disponível. Após, é atualizada a capacidade (quantidade) em estoque (toneladas) de MF e de PE, sendo calculada no

Bloco 1 (estocar material no pátio), e depois do embarque por um navio, atualiza-se o valor no Bloco 2.

Após a sua chegada ao porto, mais detalhadamente, o navio entra em uma fila de espera, aguardando algum berço disponível. O sistema FIFO (*First in First Out*) é utilizado para priorizar a entrada dos navios no terminal. Caso essa regra seja quebrada, ou por não ter carga disponível no pátio de estocagem ou pelo berço disponível não suportar aquele tipo de navio. Como já explicado anteriormente, por exemplo, no píer 1, somente é possível atracar navios com capacidade máxima de 180.000 toneladas. A capacidade é função TRIA, segundo seção 3.5.

Após o navio atracado, o modelo passa para o Bloco 3, a operação de carregamento dos navios. Ao término do carregamento do navio (capacidade máxima é atingida), dá-se continuidade a sequência do Bloco 2, operação dos navios, pois o navio desatraca e um berço é desocupado, e em seguida, é enviado um comando para liberar um navio em fila de espera, a fim de que venha a ocupar o berço agora livre, caso esse berço seja específico para aquele tipo de navio. Por fim, contabiliza-se a quantidade de navios por tipo (*panamax*, *capsize* e *valemax*) que deixam o porto carregado de MF ou PE.

As variáveis de entrada (independentes) deste bloco são:

- Tempo médio entre chegadas de navios;
- Tempo de criação dos navios;
- Demanda de lotes por rota (Porto x Pelota);
- Capacidade dos navios;
- Berço para atracação por tipo de navio;

As variáveis de saída (dependentes) deste bloco são:

- Número de navios por tipo (*panamax*, *capsize* e *valemax*) que desatracam;
- Tempo em fila por píer (1S, 1N e 2);
- Número de navios em fila para atracar.

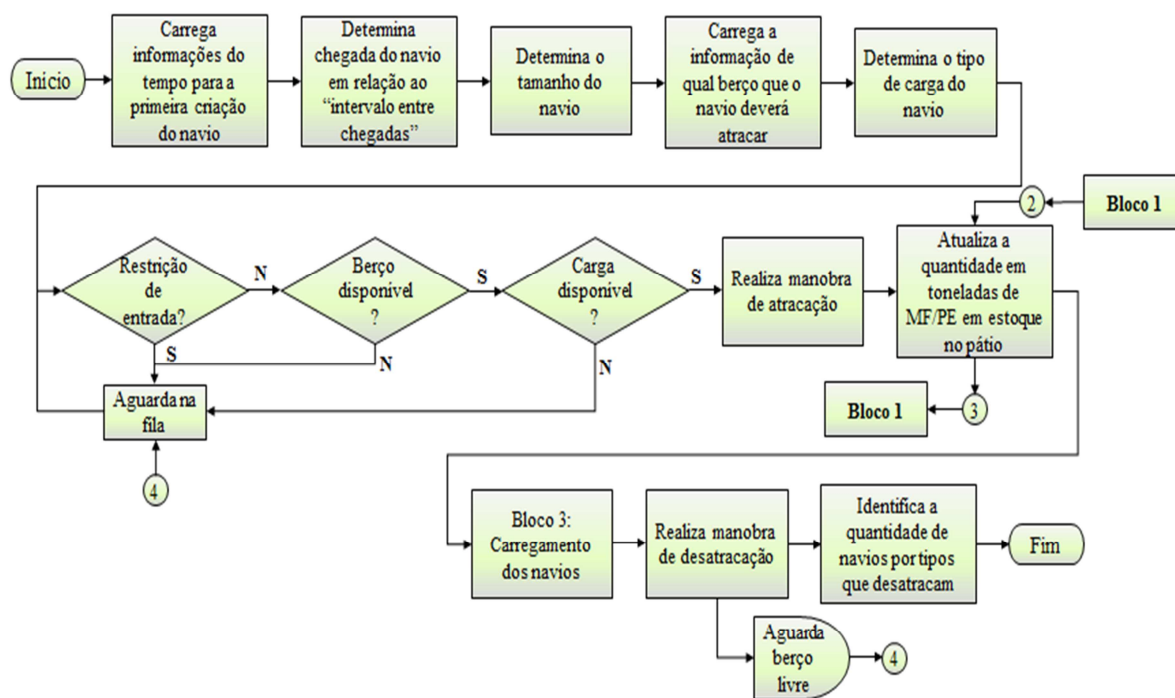
As variáveis intermediárias (dentro do modelo):

- Estoque acumulado dos pátios MF/PE (obs.: variáveis de saída do Bloco 1 e atualizadas dentro do Bloco 2);

- Berço disponível (Ocupa_Berço1S, Ocupa_Berço1N e Ocupa_Berço2).

A Figura 18 mostra o fluxograma referente à operação dos navios (Bloco 2):

Figura 18 – Fluxograma referente à operação dos navios



Fonte: O próprio autor.

3.3.3 A operação de carregamento dos navios

O bloco relativo à operação de carregamento dos navios (Bloco 3) inicia-se com a escolha, do pátio para recuperar o material (por lote) e do equipamento que será utilizado para retirar o material do pátio e enviá-lo para o carregamento do navio, propriamente dito. A escolha do pátio e da recuperadora ou máquina híbrida (empilhadeira/recuperadora) se dá basicamente por uma aleatoriedade, conforme o empilhamento, isto é, em pátios que iniciarem o empilhamento, tem prioridade na recuperação, ou melhor, iniciam, também, a sua recuperação, uma vez que a máquina esteja desocupada, para tal atividade.

Em função da quantidade de carga que será recuperada, que é o valor da capacidade máxima de um tipo de navio, inicia-se a recuperação, que acontece por lotes até compor a capacidade máxima do navio. O material recuperado segue, mais precisamente, para o

carregador (es) de navio, que é (são) específicos de um determinado píer, onde já se encontra atracado o navio próprio para o embarque daquele produto, que é suportado pelo berço correto, pois para cada berço existe um tipo (s) de navio (s) (*panamax*, *capsize* e *valemax*) que pode (m) atracar, segundo dado de entrada inserido manualmente no modelo, constituindo-se os 04 (quatro) cenários. Na realidade, por limitação física de tamanho para os berços, eles suportam tipos de navios específicos. Os cenários de simulação apresentam, basicamente, configurações diferenciadas entre tipos de navios e os berços que podem ocupar.

A operação de funcionamento dos carregadores já foi explicada na seção 3.2, pode-se notar que para o píer 1, ambos os carregadores podem funcionar ao mesmo tempo, podendo trabalhar sozinhos em berços diferentes, um em cada lado, ou em dupla virados para o mesmo lado (berço), em qualquer que seja o lado do píer (berço 1S ou 1N). Quanto ao píer 2, os carregadores não funcionam ao mesmo tempo.

Ao término do carregamento do navio (capacidade máxima), retorna-se ao Bloco 2, a fim de liberação dos navios carregados do Terminal.

As variáveis de entrada (independentes) deste bloco são:

- Taxa de produtividade dos carregadores de navio e das máquinas responsáveis pela retirada do material do pátio de estocagem (recuperadora e híbrida);

As variáveis de saída (dependentes) deste bloco são:

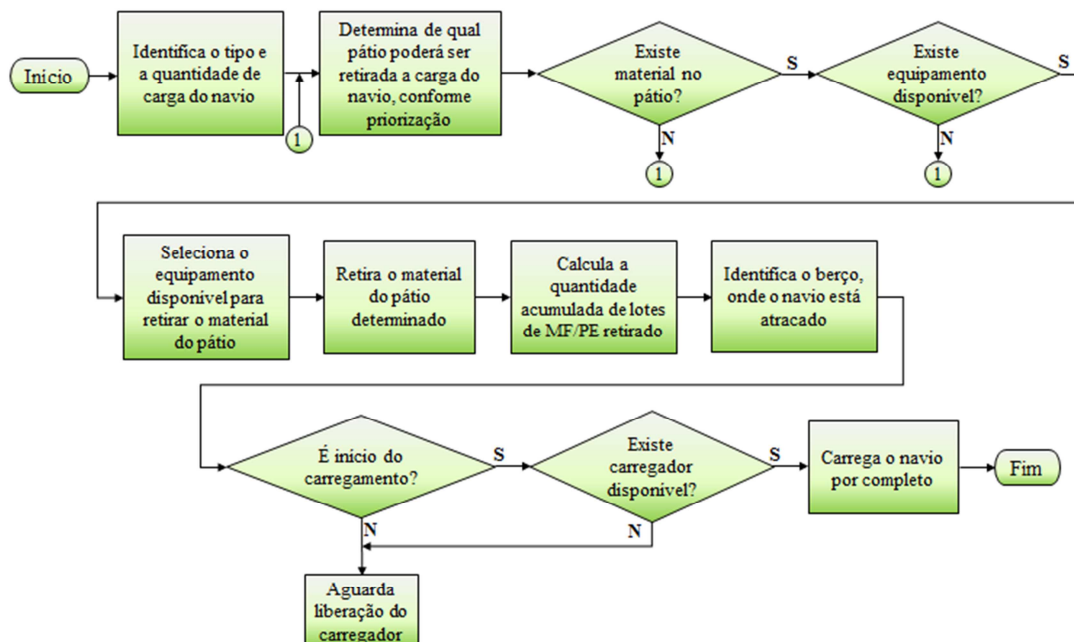
- Ocupação dos carregadores de navio durante o carregamento e das máquinas responsáveis pela retirada do material do pátio de estocagem (recuperadora e híbrida);
- Recuperação dos produtos.

As variáveis intermediárias (dentro do modelo):

- Estoque acumulado por pátio MF/PE (obs.: variáveis calculadas internamente no Bloco 1 e atualizada no Bloco 3);
- Carregador de navio disponível (Ocupa_Car01 e Ocupa_Car02).

A Figura 19 mostra o fluxograma referente à operação de carregamento dos navios (Bloco 3):

Figura 19 – Fluxograma referente à operação de carregamento dos navios



Fonte: O próprio autor.

3.4 Limitações do sistema

Ao se realizar a pesquisa em questão foi necessário assumir alguns requisitos e suposições, que surtiram como limitações ao modelo, delimitando-o a aplicações menos amplas, porém não houve prejuízo ao escopo proposto neste trabalho. Os pontos considerados os mais relevantes são a seguir relatados:

- Como já mencionado anteriormente, os dados de entrada utilizados para a construção do modelo foram oriundos de pesquisa bibliográfica, levantamento de campo, internet e estimados, porém baseados em dados reais do Terminal Portuário de Minério de Ferro de Tubarão (TU) – pátio de estocagem e porto – para determinar o comportamento das variáveis de entrada do modelo. Assume-se que comportamento das variáveis se manterá nos demais anos subsequentes do sistema.
- A simplificação do modelo considerou dois produtos: minério de ferro (MF) e pelotas (PE), conforme citado no início deste capítulo. Esta simplificação

fez-se necessária, pois para considerar os demais produtos (super fino e fino), ou até mesmo o granulado, que conforme mencionado pela empresa, em visita técnica, não estaria mais no escopo de trabalho do TU, seria necessário o desenvolvimento de uma lógica para sequenciamento da produção, que não é escopo deste trabalho. O agrupamento destes dois tipos de MF não interfere no modo de operação do modelo bem como na análise dos resultados, pois as restrições de empilhamento no pátio se referem apenas à capacidade de pátio e disponibilidade de equipamentos.

- Os pátios de estocagem não foram divididos em balizas, ou seja, marcações ao longo do pátio com espaçamento de 10m entre elas, e alguns pátios podem receber mais que um tipo de produto por vez.
- Como mencionado anteriormente, um navio só poderá atracar, caso tenha disponível no pátio a carga completa. O modelo não altera a sequência de produção em função da chegada de navios.
- Não é escopo deste trabalho o desenvolvimento de algoritmo de otimização para estocar os produtos no pátio e para dispor de um perfil ótimo de navios para o sistema. Nem tão pouco a determinação dos níveis de estoque de cada produto. O comportamento do sistema é sobre o efeito dos estoques iniciais.
- Este trabalho trata da análise de resultados do sistema integrado pátio-porto, para tanto foi modelado a partir da chegada dos lotes advindos do virador de vagões, o pátio de estocagem dos produtos e a área portuária para o recebimento dos navios. O restante da cadeia teve o modelo utilizado de Vieira (2018), sem se preocupar com as divisões do MF, e com ênfase nas rotas após os viradores, seguindo com o MF para o Porto (pátio) ou para a Pelotização.
- Para os cenários propostos, neste trabalho, somente aspectos ligados à chegada de navios no porto ou tipos de navios que podem atracar em determinados berços é que são estudados. Os cenários são comparados por um conjunto de métricas propostas como: ocupação, estoque, empilhamento e recuperação dos pátios; tamanho de fila; ocupação dos equipamentos, etc. Portanto, não são levados em consideração aspectos diversos, como mudanças em termos de *layout*, construções, paradas de manutenção para as máquinas dos pátios e porto, condições meteorológicas e influência da maré

nas manobras de atracação e/ou desatracação dos navios e aspectos ambientais.

3.5 Coleta de dados

A seguir serão mostrados todos os dados relevantes e utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, quanto à modelagem do sistema integrado pátio-porto, lembrando que é a continuação do modelo de pesquisa de Vieira (2018), portanto são incorporados os dados de Vieira (2018), cujo modelo é desde a criação de trens de MF advindos da mina, até a descarga e transferência de lotes de MF por rota, dos viradores do Porto de Tubarão. Todos os dados são utilizados para a obtenção dos resultados (seção 4) desta pesquisa.

Será mostrado, também, como cada um desses dados foi inserido na lógica do modelo, conforme descrito na seção 3.3. Assim sendo, os dados analisados foram:

- Dados referentes à operação de estocar material no pátio:
 - ✓ Taxa de produtividade das usinas;
 - ✓ Taxa de produtividade dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento do material no pátio de estocagem (empilhadeira e híbrida);
 - ✓ Capacidade de cada um dos pátios.
- Dados referentes à operação dos navios:
 - ✓ Tempo médio entre chegadas de navios;
 - ✓ Tempo de criação dos navios;
 - ✓ Demanda de lotes por rota (Porto x Pelotização);
 - ✓ Capacidade dos navios;
 - ✓ Berço para atracação por tipo de navio;
- Dados referentes à operação de carregamento dos navios:
 - ✓ Taxa de produtividade dos carregadores de navio e das máquinas responsáveis pela retirada do material do pátio de estocagem (recuperadora e híbrida);

Além desses dados, também, serão apresentados de forma sucinta os principais dados utilizados por Vieira (2018), que são essenciais ao presente trabalho e que são os dados referentes à operação de chegada de lotes no pátio de Tubarão para descarga por rota.

3.5.1 Dados referentes à operação de estocar material no pátio

Seguem a definição e a descrição de todos os dados de entrada referentes à operação de empilhamento dos materiais nos pátios, assim como a sua distribuição de probabilidade. E, de acordo com Kelton *et. al.* (2003) na ausência de dados empíricos, uma vez que se utilizam dados estimados, porém próximos ao real, como mencionados nos capítulos 1 e 3 para este trabalho, a seleção da distribuição de probabilidade poderá ser a triangular, através dos seus parâmetros sendo valores mínimo, máximo e da sua moda.

3.5.1.1 Taxa de produtividade das usinas

A produtividade (ton/h) das 8 (oito) usinas é uma função TRIA (400, 500, 600), na qual temos valores: mínimo, moda e máximo, respectivamente, 400, 500 e 600.

3.5.1.2 Taxa de produtividade dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento

A produtividade (ton/h) dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento, contendo 06 empilhadeiras (EP's e EE's), sendo 02 delas empilhadeiras escravas (EE's), e ainda 03 máquinas híbridas (ER's) é uma função TRIA, conforme listada na Tabela 4.

3.5.1.3 Capacidade dos pátios

A capacidade dos pátios é mostrada na Tabela 2.

Tabela 4 – Produtividade dos equipamentos de empilhamento

Equipamento	Produtividade (t/h)
EP01	TRIA(4500,5500,6000)
EP02	TRIA(4500,5500,6000)
EP03	TRIA(14500,15000,16000)
EP04	TRIA(4500,5500,6000)
EE01	TRIA(14500,15000,16000)
EE02	TRIA(14500,15000,16000)
ER01	TRIA(6000,7500,8000)
ER02	TRIA(6000,7500,8000)
ER03	TRIA(6000,7500,8000)

Fonte: O próprio autor.

3.5.2 Dados referentes à operação dos navios

Seguem a definição e a descrição de todos os dados de entrada referentes à operação dos navios, assim como a sua distribuição de probabilidade. E, de acordo com Kelton *et al.* (2003) na ausência de dados empíricos, uma vez que se utilizam dados estimados, porém próximos ao real, como mencionados nos capítulos 1 e 3 para este trabalho, a seleção da distribuição de probabilidade poderá ser a triangular, através dos seus parâmetros sendo valores mínimo, máximo e da sua moda.

3.5.2.1 Tempo médio entre chegadas de navios

Entende-se como as chegadas de navios nos píeres, como a demanda de embarque de produtos em cada píer e nos tempos de embarque, desta forma há uma aleatoriedade associada e a importância dos intervalos históricos entre navios. Porém, devido à ausência de dados reais, quanto ao comportamento de chegada de navios no Porto de Tubarão, escolhemos a distribuição triangular para descrever esta demanda. A Tabela 5 mostra esse pressuposto, referente aos cenários: 1, 2 e 3. A Tabela 6 mostra o intervalo entre chegadas para o cenário 4. No capítulo 3.6 é descrito cada um dos cenários.

A tabela 5 apresenta para o navio *Panamax*, a função TRIA (34, 40, 49), que significa um valor de moda de 40h, que quer dizer 18 navios por mês, naquele píer

considerado em função do cenário escolhido, ver seção 3.6. O mesmo entendimento para os demais tipos de navios.

Tabela 5 – Intervalo entre chegadas dos navios – cenários de 1 a 3

Navio (Tipo)	Intervalo entre chegadas (h)
<i>Panamax</i>	TRIA(34,40,49)
<i>Capesize</i>	TRIA(30,36,45)
<i>Valemax</i>	TRIA(150,180,200)

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6 – Intervalo entre chegadas dos navios – cenário 4

Navio (Tipo)	Intervalo entre chegadas (h)
<i>Panamax</i>	TRIA(30,36,45)
<i>Capesize</i>	TRIA(20,28,35)
<i>Valemax</i>	TRIA(100,120,140)

Fonte: O próprio autor.

3.5.2.2 Tempo de criação dos navios

Cada tipo de navio (*panamax*, *capesize* e *valemax*) é criado em momentos diferentes, na simulação, porém os valores (tempos de criação) se repetem para cada um dos cenários criados, e descritos na seção 3.6. Os tempos de criação para o *panamax*, *capesize* e *valemax*, são respectivamente, 130h, 150h e 180h.

3.5.2.3 Demanda de lotes por rota

De acordo com o capítulo 3, o percentual de demanda para descarga de lotes por rota, que é o mesmo que dizer o percentual de demanda de MF para o Porto (pátio de estocagem) e para a Pelotização (usinas) são 75% e 25%, respectivamente.

3.5.2.4 Capacidade dos navios

Assim como ocorreu para o tempo médio entre chegadas de navios, a capacidade dos tipos de navios, também, utilizou a distribuição triangular para descrever os seus valores de dados de entrada. A Tabela 7 mostra esses dados.

Tabela 7 – Capacidade dos navios

Navio (Tipo)	Capacidade (t)
<i>Panamax</i>	TRIA(75000,85000,90000)
<i>Capesize</i>	TRIA(90000,155000,180000)
<i>Valemax</i>	TRIA(180000,350000,390000)

Fonte: O próprio autor.

3.5.2.5 Berço para atracação por tipo de navio

Para cada um dos 4 (quatro) cenários, descritos na seção 3.6, verifica-se diferenças entre eles, basicamente, nos tipos de navios que podem atracar nos píeres e berços. Portanto, cada berço deverá atracar o (s) tipo (s) de navio (*panamax*, *capsize* ou *valemax*) que estejam em conformidade com os dados de entrada, anteriormente, especificados pelos cenários. Observar a seção 3.6, que descreve os cenários.

Para tal, cada tipo de navio recebe uma numeração, que é dado de entrada, que especifica se aquele berço poderá recebê-lo e, assim, descrevem-se os diferentes cenários. Se o tipo de navio recebe o dado de entrada como sendo o numeral “1” significa que aquele tipo de navio somente poderá atracar no berço 1S, se o numeral for “2” significa que somente poderá atracar no berço 1N, se o numeral for “3” somente no berço 2. Caso o numeral seja “5” aquele tipo de navio poderá atracar em ambos os berços 1S e 1N. O numeral “4” ficou vago para algum berço a ser construído no futuro.

3.5.3 Dados referentes à operação de carregamento dos navios

Seguem a definição e a descrição de todos os dados de entrada referentes à operação de carregamento dos navios, assim como a sua distribuição de probabilidade. E, de acordo com Kelton *et. al.* (2003) na ausência de dados empíricos, uma vez que se

utilizam dados estimados, porém próximos ao real, como mencionados nos capítulos 1 e 3 para este trabalho, a seleção da distribuição de probabilidade poderá ser a triangular, através dos seus parâmetros sendo valores mínimo, máximo e da sua moda.

3.5.3.1 Taxa de produtividade dos carregadores e dos equipamentos responsáveis pela recuperação

A produtividade (ton/h) dos equipamentos responsáveis pela retirada dos materiais do pátio, contendo 05 máquinas (RC's) e ainda 03 máquinas híbridas (ER's). Além da taxa de produtividade dos 04 carregadores de navios (CN's) é uma função TRIA, conforme listada na Tabela 8.

Tabela 8 – Produtividade dos carregadores e equipamentos que recuperam

Equipamento	Produtividade (ton/h)
RC01	TRIA(4500,5500,6000)
RC02A	TRIA(4500,5500,6000)
RC03	TRIA(6000,7500,8000)
RC04	TRIA(6000,7500,8000)
RC05	TRIA(6000,7500,8000)
ER01	TRIA(6000,7500,8000)
ER02	TRIA(6000,7500,8000)
ER03	TRIA(6000,7500,8000)
CN01A	TRIA(12000,12850,13350)
CN02A	TRIA(12000,12850,13350)
CN03	TRIA(14500,15000,16000)
CN04	TRIA(14500,15000,16000)
*CN01A_e_02A	TRIA(24000,25700,26700)

Fonte: O próprio autor.

*CN01A_e_02A significa um equipamento equivalente em produtividade aos 02 (dois) carregadores (CN01A e CN02A), localizados no píer 1, funcionando ao mesmo tempo e juntos, para o carregamento do mesmo navio atracado naquele píer. O funcionamento está descrito na seção 3.2.

3.5.4 Dados referentes à operação de chegada de lotes no pátio de Tubarão para descarga por rota

O modelo de simulação desenvolvido por Vieira (2018) representa o modelo operacional de chegada de trens e descarga de MF por virador e por rota de destino. As variáveis de entrada utilizadas e observadas no modelo de simulação desta autora são apresentadas e descritas a seguir:

- ✓ **Tempo médio entre chegadas de trens:** as chegadas de trens se baseiam na demanda de carregamento de MF e nos tempos de carregamento na ferrovia, assim sendo, existe uma aleatoriedade associada, portanto consideram-se os intervalos entre trens históricos. A função de distribuição de menor erro quadrático foi a Erlang gerado pelo *Input Analyser* bem como sua equação associada $(-0.001 + \text{ERLA}(34.5, 2))$. Em Kottegoda (2008) é mostrada essa distribuição.
- ✓ **Demanda de lotes por rota:** idem na seção 3.5.
- ✓ **Percentual de trens com 168 vagões e 252 vagões:** a configuração do tamanho de trens na chegada pode ser com 168 vagões ou com 252 vagões, os quais são modelos padronizados na EFVM e mais comuns para o transporte de MF. O modelo foi de 50% para cada tipo de trem.
- ✓ **Tempo de manobra:** Os trens com 168 ou 252 vagões são desmembrados após chegarem ao porto, resultando em dois ou três lotes de 84 vagões. Nessa ação são utilizadas locomotivas para a manobra no local. Foi utilizada função TRIA (4,5,6) min, para representar o tempo gasto nesta operação.
- ✓ **Tempo de descarga por virador:** O tempo efetivo de descarga do vagão pelo virador e transferência por rota de um lote, caindo sobre uma correia transportadora destinada aos pátios ou usinas é em torno de 75 min, sendo utilizada a função TRIA (70,75,80) min para representar o tempo de alocação dos recursos virador e rota.
- ✓ **Tempo indisponível (para manutenção) dos viradores e rotas:** as manutenções dos viradores tinham registro oficial e com frequência mensal, bem como o tempo médio de duração. Foi utilizada para frequência uma função exponencial, que é descrita em Kottegoda (2008), expo (744), para

cada um dos 5 (cinco) viradores, e com tempo de duração uma função TRIA, diferente para cada virador, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Falha dos viradores

Equipamento	Frequência (h)	Tempo médio de duração (h)
VV1	expo(744)	TRIA(49,49,49)
VV2	expo(744)	TRIA(37.3,37.3,37.3)
VV3	expo(744)	TRIA(44.1,44.1,44.1)
VV4	expo(744)	TRIA(43.8,43.8,43.8)
VV5	expo(744)	TRIA(36.1,36.1,36.1)

Fonte: O próprio autor.

3.6 Cenários de simulação

De acordo com Juliá (2010), segundo Geerdes (2004), nos projetos do mercado transoceânico de minério de ferro, os investimentos relacionados às melhorias no pátio e na área portuária representam 5% do total de capital empregado, o que ressalta a importância não só de realização desses investimentos, mas também de um bom planejamento do impacto e dos custos dos mesmos.

Uma importante ferramenta para alcançar esse objetivo e dar suporte na tomada de decisões é a simulação, através da construção do modelo e de cenários que visam investigar e analisar a situação atual da empresa com relação à capacidade de estoque e de escoamento, equipamentos e estrutura (*layout*), bem como verificar hipóteses, cenários em que se apresentam problemas e também possíveis melhorias.

Os cenários desenvolvidos para este trabalho foram obtidos através de mudanças relacionadas ao modo de operação do sistema integrado pátio-porto, referente aos diferentes tipos de navios que devem atracar em cada berço e ao intervalo entre chegadas. O cenário 1 é o cenário de referência, ou seja, os demais cenários são modificações realizadas neste cenário (padrão), e são os que seguem:

- **Cenário 1 (Berço):** Considere navios *panamax* e *capesize* atracando no píer 1 (Norte e Sul), com o objetivo de avaliar o ganho de embarcar apenas navios destes tipos no píer 1, uma vez que possuem maiores capacidades de embarque comparados a somente embarcar navios *panamax* no berço 1S e

capeize no berço 1N, o que ocorre no cenário 2. No píer 2 somente atracarão navios do tipo *valemax*.

- **Cenário 2 (Berço):** Considere apenas navios do tipo *panamax* atracando no berço sul do píer 1 (1S) e somente navios do tipo *capeize* no berço norte do píer 1 (1N), com o objetivo de avaliar o ganho de embarcar apenas navios destes tipos em cada berço 1S e 1N, respectivamente, uma vez que navios *panamax* necessitam de berços menores. No píer 2 continuarão atracando somente navios do tipo *valemax*.
- **Cenário 3 (Berço):** Considere navios do tipo *panamax* e *capeize* atracando no berço sul do píer 1 (1S) e somente navios do tipo *capeize* no berço norte do píer 1 (1N), com o objetivo de avaliar o ganho de embarcar navios destes tipos no berço 1S, uma vez que navios *capeize* apresentam maior capacidade comparados ao *panamax*. No píer 2 continuarão atracando somente navios do tipo *valemax*.
- **Cenário 4 (Intervalo entre chegadas de navios):** Considere o cenário 1, mas com mudança no intervalo entre chegadas dos navios, conforme Tabela 6.

A Tabela 6 apresenta para o navio *Panamax*, a função TRIA (30, 36, 45), que significa um valor de moda de 36h, que quer dizer 20 navios por mês, naquele píer considerado. O mesmo entendimento para os demais tipos de navios.

A seguir a Tabela 10, contendo o resumo dos dados de entrada do modelo:

Tabela 10 – Dados de entrada do modelo

		Valor		Un.
Chegada de lotes	Intervalo entre chegadas de trens	-0.001 + ERLA(0.575, 2)		h
	%Lote para o Porto	75		%
	%Lote para Pelotização	25		%
	% trens 168	50		%
	% trens 252	50		%
	Tempo de manobra	TRIA (0.067, 0.083, 0.1)		h
	Tempo de descarga por virador	TRIA (1.17, 1.25, 1.33)		h
	Tempo em falha dos viradores	Tabela 9		h
Empilhamento	Taxa produtividade das usinas	TRIA(400,500,600)		t/h
	Taxa produtividade equipamentos que empilham	Tabela 4		t/h
	Capacidade dos pátios	Tabela 2		t
Operação	Intervalo entre chegadas de navios <i>panamax</i> (h)	(Cenários 1/2/3) TRIA(34,40,49)	(Cenário 4) TRIA(30,36,45)	h
	Intervalo entre chegadas de navios <i>panamax</i> (h)	(Cenários 1/2/3) TRIA(34,40,49)	(Cenário 4) TRIA(30,36,45)	h
	Intervalo entre chegadas de navios <i>valemax</i> (h)	(Cenários 1/2/3) TRIA(150,180,200)	(Cenário 4) TRIA(100,120,140)	
	Tempo de criação dos navios	130, 150 e 180 (<i>panamax</i> , <i>capsize</i> e <i>valemax</i>)		h
	%Lote para o Porto	75		%
	%Lote para Pelotização	25		%
	Capacidade dos navios	Tabela 7		t
	Berço para atracação por tipo de navio	“1”, “2”, “3” ou “5” (ver seção 3.5)		*NA
Carregamento	Taxa produtividade carregadores e equipamentos que recuperam	Tabela 8		t/h

Fonte: O próprio autor.

*NA: significa Não Aplicável.

3.7 Metodologia para construção do modelo de simulação

A metodologia utilizada para a criação do modelo de simulação proposto segue as quatro etapas recomendadas por Freitas Filho (2008), conforme Figura 8, as quais são relatadas a seguir:

a) Etapa de planejamento:

Esta etapa é dividida em 4 (quatro) subetapas e são descritas de uma forma sucinta e que gira em torno do planejamento do projeto. Primeiramente, consiste em identificar a necessidade de se avaliar cenários operacionais para o sistema integrado pátio-porto, assim compreendendo o problema, isto é, o porquê dele ser estudado, quais as premissas a serem consideradas, quais os resultados esperados e como deve ser avaliado o sistema.

Diante disso, foram realizadas visitas técnicas nos pátios de estocagem e no CCO (Centro de Controle Operacional) do Porto de Tubarão e reuniões de planejamento do projeto de simulação, onde se definiu o objetivo do sistema a ser modelado, o escopo e algumas análises para o desenvolvimento do modelo. Definidas algumas métricas para medir o desempenho de configurações propostas. O produto final dessa subetapa está descrito na seção 1.1 deste trabalho.

Ainda dentro dessa etapa foram determinadas algumas necessidades, como: pessoal, recursos, cronograma para o projeto e a definição dos cenários considerados nas análises, que podem ser consultados na seção 3.6. Após a disponibilidade da equipe de projeto e licenças de *software* é que essa outra subetapa pode ser concluída.

Dando continuidade, a elaboração de um esboço do sistema, com suas variáveis, parâmetros, componentes e interações lógicas. Muita cautela ao se passar o modelo conceitual com seus detalhes para o modelo computacional, que foi dividido em três subsistemas e pode ser consultado na seção 3.3. Por fim, também coletadas informações dos funcionários que acompanharam as visitas, ajudando no entendimento do contexto como um todo.

b) Etapa de modelagem:

Esta etapa é dividida em 3 (três) subetapas e são descritas de uma forma sucinta e que gira em torno do modelo do projeto.

Primeiramente, consiste na coleta de dados, permitindo uma análise crítica do modelo, de forma que os dados puderam ser usados para alimentar os parâmetros do modelo, anteriormente definidos. Na seção 3.5 estão os dados coletados utilizados na simulação.

Posteriormente, a tradução do modelo, que é a transcrição do modelo conceitual para a linguagem de simulação. O software utilizado foi o ARENA.

Por fim, a verificação e validação do modelo, ou seja, se os resultados que o modelo gera são representativos dos resultados do real. Esta subetapa não pode ser testada em virtude da impossibilidade de obtenção dos dados reais da empresa do estudo de caso.

c) Etapa de experimentação:

Esta etapa, também, é dividida em 3 (três) subetapas e são descritas de uma forma sucinta e que consistem em: projetar experimentos, a fim de que gerem informações desejadas e determinar como o processamento computacional no projeto será executado. E, ainda obter os dados, via simulação dos cenários. Essas informações referentes às subetapas estão nas seções 3.6, 3.9 e 4. A interpretação e análise dos resultados, também, faz parte desta etapa e está na seção 4.5.

d) Tomada de decisão e conclusão do projeto:

Esta etapa é dividida em 2 (duas) subetapas e são descritas de uma forma sucinta e que consiste na comparação dos cenários com a finalidade de identificar a melhor alternativa e ao final elaborar a documentação do sistema e os resultados obtidos. As informações referentes a esta etapa são apresentadas na seção 5, bem como algumas recomendações.

3.8 O modelo de simulação

O modelo de simulação desenvolvido é do tipo: dinâmico, probabilístico e discreto. Representa o modelo operacional de chegada de trens e descarga de MF por virador e por rota de destino, conforme trabalho de Vieira (2018) e também representa, complementando o trabalho da autora; a chegada dos lotes de MF ao complexo portuário, dando sequência direta ao pátio de estocagem, ou indireta, passando antes pelas usinas de pelotização (PE) e depois ao pátio, para enfim todos os produtos (MF e PE) seguirem aos porões dos navios. O modelo desenvolvido e as experimentações foram formados pelos elementos principais de Banks *et. al.* (2009), Kelton *et. al.* (2014), Law e Kelton (1991) e Prado (2014), descritos na seção 2.3, e serão brevemente apresentados a seguir:

a) Entidades:

As principais entidades do trabalho de Vieira (2018) são:

- ✓ Lotes de 84 vagões GDE.

As principais entidades do presente trabalho são:

- ✓ Lotes de 84 vagões GDE;
- ✓ Navios *panamax*, *cape-size* e *valemax*.

b) Recursos:

Os recursos disponibilizados no modelo do trabalho de Vieira (2018) foram:

- ✓ Locomotivas de manobra;
- ✓ Viradores de vagões;
- ✓ Rotas de transferência.

Os recursos disponibilizados no modelo do presente trabalho foram:

- ✓ Empilhadeiras (seção 3.1);
- ✓ Empilhadeiras/Recuperadoras (híbridas) (seção 3.1);
- ✓ Recuperadoras (seção 3.1);
- ✓ Carregadores de navio (seção 3.2);
- ✓ Usinas: total de 8 (oito) unidades que podem operar concomitantemente.

Obs.: Os berços não foram tratados como recursos neste trabalho de pesquisa, porém como atributos. O atributo é incorporado à entidade. Os berços são características da entidade navio. Portanto, a ocupação dos berços se refere aos equipamentos de carregamento.

c) Variáveis envolvidas no problema:

As variáveis do trabalho de Vieira (2018) são:

Variáveis independentes:

- ✓ Tempo médio entre chegadas de trens;
- ✓ Demanda de lotes por rota;
- ✓ Percentual de trens com 168 vagões e 252 vagões;

- ✓ Tempo de manobra;
- ✓ Tempo de descarga por virador;
- ✓ Tempo indisponível (para manutenção) dos viradores e rotas.

Variáveis dependentes:

- ✓ Número de trens;
- ✓ Quantidade de lotes descarregados por rota;
- ✓ Quantidade total de lotes descarregados;
- ✓ Tempo em fila para manobra de locomotivas;
- ✓ Tempo em fila para as rotas;
- ✓ Percentual de utilização das locomotivas;
- ✓ Percentual de utilização dos viradores;
- ✓ Percentual de utilização das rotas.

As variáveis do presente trabalho são:

Variáveis independentes:

- ✓ Taxa de produtividade das usinas;
- ✓ Taxa de produtividade dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento do material no pátio de estocagem (empilhadeira e máquina híbrida);
- ✓ Capacidade dos pátios;
- ✓ Tempo médio entre chegadas de navios;
- ✓ Tempo de criação dos navios;
- ✓ Demanda de lotes por rota (Porto x Pelota);
- ✓ Capacidade dos navios;
- ✓ Berço para atracação por tipo de navio;
- ✓ Taxa de produtividade dos carregadores de navio e das máquinas responsáveis pela retirada do material do pátio de estocagem (recuperadora e híbrida);

Obs.: a máquina híbrida aparece, tanto como taxa de produtividade para o empilhamento, quanto para a recuperação, uma vez que elas realizam as duas atividades no pátio de estocagem (empilhar e recuperar).

Variáveis dependentes:

- ✓ Ocupação dos equipamentos responsáveis pelo empilhamento do material no pátio (empilhadeira e híbrida);
- ✓ Ocupação das usinas;
- ✓ Ocupação acumulada dos pátios;
- ✓ Empilhamento acumulado dos pátios (MF/PE);
- ✓ Estoque acumulado dos pátios (MF/PE);
- ✓ Número de navios por tipo (*panamax*, *cape-size* e *valemax*) que desatracam;
- ✓ Tempo em fila por píer;
- ✓ Número de navios em fila para atracar;
- ✓ Ocupação dos carregadores de navio durante o carregamento e das máquinas responsáveis pela retirada do material do pátio de estocagem (recuperadora e híbrida);
- ✓ Recuperação dos produtos.

d) Filas:

As filas do trabalho de Vieira (2018) estavam relacionadas à espera da entidade lote para a utilização dos recursos: locomotivas, viradores e rotas. Caso o recurso estivesse ocupado, os que chegassem durante sua utilização, deveriam aguardar em fila até que o recurso mudasse seu evento para disponível.

As filas do presente trabalho estão relacionadas também à espera da entidade lote para utilização pelos recursos: usinas, empilhadeiras, recuperadoras e carregadores de navios e máquinas híbridas. Além, das filas relacionadas à espera da entidade navios, para a ocupação do berço. Sendo o berço, conforme subseção 3.3.2, variável.

e) Eventos:

Os eventos principais de Vieira (2018), que podem ser descritos do modelo são: a chegada de trens, as manobras dos lotes (desmembramento e posicionamento), a descarga dos lotes nos viradores de vagões, e o roteamento dos lotes para as áreas de estocagem.

Os eventos principais do presente trabalho que podem ser descritos do modelo são: as manobras dos lotes nas máquinas (empilhadeiras, recuperadoras, híbridas, carregadores), a escolha dos lotes para as áreas de estocagem (pátios), chegada dos navios, a atracação dos navios nos berços.

3.9 Ferramentas e parâmetros de simulação

O modelo de simulação desenvolvido foi implementado no *software* Arena versão completa 15.1. Nesta versão foi avaliado um horizonte de médio prazo de 120 dias sem restrições. Foi utilizado um computador com sistema operacional Windows 10 64bits, com processador core i7 modelo 7700K com CPU de 4,20GHz, 16GB de memória RAM e HD de 1 TB de armazenamento.

De acordo com Juliá (2010, p. 120) “replicação representa o período de tempo em que uma simulação será gerada”. E, o “número de replicação é uma repetição da simulação do modelo, com a mesma configuração, a mesma duração e com os mesmos parâmetros de entrada, mas com uma semente de geração dos números aleatórios diferentes”. Mesmo os dados e os parâmetros de entrada serem os mesmos, os números aleatórios que são gerados são diferentes, portanto cada rodada (replicação) obterá uma saída diferente.

Nas simulações foram adotadas um número máximo de 5 replicações, desconsiderando-se para a simulação o tempo de *warm up* e, assim, o tempo total de simulação avaliado foi efetivamente de 120 dias. Cada rodada de simulação durou em torno de 40 segundos.

Foi escolhida esta configuração, por acreditar que 30 dias seriam insuficientes para algumas das variáveis de entrada e de saída, que possuem frequência de ocorrência de meses. Desta forma, adotando replicações de 4 meses, os resultados dos cenários simulados poderiam se aproximar melhor dos dados reais e estariam numa base de comparação mais aproximada, o que não seria obtido para um ano, podendo ser acumulativo de erros de simplificações e outros, em virtude da não representatividade do sistema real ou do projetado, conforme os dados de entrada do modelo explicitados, quanto a sua aquisição na subseção 1.1.2 (objetivos específicos) e seção 3.3 (Princípios para a modelagem do problema).

Como os dados de entrada do modelo não foram baseados em curvas estatísticas retiradas dos dados históricos da empresa do caso estudado, os resultados obtidos não puderam ser validados. Portanto, os dados sobre ocupação dos equipamentos, ocupação dos pátios, empilhamento e estoque acumulados dos pátios e outros não puderam ser confrontados. Assim sendo, os pressupostos e as simplificações que foram desenvolvidas no modelo computacional serviram, simplesmente, para análises de cenários e apresenta-se como uma etapa importante de um projeto em desenvolvimento.

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados e suas análises, por cenários de simulação de eventos discretos, cujos cenários estão descritos na seção 3.6.

Inicialmente foi mantida uma configuração padrão para o sistema integrado pátio-porto (cenário 1), porém variando-se as opções de mudanças no porto, o que corresponde aos tipos de navios possíveis que podem atracar em determinados berços, originou-se os demais cenários. A seguir, para cada alternativa do porto (cenários de 1 a 4), serão avaliadas as modificações em valores médios, para: a quantidade de navios por tipo (*panamax*, *cape-size* e *valemax*) que desatracam, o tempo em fila por píer, quantidade de navios em fila para atracar. Além da ocupação dos equipamentos (empilhadeiras, recuperadoras, carregadores e máquinas híbridas), a ocupação das 8 (oito) usinas e a ocupação dos viradores em Vieira (2018).

Após a avaliação dos resultados obtidos por cenários, algumas métricas propostas, inicialmente, para medir o desempenho do sistema sofreram alterações que geraram comparação entre os cenários, para o período de simulação de 100 dias, eliminando-se 20 dias (tempo de aquecimento). São elas (em valores médios): o giro de estoque, a ocupação dos pátios, o estoque (MF e PE), o empilhamento (MF e PE) e a recuperação dos produtos.

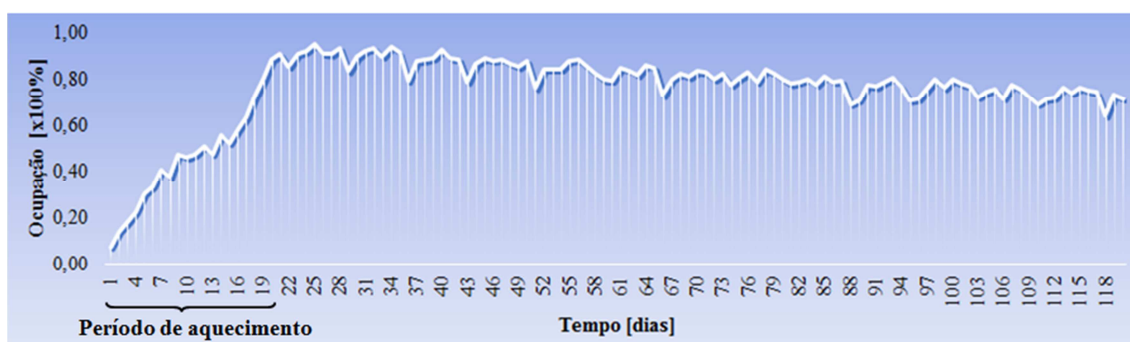
- Giro de estoque: quantidade de produto embarcado (t)/ estoque estático (t). Sendo que para o presente trabalho o produto embarcado é o mesmo que recuperado, além do que para o cálculo foi utilizado recuperado diário. E, o valor para o estoque estático é de 3.340.000t (Tabela 2);
- Ocupação dos pátios: relevante para todos os cenários. É possível observar a ocupação média acumulada dos pátios;
- Estoque: relevante para todos os cenários. É possível observar a quantidade de produto (MF e PE) estocado, em valores médios, e, também, acumulados dos pátios;
- Empilhamento: relevante para todos os cenários. É possível observar a quantidade de produto (MF e PE) empilhado, em valores médios, e, também, acumulados dos pátios.

- Recuperação: relevante para todos os cenários. É possível observar a quantidade de produto (MF e PE) recuperados, em valores médios, e, também, acumulados dos pátios.

Apesar das simulações apresentarem um tempo total de 120 dias, configurado no Arena e já comentado na seção 3.9, os 20 dias de período de aquecimento foram eliminados, manualmente, para a análise do giro de estoque e as análises acumuladas: da ocupação, do estoque, do empilhamento e da recuperação dos pátios.

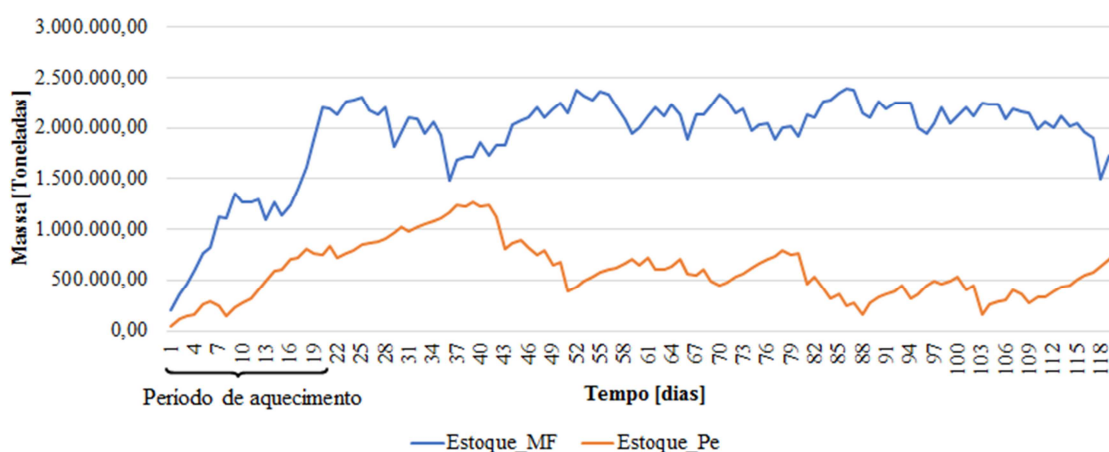
As Figuras 20, 21 e 22 mostram o intervalo de *warm up* (período de aquecimento) de algumas saídas, referentes ao cenário 1 para 1 (uma) replicação, como exemplificação, sendo equivalente para os demais cenários, portanto não será mostrado.

Figura 20 – Ocupação acumulada dos pátios (tempo de *warm up*) - cenário 1 (1 replicação)



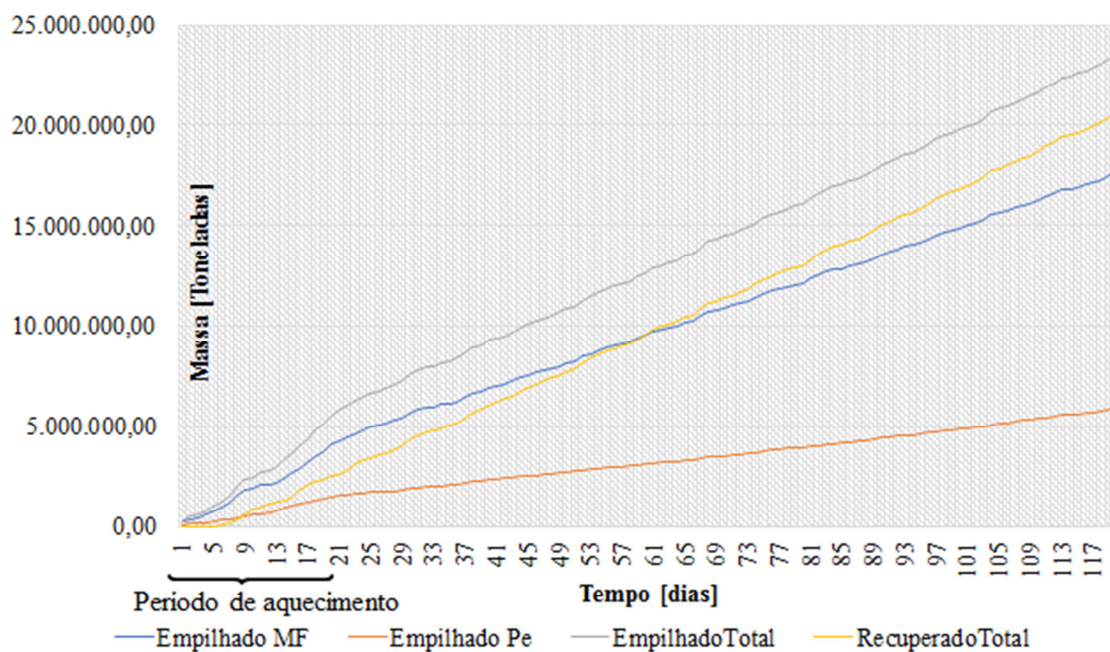
Fonte: O próprio autor.

Figura 21 – Estoque acumulado dos pátios (tempo de *warm up*) - cenário 1 (1 replicação)



Fonte: O próprio autor.

Figura 22 – Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios (tempo de *warm up*) – cenário 1 (1 replicação)

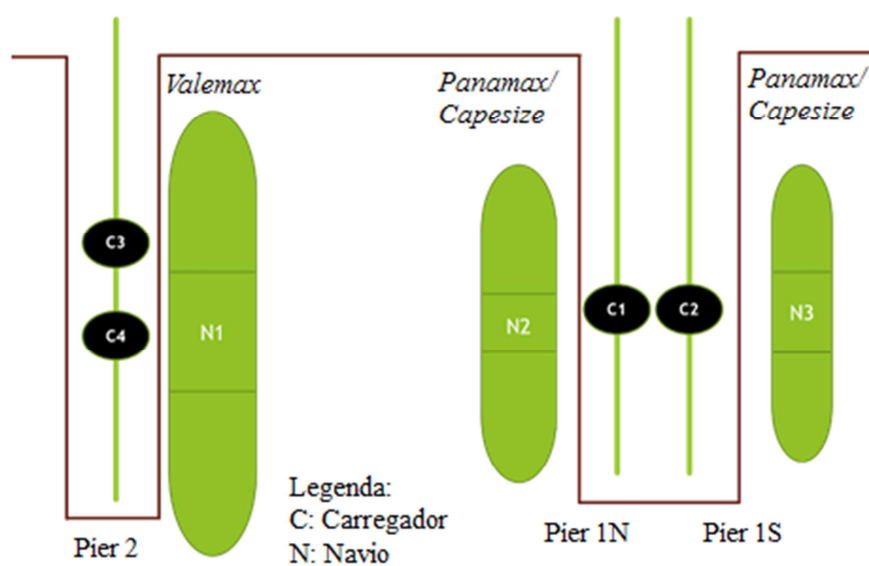


Fonte: O próprio autor.

4.1 Cenário 1

Para uma melhor representação do cenário em questão é apresentada a Figura 23, que exemplifica os tipos de navios que podem atracar em cada berço.

Figura 23 – Layout de representação do cenário 1



Fonte: O próprio autor.

O resultado obtido no cenário 1 é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultado do cenário 1

Variáveis dependentes (saída)	Cenário 1
Nº de navios Panamax	63,4
Nº de navios Capesize	69,8
Nº de navios Valemax	14
Fila média Píer 1S (h)	9,26
Fila média Píer 1N (h)	8,95
Fila média Píer 2 (h)	9,33
Qtde. de navios em fila para atracar	1,13
Giro de estoque (100 dias)	3,41
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras (%))	11,44
Ocupação média dos equipamentos (carregadores (%))	9,46
Ocupação média dos equipamentos (recuperadoras (%))	13,96
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras/recuperadoras (%))	19,14
Ocupação média dos equipamentos do pátio (%) (empilhadeiras, recuperadoras e empilhadeiras/recuperadoras)	14,85
Ocupação média das usinas (%)	80,45
Ocupação média dos viradores (%)	53,39
Ocupação acumulada dos pátios (100 dias)	Figura 24
Estoque acumulado dos pátios (100 dias)	Figura 25
Empilhamento acumulado dos pátios (100 dias)	Figura 26
Recuperação acumulada dos pátios (100 dias)	Figura 26

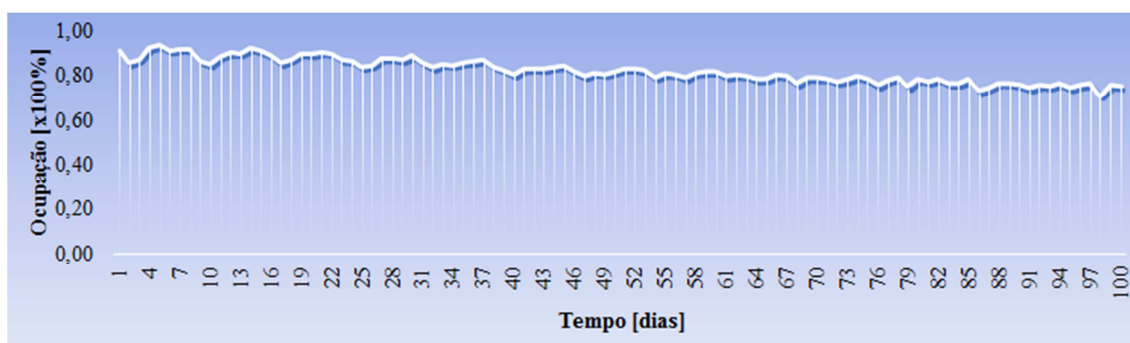
Fonte: O próprio autor.

A seguir são apresentadas as Figuras 24, 25 e 26, que representam, graficamente ao longo do tempo, as suas respectivas variáveis de saída (dependentes), de acordo com a Tabela 11, para um total de simulação de 5 (cinco) replicações.

Este cenário considera a atracação de ambos os tipos de navios (*panamax* e *capesize*) no píer 1, para os berços 1S e 1N. O píer 2 recebe somente o tipo de navio *valemax*.

Neste cenário a Figura 24 mostra a evolução no tempo, da ocupação acumulada de ambos os produtos (MF e PE) em todos os 11 (onze) pátios de estocagem. A Tabela 12 mostra uma ocupação média (diária, desvio padrão, mínima e máxima).

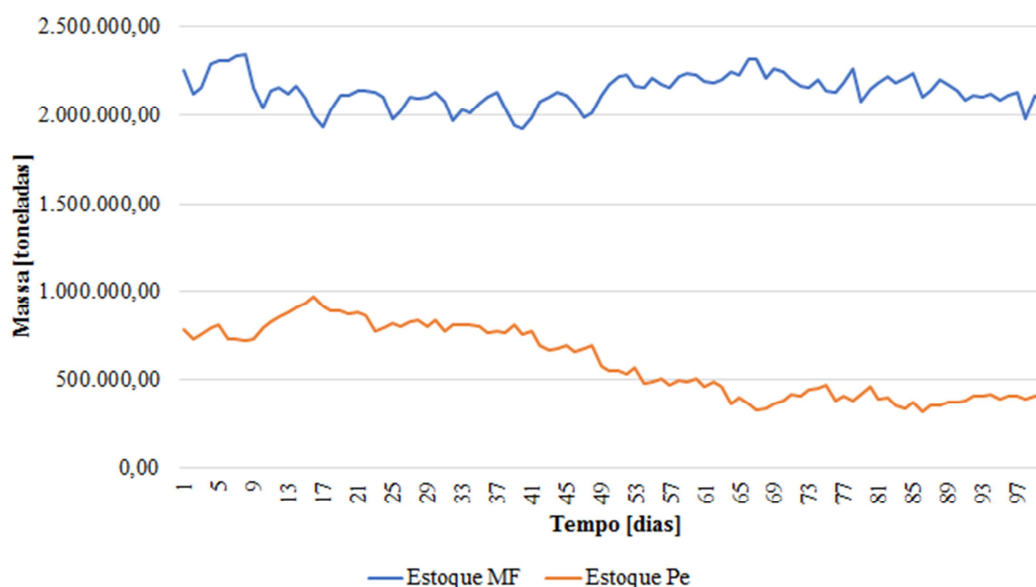
Figura 24 - Ocupação acumulada dos pátios – cenário 1 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A Figura 25 mostra a evolução do estoque acumulado em todos os 11 (onze) pátios, separada por produto (MF ou PE). A movimentação média (MF e PE) e o estoque médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo), conforme Tabela 12.

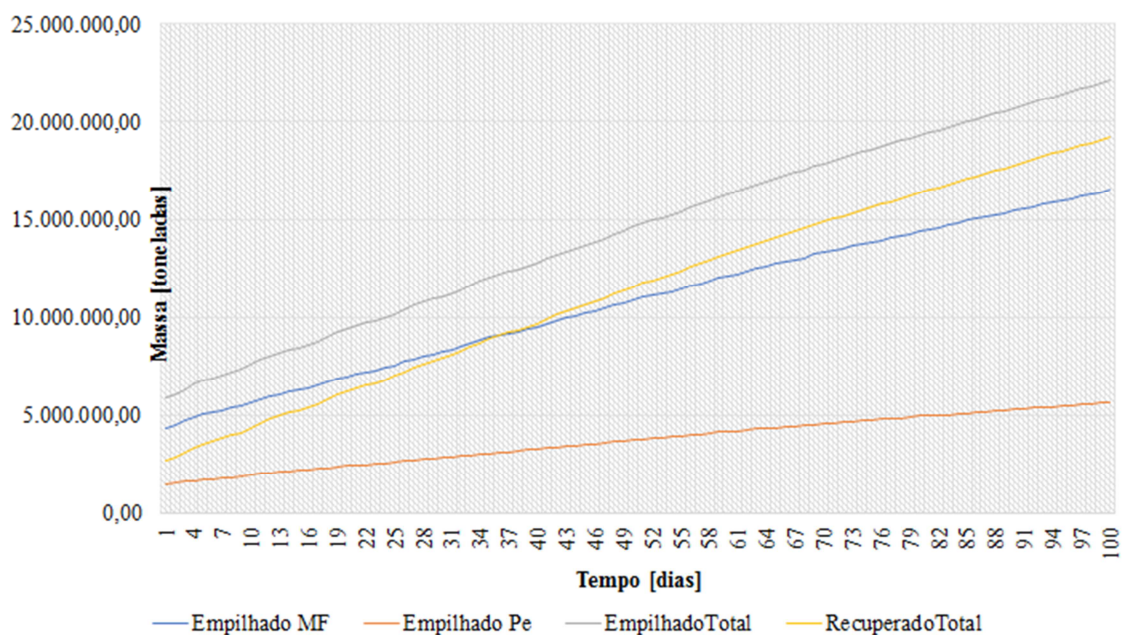
Figura 25 – Estoque acumulado dos pátios - cenário 1 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A Figura 26 mostra a evolução do empilhamento acumulado em todos os 11 (onze) pátios, total de ambos os produtos (MF e PE) e separado por produto (MF ou PE). A Tabela 12 mostra o empilhado médio (MF e PE) e o empilhado médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Figura 26 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 1 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A mesma Figura 26, também, ilustra ao longo do tempo a recuperação acumulada em todos os 11 (onze) pátios, dos produtos (MF e PE). A Tabela 12 mostra o recuperado médio (MF e PE) e o recuperado médio separado por produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Tabela 12 – Valores médios acumulados dos pátios - Cenário 1

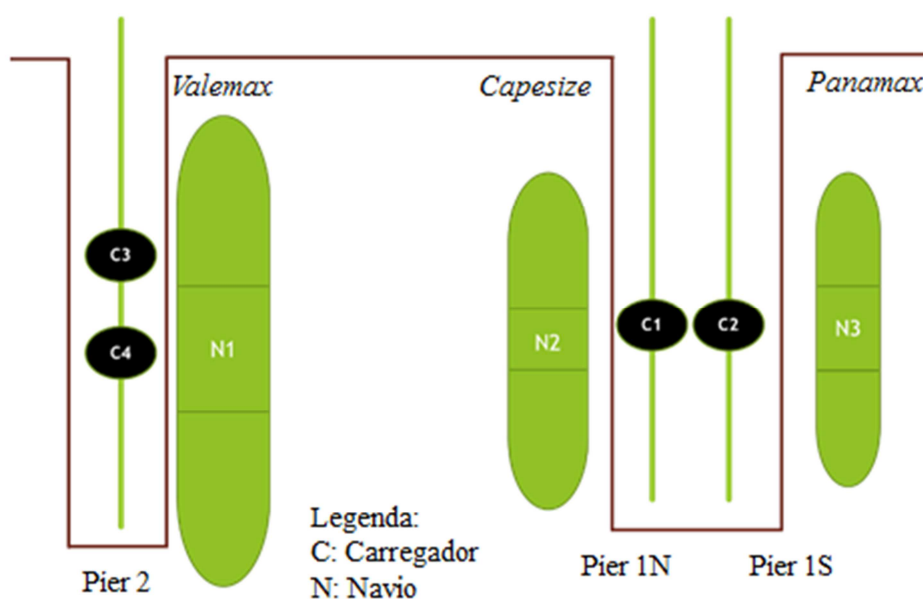
OCUPAÇÃO		Un./dia	Quant.
Ocupação média	diária	%	82,077
	desvio	%	5,450
	mínima	%	70,845
	máxima	%	93,443
ESTOQUE		Un./dia	Quant.
Movimentação média (MF e Pe)	diária	milhões ton	2.741.377,725
	desvio	milhões ton	182.034,401
	mínima	milhões ton	2.366.229,036
	máximo	milhões ton	3.120.996,842
Estoque médio (MF)	diário	milhões ton	2.139.801,513
	desvio	milhões ton	91.780,061
	mínimo	milhões ton	1.922.501,103
	máximo	milhões ton	2.341.625,051
Estoque médio (Pe)	diário	milhões ton	601.576,212
	desvio	milhões ton	199.798,381
	mínimo	milhões ton	316.298,497
	máximo	milhões ton	975.466,624
EMPILHAMENTO		Un./dia	Quant.
Empilhado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	14.437.434,480
	desvio	milhões ton	4.784.406,292
	mínimo	milhões ton	5.857.656,000
	máximo	milhões ton	22.141.728,000
Empilhado médio (MF)	diário	milhões ton	10.749.063,360
	desvio	milhões ton	3.561.737,378
	mínimo	milhões ton	4.345.320,000
	máximo	milhões ton	16.479.288,000
Empilhado médio (Pe)	diário	milhões ton	3.694.215,840
	desvio	milhões ton	1.219.270,754
	mínimo	milhões ton	1.512.336,000
	máximo	milhões ton	5.662.440,000
RECUPERAÇÃO		Un./dia	Quant.
Recuperado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	11.372.958,000
	desvio	milhões ton	4.883.596,238
	mínimo	milhões ton	2.691.000,000
	máximo	milhões ton	19.233.000,000
Recuperado médio (MF)	diário	milhões ton	8.371.026,000
	desvio	milhões ton	3.501.754,829
	mínimo	milhões ton	1.996.200,000
	máximo	milhões ton	14.081.400,000
Recuperado médio (Pe)	diário	milhões ton	3.001.932,000
	desvio	milhões ton	1.385.091,677
	mínimo	milhões ton	694.800,000
	máximo	milhões ton	5.151.600,000

Fonte: O próprio autor.

4.2 Cenário 2

Para uma melhor representação do cenário em questão é apresentada a Figura 27, que exemplifica os tipos de navios que podem atracar em cada berço.

Figura 27 – Layout de representação do cenário 2



Fonte: O próprio autor.

O resultado obtido no cenário 2 é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultado do cenário 2

Variáveis dependentes (saída)	Cenário 2
Nº de navios Panamax	67
Nº de navios Capesize	73
Nº de navios Valemax	15,2
Fila média Píer 1S (h)	8,27
Fila média Píer 1N (h)	8,15
Fila média Píer 2 (h)	8,15
Qtde. de navios em fila para atracar	0,12
Giro de estoque (100 dias)	3,44
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras (%))	11,96
Ocupação média dos equipamentos (carregadores (%))	16,11
Ocupação média dos equipamentos (recuperadoras (%))	14,68
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras/recuperadoras (%))	20,11
Ocupação média dos equipamentos do pátio (%) (empilhadeiras, recuperadoras e empilhadeiras/recuperadoras)	16,06
Ocupação média das usinas (%)	79,81
Ocupação média dos viradores (%)	53,39
Ocupação acumulada dos pátios (100 dias)	Figura 28
Estoque acumulado dos pátios (100 dias)	Figura 29
Empilhamento acumulado dos pátios (100 dias)	Figura 30
Recuperação acumulada dos pátios (100 dias)	Figura 30

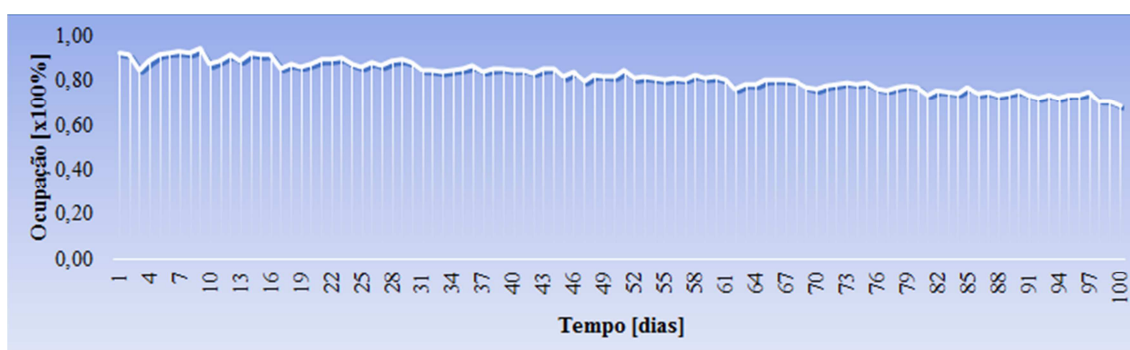
Fonte: O próprio autor.

A seguir são apresentadas as Figuras 28, 29 e 30, que representam, graficamente ao longo do tempo, as suas respectivas variáveis de saída (dependentes), de acordo com a Tabela 13, para um total de simulação de 5 (cinco) replicações.

Este cenário considera a atracação de somente um tipo de navio, específico, em cada berço do píer 1. Os navios tipo *panamax* somente podem atracar no berço 1S e navios *capsize* no berço 1N. O píer 2 recebe somente os tipos de navios *valemax*.

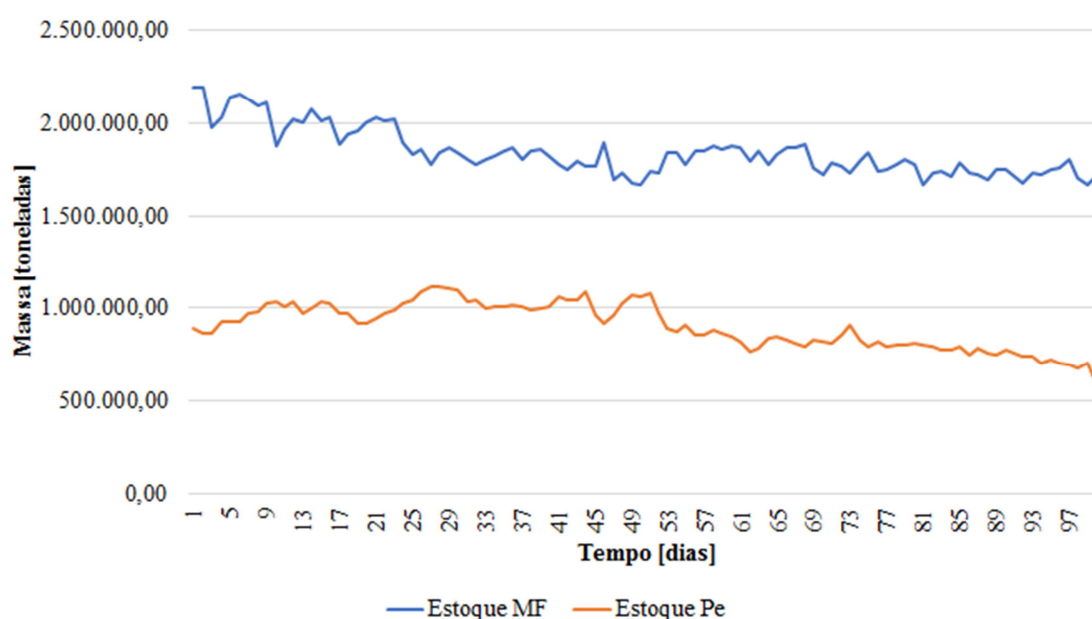
Neste cenário a Figura 28 mostra a evolução no tempo, da ocupação acumulada de ambos os produtos (MF e PE) em todos os 11 (onze) pátios de estocagem. A Tabela 14 mostra uma ocupação média (diária, desvio padrão, mínima e máxima).

Figura 28 - Ocupação acumulada dos pátios – cenário 2 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

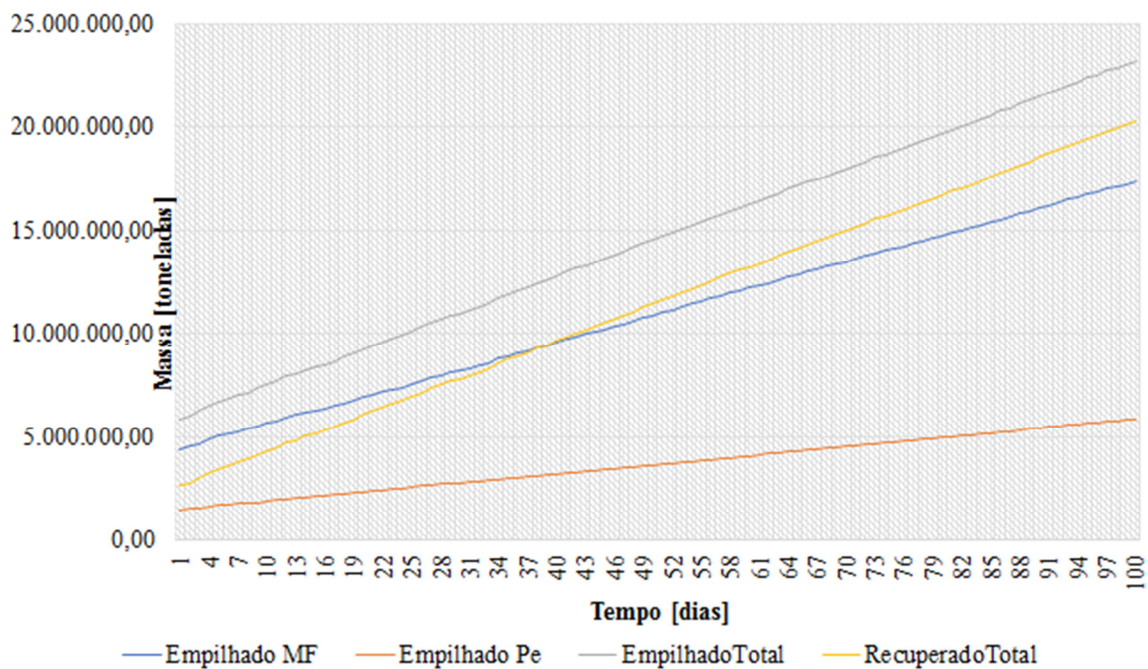
Figura 29 - Estoque acumulado dos pátios - cenário 2 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A Figura 29 mostra a evolução do estoque acumulado em todos os 11 (onze) pátios, separada por produto (MF ou PE). A movimentação média (MF e PE) e o estoque médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo), conforme Tabela 14.

Figura 30 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 2 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A Figura 30 mostra a evolução do empilhamento acumulado em todos os 11 (onze) pátios, de ambos os produtos (MF e PE) e separado por produto (MF ou PE). A Tabela 14 mostra o empilhado médio (MF e PE) e o empilhado médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

A mesma Figura 30, também, ilustra ao longo do tempo a recuperação acumulada em todos os 11 (onze) pátios, dos produtos (MF e PE). A Tabela 14 mostra o recuperado médio (MF e PE) e o recuperado médio separado por produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Tabela 14 - Valores médios acumulados dos pátios - Cenário 2

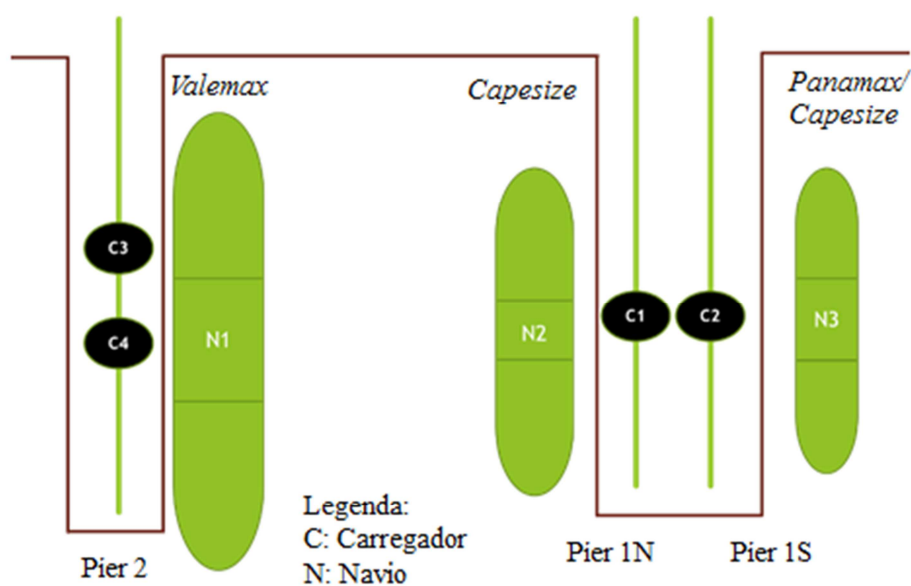
OCUPAÇÃO		Un./dia	Quant.
Ocupação média	diária	%	82,303
	desvio	%	6,049
	mínima	%	69,026
	máxima	%	93,941
ESTOQUE		Un./dia	Quant.
Movimentação média (MF e P)	diária	milhões ton	2.748.925,411
	desvio	milhões ton	202.048,996
	mínima	milhões ton	2.305.483,416
	máximo	milhões ton	3.137.629,578
Estoque médio (MF)	diário	milhões ton	1.846.127,928
	desvio	milhões ton	125.812,971
	mínimo	milhões ton	1.669.501,193
	máximo	milhões ton	2.196.329,524
Estoque médio (Pe)	diário	milhões ton	902.797,484
	desvio	milhões ton	122.219,687
	mínimo	milhões ton	591.395,529
	máximo	milhões ton	1.116.841,974
EMPILHAMENTO		Un./dia	Quant.
Empilhado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	14.586.551,280
	desvio	milhões ton	5.063.604,190
	mínimo	milhões ton	5.834.136,000
	máximo	milhões ton	23.198.952,000
Empilhado médio (MF)	diário	milhões ton	10.927.956,480
	desvio	milhões ton	3.796.683,272
	mínimo	milhões ton	4.355.904,000
	máximo	milhões ton	17.378.928,000
Empilhado médio (Pe)	diário	milhões ton	3.667.367,760
	desvio	milhões ton	1.266.739,841
	mínimo	milhões ton	1.478.232,000
	máximo	milhões ton	5.820.024,000
RECUPERAÇÃO		Un./dia	Quant.
Recuperado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	11.499.021,000
	desvio	milhões ton	5.165.407,582
	mínimo	milhões ton	2.637.000,000
	máximo	milhões ton	20.296.800,000
Recuperado médio (MF)	diário	milhões ton	8.823.924,000
	desvio	milhões ton	3.829.800,221
	mínimo	milhões ton	2.084.400,000
	máximo	milhões ton	15.282.000,000
Recuperado médio (Pe)	diário	milhões ton	2.675.097,000
	desvio	milhões ton	1.338.767,507
	mínimo	milhões ton	552.600,000
	máximo	milhões ton	5.014.800,000

Fonte: O próprio autor.

4.3 Cenário 3

Para uma melhor representação do cenário em questão é apresentada a Figura 31, que exemplifica os tipos de navios que podem atracar em cada berço.

Figura 31 – Layout de representação do cenário 3



Fonte: O próprio autor.

O resultado obtido no cenário 3 é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado do cenário 3

Variáveis dependentes (saída)	Cenário 3
Nº de navios Panamax	61,4
Nº de navios Capesize	66,8
Nº de navios Valemax	13
Fila média Pier 1S (h)	14,82
Fila média Pier 1N (h)	12,97
Fila média Pier 2 (h)	31,92
Qtde. de navios em fila para atracar	1,83
Giro de estoque (100 dias)	3,32
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras (%))	10,80
Ocupação média dos equipamentos (carregadores (%))	8,94
Ocupação média dos equipamentos (recuperadoras (%))	13,19
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras/recuperadoras (%))	18,23
Ocupação média dos equipamentos do pátio (%) (empilhadeiras, recuperadoras e empilhadeiras/recuperadoras)	14,07
Ocupação média das usinas (%)	80,47
Ocupação média dos viradores (%)	53,64
Ocupação acumulada dos pátios (100 dias)	Figura 32
Estoque acumulado dos pátios (100 dias)	Figura 33
Empilhamento acumulado dos pátios (100 dias)	Figura 34
Recuperação acumulada dos pátios (100 dias)	Figura 34

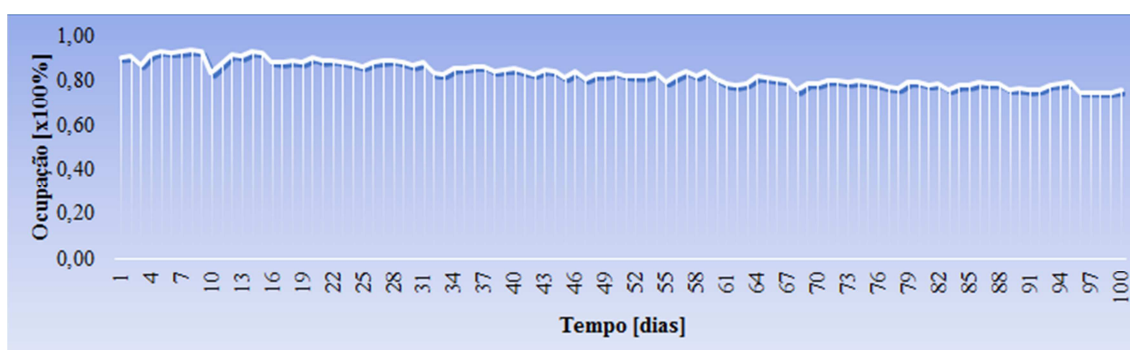
Fonte: O próprio autor.

A seguir são apresentadas as Figuras 32, 33 e 34, que representam, graficamente ao longo do tempo, as suas respectivas variáveis de saída (dependentes), de acordo com a Tabela 15, para um total de simulação de 5 (cinco) replicações.

Este cenário considera a atracação dos tipos de navios *panamax* e *capecize* no berço 1S e somente um tipo de navio, específico, o *capecize*, no berço 1N. O píer 2 recebe somente os tipos de navios *valemax*.

Neste cenário a Figura 32 mostra a evolução no tempo, da ocupação acumulada de ambos os produtos (MF e PE) em todos os 11 (onze) pátios de estocagem. A Tabela 16 mostra uma ocupação média (diária, desvio padrão, mínima e máxima).

Figura 32 - Ocupação acumulada dos pátios - cenário 3 (5 replicações)

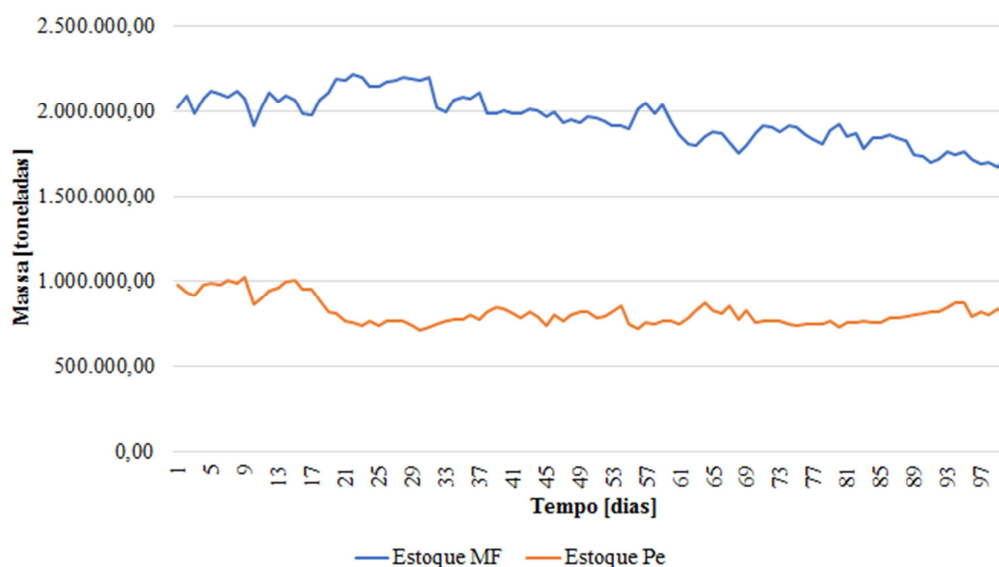


Fonte: O próprio autor.

A Figura 33 mostra a evolução do estoque acumulado em todos os 11 (onze) pátios, separada por produto (MF ou PE). A movimentação média (MF e PE) e o estoque médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo), conforme Tabela 16.

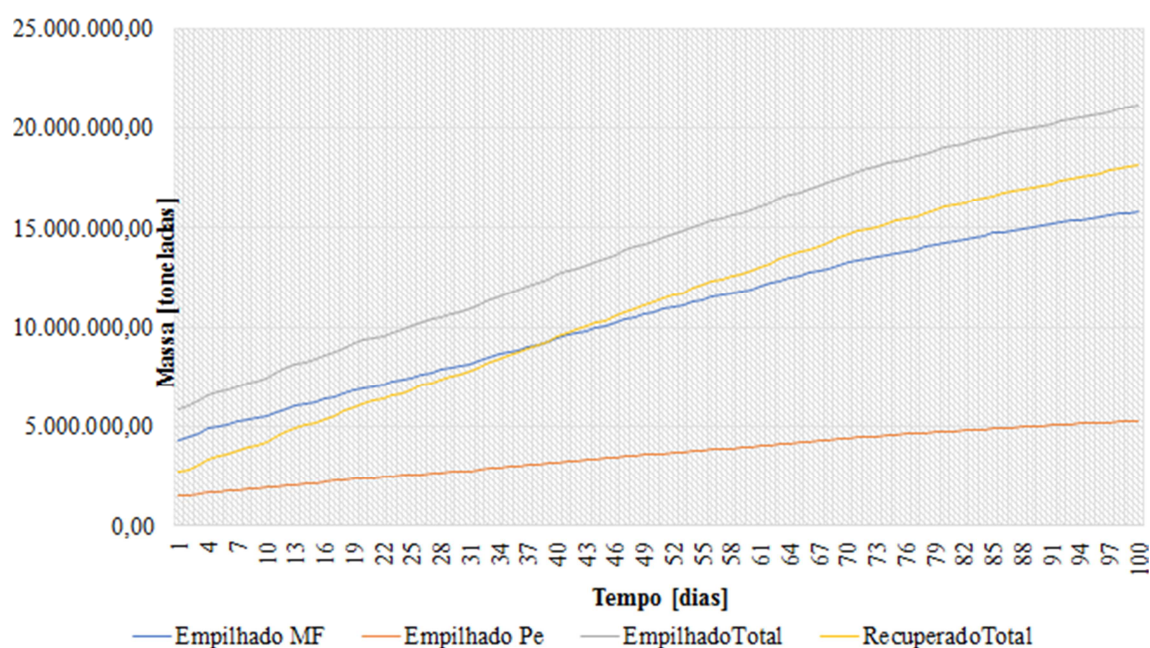
A Figura 34 mostra a evolução do empilhamento acumulado em todos os 11 (onze) pátios, de ambos os produtos (MF e PE) e separado por produto (MF ou PE). A Tabela 16 mostra o empilhado médio (MF e PE) e o empilhado médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Figura 33 - Estoque acumulado dos pátios - cenário 3 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

Figura 34 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 3 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A mesma Figura 34, também, ilustra ao longo do tempo a recuperação acumulada em todos os 11 (onze) pátios, dos produtos (MF e PE). A Tabela 16 mostra o recuperado médio (MF e PE) e o recuperado médio separado por produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Tabela 16 - Valores médios acumulados dos pátios - Cenário 3

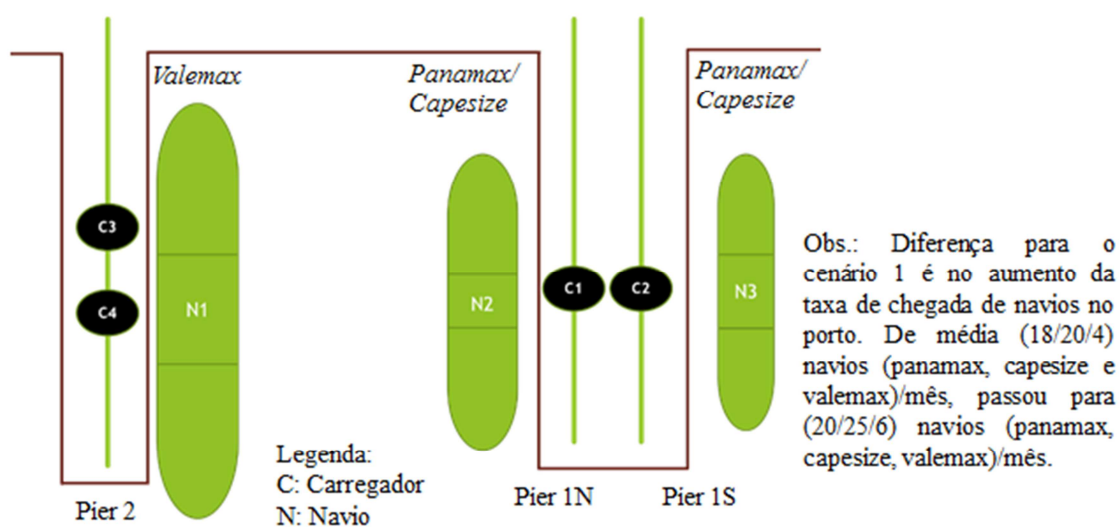
OCUPAÇÃO		Un./dia	Quant.
Ocupação média	diária	%	83,006
	desvio	%	5,165
	mínima	%	74,901
	máxima	%	93,136
ESTOQUE		Un./dia	Quant.
Movimentação média (MF e Pe)	diária	milhões ton	2.772.411,750
	desvio	milhões ton	172.524,838
	mínima	milhões ton	2.501.682,909
	máximo	milhões ton	3.110.754,766
Estoque médio (MF)	diário	milhões ton	1.955.956,046
	desvio	milhões ton	143.592,865
	mínimo	milhões ton	1.669.106,492
	máximo	milhões ton	2.219.123,136
Estoque médio (Pe)	diário	milhões ton	816.455,704
	desvio	milhões ton	77.708,324
	mínimo	milhões ton	708.929,913
	máximo	milhões ton	1.024.320,272
EMPILHAMENTO		Un./dia	Quant.
Empilhado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	14.162.520,960
	desvio	milhões ton	4.608.881,789
	mínimo	milhões ton	5.835.312,000
	máximo	milhões ton	21.128.016,000
Empilhado médio (MF)	diário	milhões ton	10.606.943,760
	desvio	milhões ton	3.480.090,169
	mínimo	milhões ton	4.341.792,000
	máximo	milhões ton	15.841.896,000
Empilhado médio (Pe)	diário	milhões ton	3.563.785,680
	desvio	milhões ton	1.128.677,785
	mínimo	milhões ton	1.493.520,000
	máximo	milhões ton	5.286.120,000
RECUPERAÇÃO		Un./dia	Quant.
Recuperado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	11.083.248,000
	desvio	milhões ton	4.700.162,867
	mínimo	milhões ton	2.701.800,000
	máximo	milhões ton	18.190.800,000
Recuperado médio (MF)	diário	milhões ton	8.422.578,000
	desvio	milhões ton	3.545.618,727
	mínimo	milhões ton	2.222.100,000
	máximo	milhões ton	13.806.900,000
Recuperado médio (Pe)	diário	milhões ton	2.660.670,000
	desvio	milhões ton	1.156.945,043
	mínimo	milhões ton	479.700,000
	máximo	milhões ton	4.383.900,000

Fonte: O próprio autor.

4.4 Cenário 4

Para uma melhor representação do cenário em questão é apresentada a Figura 35, que exemplifica os tipos de navios que podem atracar em cada berço.

Figura 35 – Layout de representação do cenário 4



Fonte: O próprio autor.

O resultado obtido no cenário 3 é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultado do cenário 4

Variáveis dependentes (saída)	Cenário 4
Nº de navios Panamax	54,2
Nº de navios Capesize	70,4
Nº de navios Valemax	15,8
Fila média Pier 1S (h)	10,66
Fila média Pier 1N (h)	10,87
Fila média Pier 2 (h)	10,54
Qtde. de navios em fila para atracar	18,29
Giro de estoque (100 dias)	3,53
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras (%))	11,22
Ocupação média dos equipamentos (carregadores (%))	9,29
Ocupação média dos equipamentos (recuperadoras (%))	13,75
Ocupação média dos equipamentos (empilhadeiras/recuperadoras (%))	18,83
Ocupação média dos equipamentos do pátio (%) (empilhadeiras, recuperadoras e empilhadeiras/recuperadoras)	14,60
Ocupação média das usinas (%)	79,64
Ocupação média dos viradores (%)	54,17
Ocupação acumulada dos pátios	Figura 36
Estoque acumulado dos pátios	Figura 37
Empilhamento acumulado dos pátios	Figura 38
Recuperação acumulada dos pátios	Figura 38

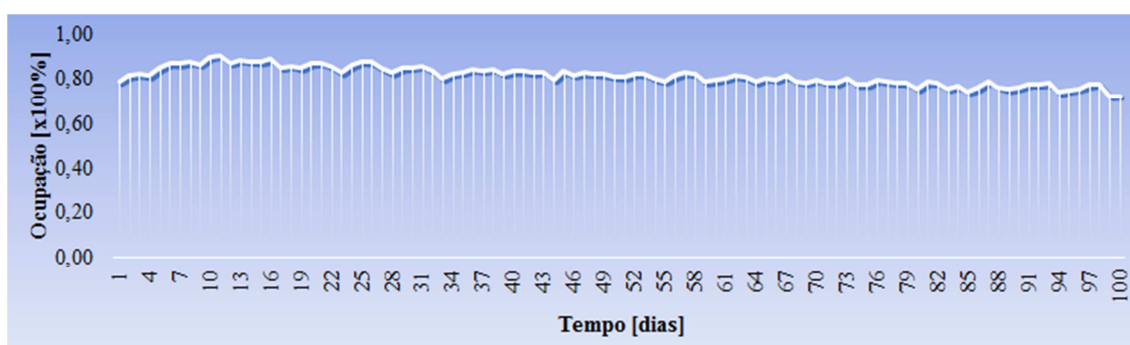
Fonte: O próprio autor.

A seguir são apresentadas as Figuras 36, 37 e 38, que representam, graficamente ao longo do tempo, as suas respectivas variáveis de saída (dependentes), de acordo com a Tabela 17, para um total de simulação de 5 (cinco) replicações.

Este cenário considera a atracação dos tipos de navios idêntica à do cenário 1, porém com tempo médio entre chegadas de navios menor, com uma maior frequência de chegadas de navios por mês (Figura 35)

Neste cenário a Figura 36 mostra a evolução no tempo, da ocupação acumulada de ambos os produtos (MF e PE) em todos os 11 (onze) pátios de estocagem. A Tabela 18 mostra uma ocupação média (diária, desvio padrão, mínima e máxima).

Figura 36 - Ocupação acumulada dos pátios - cenário 4 (5 replicações)

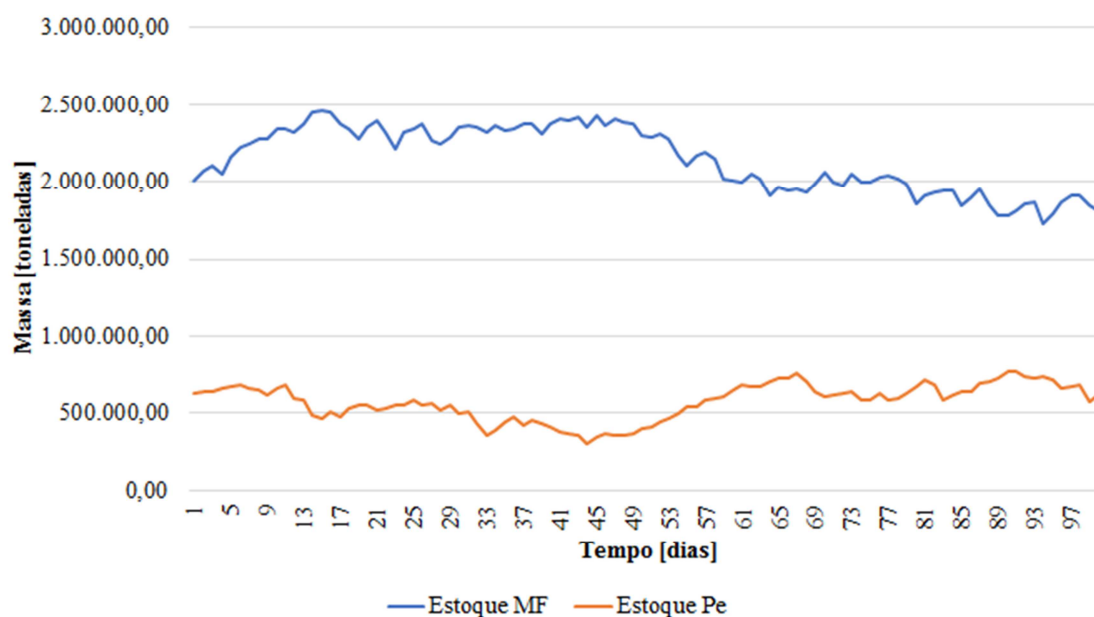


Fonte: O próprio autor.

A Figura 37 mostra a evolução do estoque acumulado em todos os 11 (onze) pátios, separada por produto (MF ou PE). A movimentação média (MF e PE) e o estoque médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo), conforme Tabela 18.

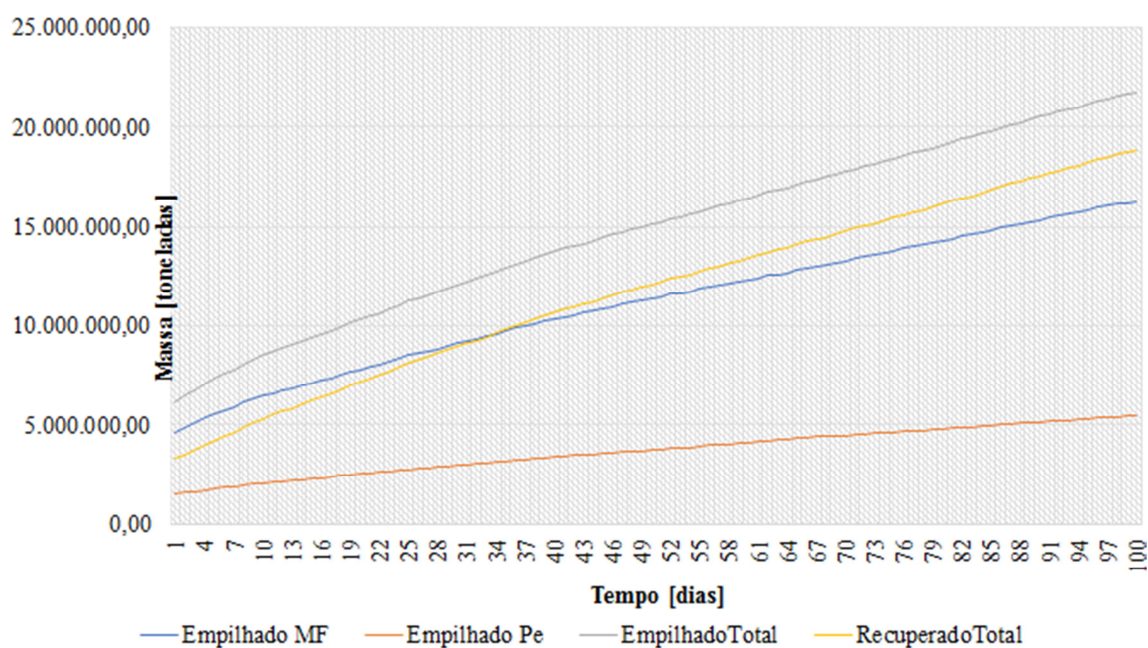
A Figura 38 mostra a evolução do empilhamento acumulado em todos os 11 (onze) pátios, de ambos os produtos (MF e PE) e separado por produto (MF ou PE). A Tabela 18 mostra o empilhado médio (MF e PE) e o empilhado médio de cada produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Figura 37 - Estoque acumulado dos pátios - cenário 4 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

Figura 38 - Empilhamento (MF e PE) e Recuperação acumulados dos pátios - cenário 4 (5 replicações)



Fonte: O próprio autor.

A mesma Figura 38, também, ilustra ao longo do tempo a recuperação acumulada em todos os 11 (onze) pátios, dos produtos (MF e PE). A Tabela 18 mostra o

recuperado médio (MF e PE) e o recuperado médio separado por produto (MF ou PE): (diário, desvio padrão, mínimo e máximo).

Tabela 18 - Valores médios acumulados dos pátios – Cenário 4

OCUPAÇÃO		Un./dia	Quant.
Ocupação média	diária	%	81,380
	desvio	%	4,091
	mínima	%	72,280
	máxima	%	90,678
ESTOQUE		Un./dia	Quant.
Movimentação média (MF e Pe)	diária	milhões ton	2.718.083,409
	desvio	milhões ton	136.647,235
	mínima	milhões ton	2.414.166,949
	máximo	milhões ton	3.028.644,182
Estoque médio (MF)	diário	milhões ton	2.145.313,917
	desvio	milhões ton	208.752,591
	mínimo	milhões ton	1.727.116,836
	máximo	milhões ton	2.454.234,186
Estoque médio (Pe)	diário	milhões ton	572.769,492
	desvio	milhões ton	116.074,952
	mínimo	milhões ton	305.654,561
	máximo	milhões ton	770.609,255
EMPLIHAMENTO		Un./dia	Quant.
Empilhado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	14.833.946,400
	desvio	milhões ton	4.358.307,254
	mínimo	milhões ton	6.121.080,000
	máximo	milhões ton	21.770.112,000
Empilhado médio (MF)	diário	milhões ton	11.142.447,120
	desvio	milhões ton	3.229.191,804
	mínimo	milhões ton	4.624.032,000
	máximo	milhões ton	16.292.304,000
Empilhado médio (Pe)	diário	milhões ton	3.695.450,640
	desvio	milhões ton	1.125.013,550
	mínimo	milhões ton	1.497.048,000
	máximo	milhões ton	5.477.808,000
RECUPERAÇÃO		Un./dia	Quant.
Recuperado médio (MF e Pe)	diário	milhões ton	11.792.196,000
	desvio	milhões ton	4.422.400,764
	mínimo	milhões ton	3.299.400,000
	máximo	milhões ton	18.860.400,000
Recuperado médio (MF)	diário	milhões ton	8.757.432,000
	desvio	milhões ton	3.344.424,915
	mínimo	milhões ton	2.480.400,000
	máximo	milhões ton	14.136.300,000
Recuperado médio (Pe)	diário	milhões ton	3.034.764,000
	desvio	milhões ton	1.084.035,060
	mínimo	milhões ton	819.000,000
	máximo	milhões ton	4.724.100,000

Fonte: O próprio autor.

4.5 Análise dos resultados

A partir dos resultados gerados em cada cenário, é possível fazer uma análise geral das principais variáveis de saída do modelo, são elas: taxa de ocupação dos equipamentos de empilhamento, da linha de embarque e carregamento, taxa de ocupação das usinas e viradores, taxa de ocupação dos pátios, tempo médio em fila por

berço, fila de navios para atracar, número de navios que desembarcam por berço, movimentação (estoque), empilhamento e recuperação dos produtos e giro de estoque.

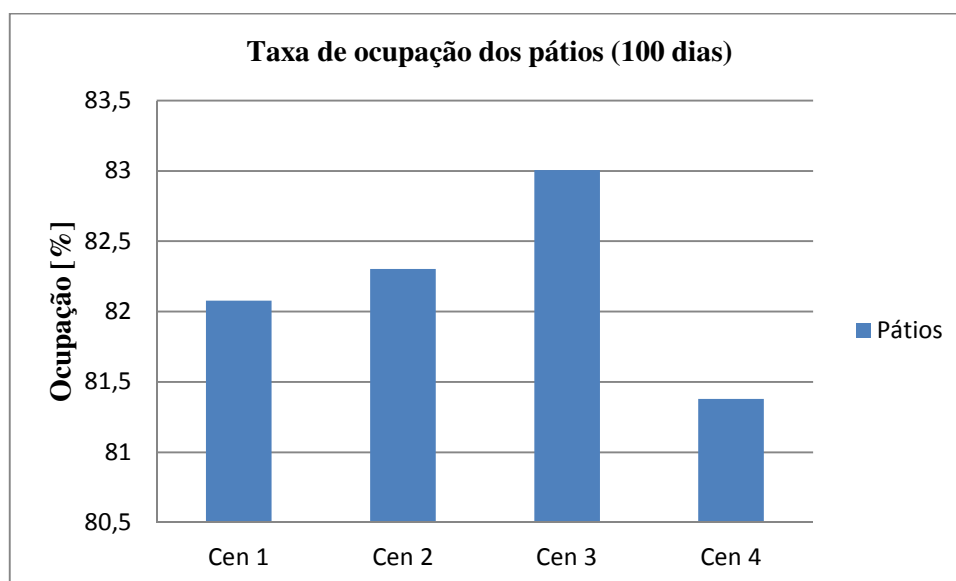
Em relação às taxas de ocupação, apresentadas nas Figuras 39, 40 e 41 abaixo, pode-se concluir que:

- Iniciando-se a análise pela ocupação dos pátios, observa-se que a ocupação média acumulada para os 11 pátios se mantém em torno de 82%. Tendo como extremos os cenários 3 e 4, com maior e menor utilizações, respectivamente, sendo uma diferença menor que 2%. Os resultados de utilização não puderam ser comparados ao realizado por não haver histórico oficial, portanto, foram apenas comentados os comparativos entre os quatro cenários. Isso se repete ao longo das análises deste capítulo. O cenário 4 tem a menor ocupação dos pátios, em função dos perfis dos navios que o caracteriza (Figura 39).
- Para a utilização/ocupação de viradores, o modelo simulado apresentou resultados em torno de 53% e próximos ao histórico apurado de 2015 a 2016 (que é em torno de 49,6%), conforme trabalho de Vieira (2018). Os resultados de utilização das usinas (8 usinas), não puderam ser comparados ao realizado. Porém, apenas comentados os comparativos entre os cenários. Nota-se uma utilização média de 80%, com uma variação mínima entre os cenários de simulação. Tendo como extremos os cenários 3 e 4, com maior e menor utilizações, respectivamente, sendo uma diferença de 1% (Figura 40).
- Em relação à ocupação dos equipamentos de empilhamento (Figura 41), nota-se que há boas opções de empilhamento, uma vez que apresentaram baixas taxas de ocupação, para os cenários, e em contrapartida, uma ocupação para os pátios em torno de 82%, acarretando uma folga de quase 20%. Para tanto, os equipamentos do pátio (empilhadeiras, recuperadoras e empilhadeiras/recuperadoras) e do carregamento (carregadores de navio), estão com 15% e 11%, de ocupação, respectivamente. Ainda, acrescenta-se, como descrito na seção 3.8, letra b, a ocupação dos berços está representada somente pela ocupação dos equipamentos para o carregamento. Dessa forma, aliado a tudo isso estão às limitações do sistema, mencionadas na seção 3.4, que informam que algumas restrições não são levadas em consideração,

como: paradas de manutenção preventivas e as paradas não programadas das máquinas, condições meteorológicas e a influência da maré nas manobras de atracação e/ou desatracação dos navios e aspectos ambientais diversos, ficando fora, também, os tempos para a simples realização da operação de atracação e desatracação dos navios e com isso a utilização dos berços torna-se baixa. O cenário 2 apresentou as maiores taxas de ocupação dos equipamentos, ou seja, a forma como os navios atracam no terminal interferem na utilização dos equipamentos.

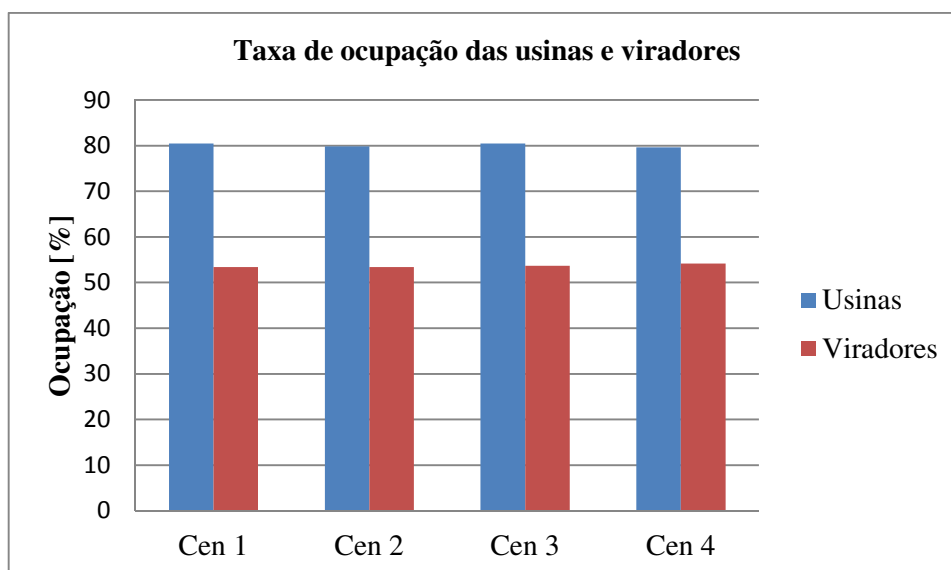
A análise descrita, anteriormente, permitiu concluir que pelas variáveis referentes à taxa de ocupação, as opções que possam atender a certos desempenhos, como volume embarcado com menos estoque, obtendo um melhor giro de estoque deve levar em consideração para as propostas dos cenários outras variáveis.

Figura 39 – Ocupação dos pátios



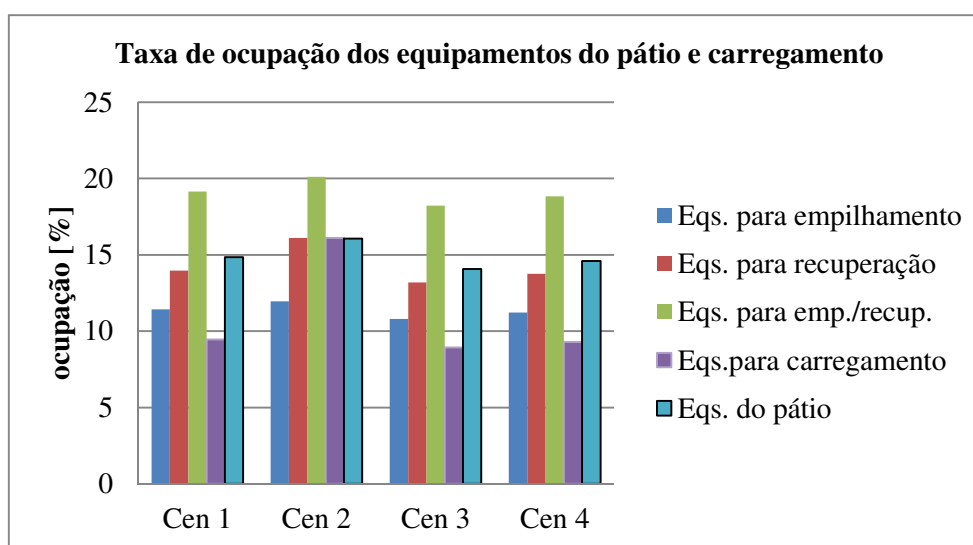
Fonte: O próprio autor.

Figura 40 – Ocupação das usinas e viradores



Fonte: O próprio autor.

Figura 41 – Ocupação das empilhadeiras, recuperadoras, máquinas híbridas e carregadores



Fonte: O próprio autor.

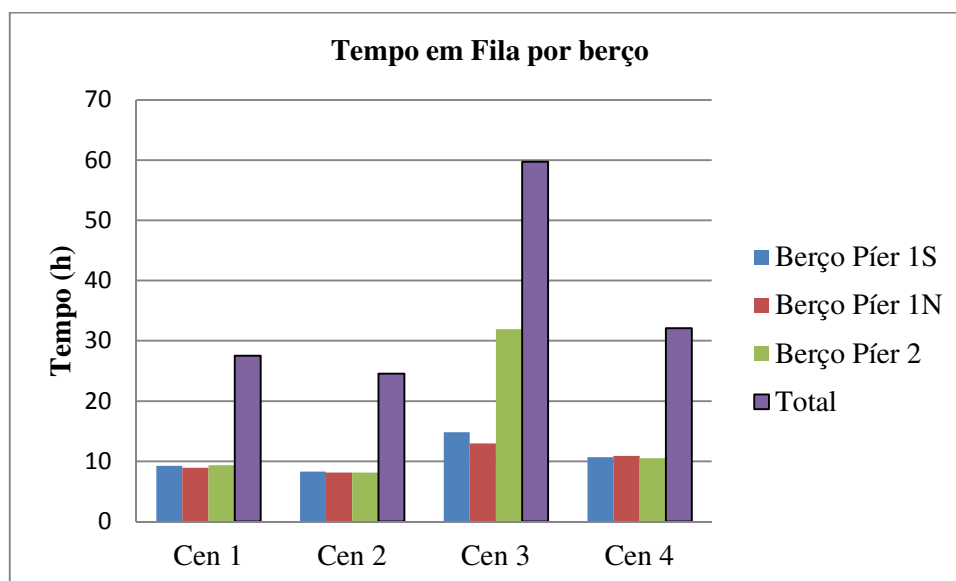
Observando as Figuras 42 e 43, constata-se a relação direta entre o tempo de espera por berço, o número de navios que desatracam e a quantidade de navios em fila que aguardam para atracar em algum berço, de acordo com a proposta de cada cenário.

- Uma observação importante é que ao se comparar os cenários, o cenário 4 apresenta a maior quantidade de navios em fila para atracar, porém não apresenta o maior tempo de espera nos berços, uma vez que é superado pelo

cenário 3, o qual tem um acréscimo no tempo de aproximadamente de 33% do segundo maior tempo (cenário 4) para o berço 2. O cenário 3, caracteriza-se por uma maior disponibilidade de berços (1S e 1N) para os navios *capsize*, o que acarreta em tempo em fila maior para todos os berços. O cenário 2 além de apresentar menor tempo em fila para todos os berços, em contrapartida a menor quantidade de navios em fila aguardando pra atracar e o maior número de navios que desatracaram no porto. Mas, isso não significa um maior volume embarcado de produtos, pois para tanto, deve-se verificar o tipo de navio que embarcou naquele momento.

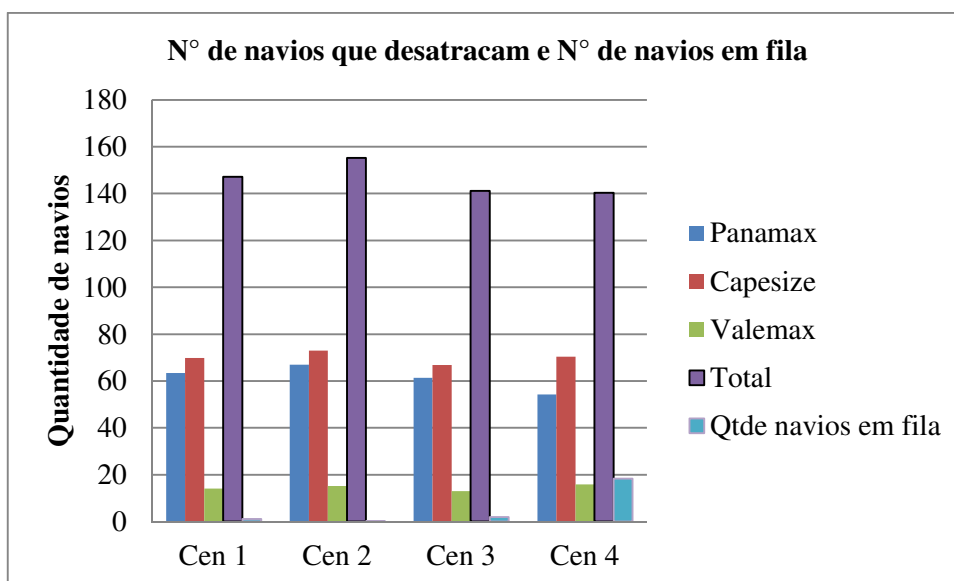
Para tanto, a escolha do melhor cenário que atenda o tempo de espera, a fila de navios e o maior volume embarcado devem estar em consonância com outras variáveis do sistema integrado, quanto ao carregamento do navio, uma vez que as limitações do modelo encurtam as análises.

Figura 42 – Tempo médio em Fila



Fonte: O próprio autor.

Figura 43 – Número de navios que desatracam e quantidade de navios em fila para atracar



Fonte: O próprio autor.

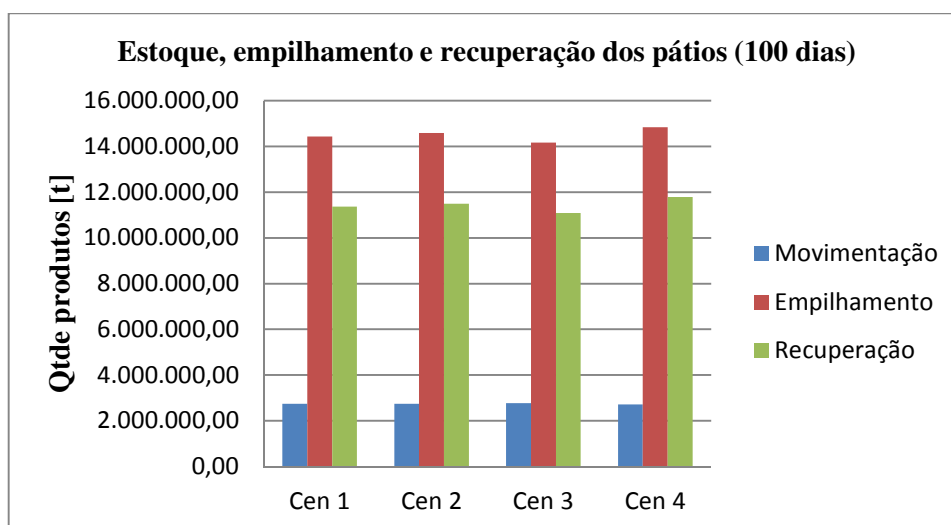
As últimas saídas a serem analisadas refletem diretamente a eficiência do sistema quanto ao carregamento dos navios, ou melhor, quanto à quantidade de produto em toneladas (t) embarcadas. As Figuras 44 e 45 cooperam para as melhores escolhas dos cenários e análises.

- O cenário 4 supera em quantidade de empilhamento e em recuperação dos produtos na linha de embarque e ainda, tem a menor movimentação média diária dos produtos (MF e PE) em torno de 2% em relação ao cenário 3. Mesmo sendo o cenário com a maior quantidade de navios em fila, além de o segundo em tempo médio nos berços, mas a maior frequência para cada tipo de navios nos berços. Em contrapartida, o cenário 3 apresenta a maior quantidade em estoque nos pátios, o que diminui o volume embarcado, sendo o cenário de maior tempo médio em fila e assim uma maior ocupação dos pátios, e com a menor taxa de ocupação em relação aos demais cenários para os carregadores, o que ocorre, devido ao alto tempo de espera, pois apresenta navios medianos em tonelagem atracando em ambos os berços do Píer 1 e sabe-se que esse tipo de navio é o de maior taxa de chegada no porto.

Com os resultados obtidos é possível observar que o cenário 4, destaca-se quando se considera um maior volume embarcado de produtos e giro de estoque. O giro é um

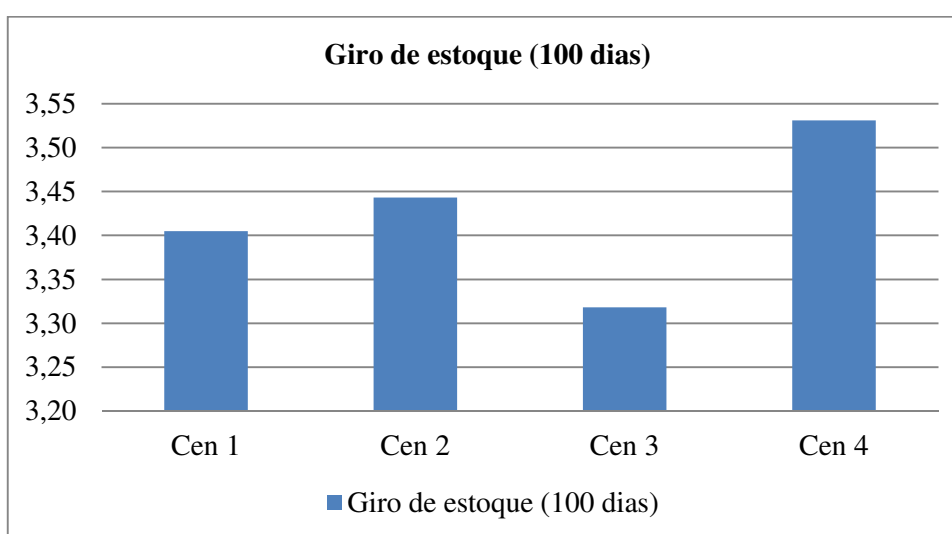
pouco mais de 3,5 vezes, o qual utilizou para o cálculo o volume recuperado médio diário. Porém, quando a comparação está no tempo em fila e tamanho da fila de navios este cenário não é nada bom, o que coloca o cenário 2 em vantagem. Ainda, deve-se entender que como os dados e cenários são estimados, pode-se considerar que os navios *capsize*, sejam uma capacidade teórica, uma vez que não seja possível receber apenas navios grandes durante o tempo de 100 dias, pois alguns clientes podem apresentar restrições físicas em seus portos no recebimento de navios deste porte (calado).

Figura 44 – Estoque, empilhamento e recuperação dos pátios (100 dias)



Fonte: O próprio autor.

Figura 45 – Giro de estoque (100 dias)



Fonte: O próprio autor.

5 Conclusões e Recomendações

O presente trabalho utilizou a simulação de eventos discretos para modelar um sistema pátio-porto da cadeia logística do MF. Sistema este, integrado com o objetivo de fomentar uma forma *as built* de projeto, ou seja, foi desenvolvido através da ferramenta, o *Software Arena*, um modelo simplificado, passo-a-passo, que traduziu via linguagem de blocos o terminal portuário de Tubarão (pátio e porto), através da representação das operações (subsistemas): de estocar material no pátio, de carregamento e dos navios.

Foram propostos quatro cenários hipotéticos para simulação, similares com o caso real, visando verificar a aplicação do modelo para a avaliação do aumento de eficiência e capacidade de embarque do sistema pátio-porto. Com os resultados obtidos pelo simulador, foi possível estimar a eficiência e analisar o comportamento dos recursos utilizados no sistema para cada um dos cenários estudados.

Dentre os cenários analisados, o cenário2 apresentou um melhor equilíbrio entre quantidades de navios *panamax* e *cape-size* com um melhor aproveitamento em tempo médio em filas (menor) e tamanho da fila de navios para atracar (menor), assim como a quantidade total de navios que desatracam (maior).

Além dos equipamentos do pátio e carregadores, que apresentaram grande potencial para serem mais bem explorados, pois possuíam ocupação baixa em média de 15% e 11%, respectivamente. Todavia, a ocupação dos pátios se mostrou apta para absorver aumentos de demandas futuras, sem a necessidade imediata de novos investimentos em aquisição ou repotencialização dos mesmos. Pode-se acrescentar o volume embarcado (recuperado) e giro de estoque, ficando somente atrás do cenário 4.

Por esses motivos, a análise de cenários através da simulação pode trazer grandes benefícios para o planejamento tático de uma empresa, guiando as equipes nas decisões que devem ser tomadas no médio prazo. Uma vez que, a indústria siderúrgica é um importante setor da economia nacional, merecendo estudos de forma a alavancar a economia brasileira, com relação à exportação do minério de ferro.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se melhorar o modelo desenvolvido rotulando os lotes por tipo de produto e por ponto de carga, considerando as capacidades estáticas de expedição de cada local, conforme recomendações descritas no trabalho de Vieira (2018). Além do tratamento que se deve ter para com os berços, a fim de que sejam transformados em recursos no *Arena* e da inserção dos tempos para

realizar a atracação e desatracação dos navios, da inclusão no modelo das utilizações reais dos recursos e também da taxa real executada pelos equipamentos, ou seja, a taxa comercial (engloba uma possível falha), que é menor que a taxa nominal e o mesmo para com a taxa efetiva de carregamento, que é acordada, anteriormente, entre a empresa e o cliente. E, de todas as distribuições estatísticas reais, que entram como dados de entrada do modelo.

Outra linha de estudo que pode ser implementada no modelo atual, é considerar as paradas das máquinas de processo, incluindo assim a manutenção preventiva e as paradas não programadas nos equipamentos do pátio e carregadores.

O simulador desenvolvido também pode ser utilizado em testes, através de heurísticas e meta-heurísticas, bem como a utilização de algoritmos de otimização para identificar outros pontos em que se pode implementar melhorias no sistema pátio-porto.

Referências Bibliográficas

AALST, W. M. P. van der. Business process simulation survival guide. *Handbook on Business Process Management* ., *International Handbooks on Information Systems*, Jan vom Brocke, and Michael Rosemann, Springer Berlin Heidelberg. 2. ed., p. 337-370, 2015.

AGO, M.; NISHI, T.; KONISHI, M. Simultaneous optimization of storage allocation and routing problems for belt-conveyor transportation. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, JAMDSM, JAPAN, v.1, n.2, p. 250-261, 2007.

AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. 3 ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007, 728p.

ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering*. V.82, p. 167-182, 2015.

ALVES, M. M.; FILHO, P. E. G.; SALLES, J. L. F.; ROCHA, H. R. O.; CRUZ, M. M. C.; FARIA, H. G. Planejamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro utilizando simulação. Brazilian Technology Symposium – BTSym’18. 2018. Disponível em: <<http://lcv.fee.unicamp.br/images/BTSym18/Papers/130.pdf>>. Acesso em: 03 de abr. 2019.

AMORIM, R. P. L. Estudo do transporte de produtos siderúrgicos, em viagens cíclicas de comboios oceânicos, dentro de uma visão logística. 2005. 126f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Centro Tecnológico, ES, 2005.

ANDRADE, E. L. *Introdução à pesquisa operacional: método e modelos para análise de decisões*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015, 220p.

ANTT. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. *Perguntas frequentes* – Multimodal. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/cargas/arquivos_old/Perguntas_Frequentes_Multimodal.html>. Acesso em: 17 de mai. 2019.

- BABU, S. A. K. I. *et. al.* Minimizing delay of ships in bulk terminals by simultaneous ship scheduling, stockyard planning and train scheduling. *Maritime Economics & Logistics*, v. 17, 4, p.464–492, 2015.
- BALDAM, R.L.; VALE, R. de A.B. do; PEREIRA, H.R.M.; HILST, S. de M.; ABREU, M.P. de; SOBRAL, V.S. *Gerenciamento de processos de negócios: BPM – Business Process Management*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2007, 240p.
- BALLOU, R. H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009
- BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. Discrete-event system simulation. 5. ed. *Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall*, 2009, 622p.
- BATALHA, M. *Gestão Agroindustrial*. São Paulo: Atlas, 2008.
- BATEMAN, T.S.; SNELL, S.A. *Administração: construindo vantagem competitiva*. 1. ed. São Paulo: Atlas, 1998.
- BOLAND, N., Gulczynski, D. and Savelsbergh, M. (2012) A stockyard planning problem. *European Journal of Transportation and Logistics*. 1(3): 197–236, 2012.
- CABALLINI, C.; SACONE, S. Modeling and simulation of the rail port cycle. *Systems Journal*, 2015. IEEE, v. 9, n. 1, p. 273–282, 2015.
- CAMPOS, V. B. G. *Planejamento de transportes: conceitos e modelos*. 1. ed., Brochura, 188 p, 2013.
- CARNEIRO, F. M. Simulação do circuito de minério do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira (TFPM). Monografia – Especialização em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.
- CHWIF, L.; PAUL, R. J.; BARRETO, M. R. P. *Discrete Event Simulation Model Reduction: A Causal Approach*. Simulation Modelling Practice and Theory. EUA, v. 14, n. 7, p. 930-944, 2006.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações*. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. Identificação de sistemas dinâmicos lineares. 2. ed. ver. Florianópolis: Ed. UFSC, 2015. 221p.

COMEXBLOG.COM. Disponível em: < <https://www.comexblog.com.br/direito-em-foco/a-multimodalidade-no-transporte-de-cargas-no-brasil/>>. Acesso em: 17 de mai. 2019.

COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS - CSCMP. *Educating and Connecting the World's Supply Chain Professional*. 2018. Disponível em:

<https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921>. Acesso em: 25 de set. 2018.

CRAINIC, T.G.; LAPORTE, G. Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research.*, v. 97, p. 409-438, 1997.

CRAINIC, T. G.; PERBOLI, G.; ROSANO, M. Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy. *European Journal of Operational Research.*, v. 270, p. 401-418, 2018.

DATAMEX : Tecnologia da Informação. Transporte intermodal e multimodal: entenda as diferenças. Disponível em: < <http://www.datamex.com.br/blog/transporte-intermodal-e-multimodal-entenda-as-diferencas/>>. Acesso em: 13 de mai. 2019.

DCI – Diário Comércio Indústria & Serviços. *Investimento volta, mas Brasil perde liderança global*. 2018. Disponível em: <<https://www.dci.com.br/impreso/investimento-volta-mas-brasil-perde-lideranca-global-1.685788>>. Acesso em 20 set. 2018.

FANTI, M. *et al.* A simulation based decision support system for logistics management. *Journal of Computational Science*, 2015. v. 10, p. 86–96, 2015.

FARIA, C. H. F.; CRUZ, M. M. C. Simulation modelling of Vitória-Minas closed-loop rail network. *Transport Problems*, v. 10, p. 126-139, 2015.

FARIA, C. H. F. *Análise do planejamento ferroviário: uma abordagem utilizando simulação de eventos discretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Transportes, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

FERNANDES, M. G. Modelo econômico-operacional para análise e dimensionamento de terminais de contêineres e veículos – Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, SP, 2001.

FIORONI, M. M.; BOTTER, R. C.; POMPERMAYER, F. M.; FRANZESE, L. A. G. Estudo estratégico de dimensionamento da infra-estrutura do pátio ferroviário de Tubarão através de simulação. Florianópolis, XVIII ANPET Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, v. 2. p. 969-974, 2004.

FIORONI, M. M. *et al.* Railroad infrastructure simulator. In: *IEEE. Proceedings of the 37th Winter Simulation Conference. Lake Buena Vista: Winter Simulation*, p. 2581–2584, 2005.

FIORONI, M. M. *Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições.* Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

FIORONI, M. M. *et al.* Matching production planning and ship arrival scheduling by simulation. In: *Proceedings of the 42th Winter Simulation Conference. Baltimore: Winter Simulation*, p. 1990–1997, 2010.

FIORONI, M. M. *et al.* Signal-oriented railroad simulation. In: *Proceedings of the 45th Winter Simulation Conference. Washington: Winter Simulation*, p. 3533–3543, 2013.

FREITAS FILHO, P. J. Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicações em Arena. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GEERDES, M. *et al.* Modern Blast Furnace Ironmaking, *Verlag Stahleisen GmbH*, p17-32, 2004.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <
<https://www.google.com.br/maps/place/Vale+Portaria+Carapina/@-20.2818927,-40.2403624,3654m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em 22 mai. 2019.

Página acessada em 14 de Março de 2018. <https://www.google.com.br/maps/>

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introdução à pesquisa operacional. 9.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013, 1005p.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. *Relatório anual de atividades 2018*. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagramação_RelatórioAnual_versãoweb.pdf>. Acesso em 20 set. 2018.

INDEX MUNDI. *Dados históricos gráficos – Produto Interno Bruto*. 2018. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=66&c=ch&l=pt>>. Acesso em 20 set. 2018.

INDEX MUNDI. *Minério de ferro – Preço mensal*. 2019. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=min%C3%A9rio-de-ferro&meses=120>>. Acesso em 15 mai. 2019.

JAMIL, G.L.; SOARES, A.L.; PESSOA, C.R.M. Handbook of Research on Information Management for Effective Logistics and Supply Chains. *Hershey PA, USA*: IGI Global, 2016.

JORNAL DO COMÉRCIO ONLINE. Alteração de nome para o Conselho de Gerenciamento Logístico. 2004. Disponível em: <https://www.joc.com/economy-watch/name-change-council-logistics-management_20040714.html>. Acesso em 25 set. 2018.

JULIÁ, A. F. Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro. Dissertação (Mestrado Interdepartamental em Engenharia de Sistemas Logísticos). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

KAWAMOTO, E. Análise de sistemas de transporte. 2. ed. São Carlos - SP: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2015. 229p.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T., Simulation with Arena, 3. ed. McGraw-Hill, 2003.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T., Simulation with Arena, 6. ed. McGraw-Hill, 2014.

KOTTEGODA, N. T.; ROSSO, R.. Applied statistics for civil and environmental engineers. 2. Ed., Blackwell Publishing Ltd, 2008.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation, modeling and analysis. 2. ed., McGraw Hill, 1991.

LOPES, H. S. Modelagem e simulação como ferramentas ao diagnóstico operacional de sistemas: estudo aplicado ao transporte de minério de ferro na hidrovia do Araguaia-Tocantins. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

LOPES, H. S.; CARMO, B. B. T.; DUTRA, N. G. S.; PONTES, H. L. J. Simulação do transporte de minério de ferro na hidrovia do Araguaia-Tocantins. *Revista Gestão Industrial (Online)*, v. 7, n.1, p. 43-71, 2011.

LOPES, H. S. Análise do escoamento da soja brasileira através da simulação a eventos discretos. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Itajubá, MG, 2017.

LOPES, H. S.; LIMA, R. S.; LEAL, F.; NELSON, A. C. Scenario analysis of Brazilian soybean exports via discrete event simulation applied to soybean transportation: The case of Mato Grosso State. *Research in Transportation Business & Management*, v. 25, p. 66-75, 2017.

MARINOV, M.; DI GIOVANI, L.; BELLISAI, G.; CLEVERMANN, J.; MASTELLOU, A.; VICTÓRIA, D.; DELEVA, L. Analysis of rail yard and terminal performances. *Revista de Literatura dos Transportes*, v. 8, n.2, p.178-200, 2014.

MARINOV, M.; MORTIMER, P.; ZUNDER, T.; ISLAM, D. M. Z. A steady state analysis for yard performances. *Revista de Literatura dos Transportes*, v. 5, n.1, p.33-49, 2011.

MARINOV, M.; SAHIN, I.; RICCI, S.; VASIC-FRANKLIN, G. Railway operations, time-tabling and control. *Research in Transportation Economics*, v. 41, p. 59-75, 2013.

MARINOV, M.; VIEGAS, J. A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 17 n. 6, p. 1106-1129, 2009.

MARINOV, M.; VIEGAS, J. A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 19, p. 516-539, 2011.

MARTINS, R. S. et al. Fatores relevantes na contratação de serviços em terminais intermodais para graneis agrícolas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 2014. Scielo Brasil, São Paulo, v. 52, n. 2, p. 347–364, 2014.

MEIRELES, R. P. L. Modelagem e simulação da malha ferroviária em circuito fechado da Estrada de Ferro Vitória a Minas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Transportes, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

MENEZES, G. C. Modelo e algoritmos para um problema integrado de planejamento, sequenciamento e alocação de pátios. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação, BH, 2016.

MOLCK, P. H. R. Métodos heurísticos em Programação de atividades em pátios de estocagem. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2002.

MORAES, E. F. Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

NETTO, J. F.; BOTTER, R. C.; MEDINA, A. C. Analysis of capacity associated to levels of service at port terminals using systemic approach and simulation of discrete events. *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference IEEE*. Huntington Beach, CA, USA, p. 3426-3437, 2015.

OLIVEIRA, J. B.; LIMA, R. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*. v. 62, p. 166-191, 2016.

O PETRÓLEO. “As exportações brasileiras de minério de ferro para a China aumentaram 1,5% em 2017”. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/as-exportacoes-brasileiras-de-minerio-de-ferro-para-china-aumentaram-15-em-2017/>>. Acesso em 20 set. 2018.

PARAGON, O que é simulação? 2018. Disponível em: <<http://www.paragon.com.br/academico/o-que-e-simulacao/>>. Acesso em 20 set. 2018.

PEDREIRA JÚNIOR, J. U. Modelagem, simulação e otimização do transporte de cargas na Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL). 2015. 151f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Escola Politécnica, Salvador, 2015.

PEDGEN, C. D., SHANNON, R. E., SADOWSKI, R. P., Introduction to simulation using SIMAN. 2. ed. New York: *McGraw-Hill*, 1995, 640p.

PORTOGENTE. 2016. Disponível em: < <https://portogente.com.br/portopedia/74189-modais-de-transporte>>. Acesso em: 17 de mai. 2019.

PRADO, D. S. do. Usando o ARENA em Simulação: série pesquisa operacional. 5 ed. Minas Gerais: Falconi, 2014.

RAGSDALE, C. T. Modelagem e análise de decisão. São Paulo: Cengage Learning, 2011, 590f.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I.; Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. Gest. Prod., São Carlos, v. 16, n. 1, p. 25-43, jan-mar. 2009. Disponível em:< https://www.researchgate.net/publication/250984322_Aplicacao_de_simuladores_de_eventos_discretos_no_processo_de_modelagem_de_sistemas_de_operacoes_de_servicos/download>. Acesso em: 04 abr. 2019.

SANTORO, M. C. Gestão de cadeia de suprimentos. Apresentação na empresa Vale. Vale-Espírito Santo, 2017.

SAWICKI, S.; FRANTZ, R. Z.; FERNANDES, V. B.; FRANTZ, F. R.; YEVSEYEVA, I.; CORCHUELO, R. Characterising Enterprise Application Integration Solutions as Discrete-Event Systems. Handbook of Research on Computational Simulation and Modeling in Engineering. 1ed. Hershey, Pennsylvania, v. 1, p. 255-282, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281629059_Characterising_Enterprise_Application_Integration_Solutions_as_Discrete-Event_Systems/download>. Acesso em 04 abr. 2019.

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; LOPES, A. D. O.; SALLES, J. L. F.; ROCHA, H. R. O. Modelo matemático para otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem de

portos e carregamento de navios. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, PR, 2018.

SEBRAE. Ramos de atividade. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/ramos-de-atividades,8ef89e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em 22 fev. 2019.

SILVEIRA, I. M. Metodologia de otimização via simulação para dimensionamento da infraestrutura de sistemas logísticos intermodais para o escoamento de commodities. 2017. 109f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Departamento de Engenharia de Produção, 2017.

VALE. Memorial Descritivo do Terminal de Tubarão. 2015. Disponível em: <http://www.vale.com/pt/business/logistics/ports-terminals/documents/pdf/memorial_descritivo_terminal_tubarao.pdf>. Acesso em 20 set. 2018.

VALE. Carajás. 2018. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Documents/carajas/index.html>>. Acesso em 30 set. 2018.

VIANEN et.al. Stockyard dimensioning for dry bulk terminals. *TRAIL Research School*. October 2012, p. 1-16. Disponível em: < http://rstrail.nl/new/wp-content/uploads/2014/12/vianen_van_2012.pdf>. Acesso em 01 mai. 2019.

VIEIRA, R.M.T.; CRUZ, M. M. da C. Uma análise da distribuição de lotes carregados de minério de ferro ferrovia-porto: uma abordagem por simulação a eventos discretos. XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, pp.1661-1672, 2016.

VIEIRA, R.M.T. Distribuição de lotes carregados de minério de ferro ferrovia-porto: uma abordagem por simulação a eventos discretos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Espírito Santo, 2018.

WORONIUK, c.; MARINOV, M. Simulation modelling to analyse the current level of utilisation of sections along a rail route. *Journal of Transport Literarutue*, v. 7, n. 2, p. 235-252, 2013

ZAMPIROLI, J. M. Alternativas para aumento de capacidade de um Terminal Portuário de Minério de Ferro. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade SP – USP, Departamento de Engenharia de Produção, SP, 2016.

ZAMPIROLI, J.M. Alternativas para aumento de capacidade de um Terminal Portuário de Minério de Ferro. *Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios*, Florianópolis, v.10, Edição Especial 1, p.80-102, 2017.

ZHEN, L. Modeling of yard congestion and optimization of yard template in container ports. *Transportation Research Part B, Elsevier*, 90 (2016), p.83–104.

Glossário

Multimodal: O transporte multimodal de cargas é aquele que utiliza dois ou mais meios de transporte; é executado sob a responsabilidade de um único OTM; e é regido por um único contrato (ANTT, 2019).

Intermodal: O transporte intermodal é uma modalidade que utiliza duas ou mais modalidades de transporte; são envolvidos contratos distintos para cada operação e é dividida a responsabilidade entre os transportadores de cada operação, ao mesmo tempo em que ocorrem as mudanças de um modal para o outro, assim com um novo contrato entra em vigência (DATAMEX, 2019).

Apêndice – Modelo de Simulação

O modelo de simulação desenvolvido no Arena 15.1 foi dividido em três blocos como explicado na seção 3.3. Para facilitar o entendimento da lógica do modelo os blocos foram subdivididos como a seguir:

Bloco 1 – Operação de estocar material no pátio:

Sub-bloco 1.1 – Produção de material

Sub-bloco 1.2 – Empilhamento de material

Sub-bloco 1.3 – Cálculo do total empilhado e do estoque de material

Bloco 2 – Operação dos navios:

Sub-bloco 2.1 – Criação de navios

Sub-bloco 2.2 – Atracação dos navios

Sub-bloco 2.3 – Desatracação dos navios

Bloco 3 – Operação de carregamento dos navios:

Sub-bloco 3.1 – Recuperação de material

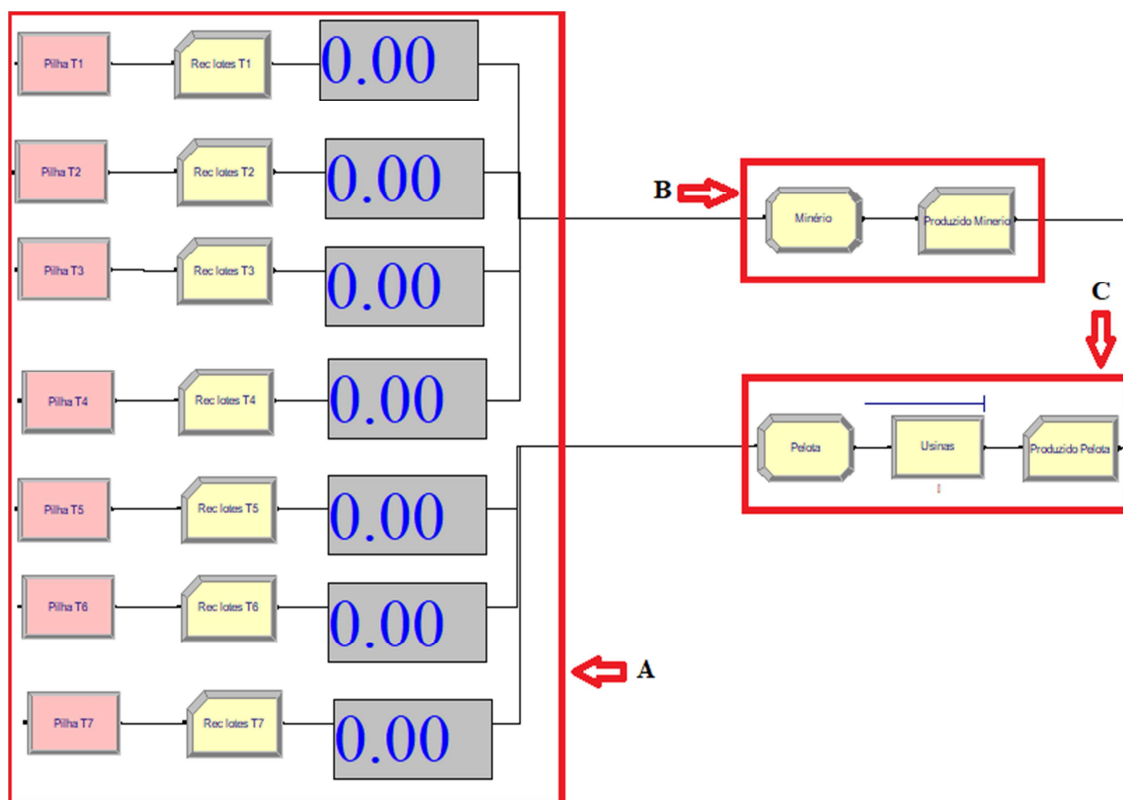
Sub-bloco 3.2 – Cálculo do total recuperado

Sub-bloco 3.3 – Carregamento dos navios

Existe ainda o Bloco 4 – Saída de dados, o qual explica a saída dos dados no Excel.

Esses sub-blocos e o Bloco 4 são descritos em detalhes a seguir, através das telas do modelo desenvolvido e em alguns casos, via as etapas de cada sub-bloco.

Sub-bloco 1.1 – Produção de material



A – Esta etapa corresponde ao último diagrama do modelo de Vieira (2018), o qual ilustra a chegada dos lotes nas pilhas de estocagem disponíveis através da Station “Pilha T1”, “Pilha T2” até “Pilha T7”. Para a contagem do total de lotes descarregados e transferidos via rota foram utilizados 7 (sete) Record, os quais mostram as contagens, porém só são visualizadas no relatório de simulação do Arena (saída de simulação). Para obter a visualização do valor na tela, foram utilizados 8 (oito) contadores, facilitando o acompanhamento durante as simulações. Acima é apresentado somente 7 (sete) contadores, pois o outro contador para o presente trabalho foi eliminado e foram acrescentadas as etapas **B** e **C**.

B – Nesta etapa é utilizado o Assign “Minério” e o Record “Produzido Minério”. O primeiro cria o atributo MF, definindo a quantidade para 5.880ton, que significa a quantidade em toneladas de 1 lote (84 vagões, para vagões de 70ton, obtendo 5.880ton), e o atributo PE, definindo o valor para zero. O segundo (Record) realiza a contagem de minério de ferro produzido em toneladas.

C – Esta etapa corresponde ao que é produzido de pelota. É utilizado o Assign “Pelota”, que é contrário ao Assign “Minério” da etapa **B**, pois cria o atributo PE e o defini para a quantidade de 5.880ton, e o atributo MF, esse sim recebe o valor zero. Em seguida, a quantidade de pelota passa pelo Process “Usinas”, que tem no recurso “Usina1”, com capacidade igual a 8, ou seja, são 8 usinas, a produção efetiva de pelota, cuja expressão

utilizada é: $(1/\text{eval}(\text{ProdUSINA1})) * 5880$. O Record “Produzido Pelota” realiza a contagem de pelota produzida em toneladas.

Obs1.: “eval” foi uma função do Arena utilizada para a leitura dos dados de entrada (variáveis/ atributos) do arquivo Excel. Esta função é usada para avaliar uma expressão de simulação contida em um argumento de *string*.

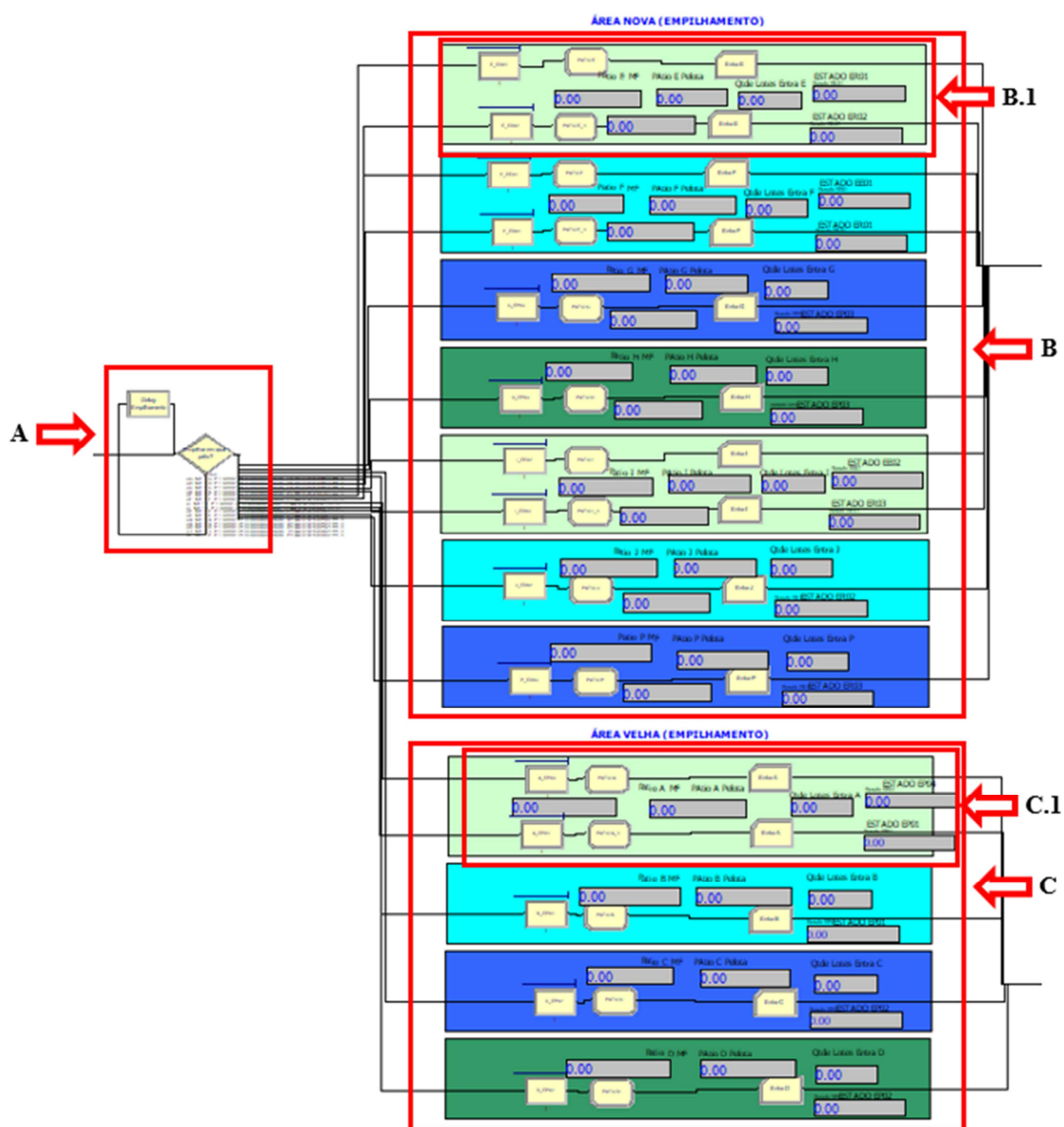
Obs2.: O bloco File (encontra-se na Barra de Projeto → Advanced Process → File) foi incluído para o acesso ao arquivo externo do Excel. Foram criados:

File 1: Entrada de dados – são transferidos os dados de entrada (Tabela 10) de um arquivo Excel para o Arena. Este arquivo Excel é identificado, via o caminho que é inserido no bloco File, uma vez já definido o tipo de acesso (Microsoft Excel).

Os conjuntos de registros (Recordsets) são inseridos no File, a fim de definir todos os dados de entrada (variáveis/ atributos) do modelo, que devem ser lidos do arquivo Excel. Para a leitura desses valores, pelo Arena, deve ser incluído o sinal de (‘) apóstrofo voltado para a esquerda da expressão, assim o valor pode ser lido como uma *string* pela função eval.

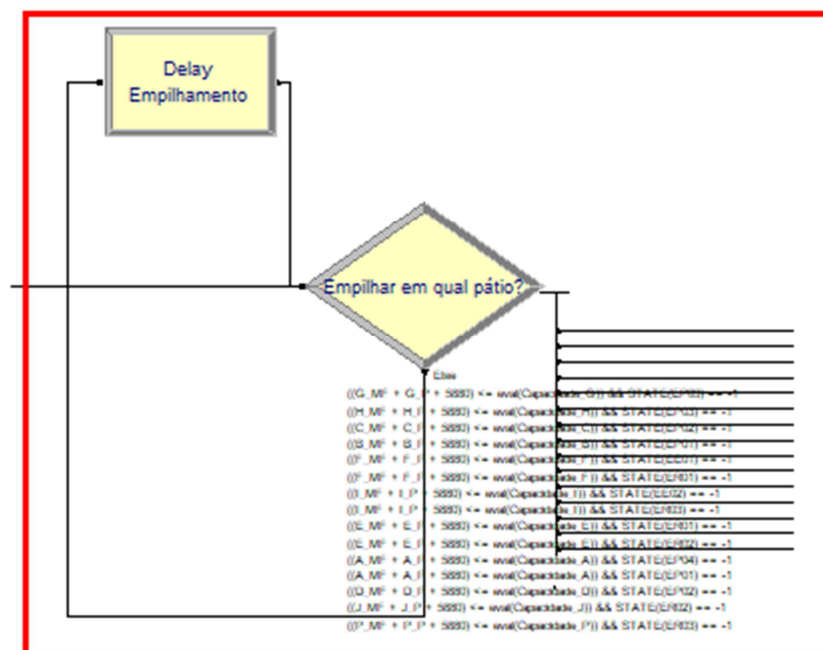
File 2: Saída de dados – acesso ao arquivo externo Excel, usando o bloco ReadWrite. Esse módulo/bloco, aqui, é utilizado para gravar dados em um arquivo. Identifica o nome, o método de acesso, a formatação do arquivo, e uma vez definido o tipo (Write to File) e o nome do Recordset “saída” (por exemplo), escreve-se em um arquivo, de acordo com a área delimitada no Excel os valores de simulação. Este módulo é explicado no **Bloco 4** – Saída de dados.

Sub-bloco 1.2 – Empilhamento de material



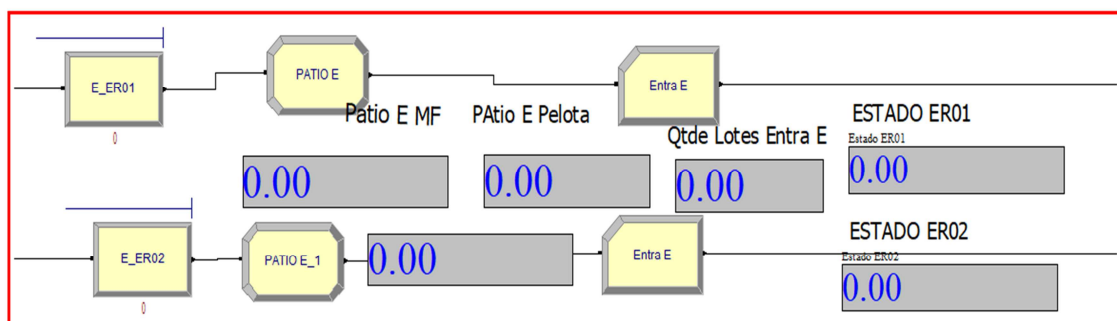
Os produtos (MF e PE), que são produzidos no **sub-bloco 1.1** (etapas **B** e **C**), também, são entradas para a etapa **A** deste **sub-bloco 1.2** (escolha e decisão do pátio para empilhamento), logo em seguida à escolha do pátio, os produtos são direcionados para estoque, na área nova – etapa **B**, ou na área velha – etapa **C**, de acordo com o pátio a que pertencem.

Para melhor visualização, segue a etapa **A** ampliada:



A – Esta etapa corresponde a escolha e decisão do pátio para empilhamento. Na sequência é utilizado um Decide “Empilhar em qual pátio?” em que é definido o pátio e a empilhadeira/híbrida, para onde irá o lote de MF ou PE (5.880 ton), que deverá ser estocado. Caso não tenha capacidade em pátio, ou as empilhadeiras estejam ocupadas, o lote segue para Delay “Delay Empilhamento”, aguardando para retornar ao Decide e retornar a decisão descrita anteriormente. Para a decisão entre pátio e empilhadeira, chegou-se à expressão: $((G_MF + G_P + 5880) \leq \text{eval}(\text{Capacidade_G})) \ \&\& \ \text{STATE}(\text{EP03}) == -1$. Assim sendo, a expressão mostra, que o lote segue para o pátio, cuja capacidade ainda não chegou ao seu limite, podendo ainda estocar lote de 5.880ton. e, após, será direcionado a máquina, cujo estado seja “desocupado”. A expressão descrita está relacionada ao pátio G, mas se repete para os demais pátios da área nova ou velha e suas respectivas máquinas que empilham.

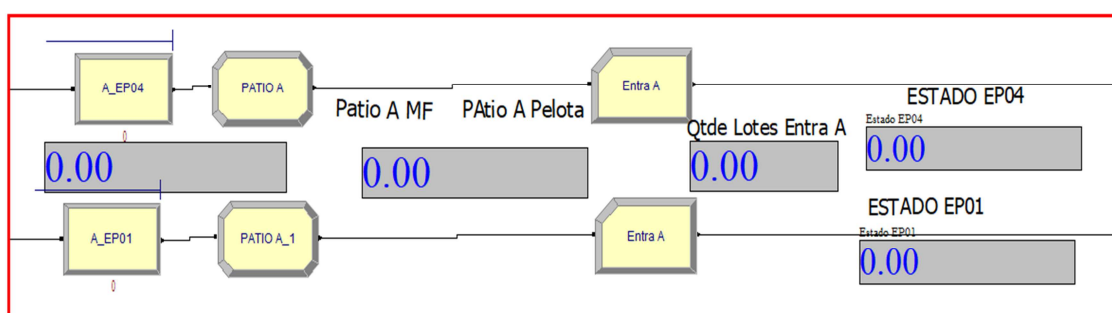
Para melhor visualização, segue a etapa **B.1** ampliada:



B.1 – Esta etapa corresponde ao empilhamento, propriamente dito, dos produtos em cada pátio da área nova. Assim sendo, uma vez definido o pátio e a empilhadeira, em seguida são utilizados dois Process “E_ER01” e “E_ER02”, cujos respectivos recursos são: “ER01” e “ER02” e cujas expressões são: “ $(1/\text{eval}(\text{ProdER01})) * 5880$ ” e “ $(1/\text{eval}(\text{ProdER02})) * 5880$ ”.

(ProdER02)) *5880”, respectivamente. Segue para os Assign “PATIO E” e “PATIO E_1”, criando-se as variáveis “E_MF” e “E_P”, em ambos Assign, totalizando-se a quantidade em toneladas de MF ($E_MF = E_MF + MF$) e a de PE ($E_P = E_P + PE$) no pátio E. Novamente é utilizado o bloco Record para gravar a quantidade de lotes que chegam no pátio. E, para obter a visualização de valores na tela foram utilizados 6 (seis) contadores, para acompanhar a quantidade em toneladas de MF no pátio E, a quantidade em toneladas de PE no pátio E, a quantidade de lotes que entram no pátio, os estados das empilhadeiras e por último um outro contador que acompanha a quantidade em porcentagem de ocupação do pátio. Isso se repete para cada pátio e para as suas respectivas máquinas.

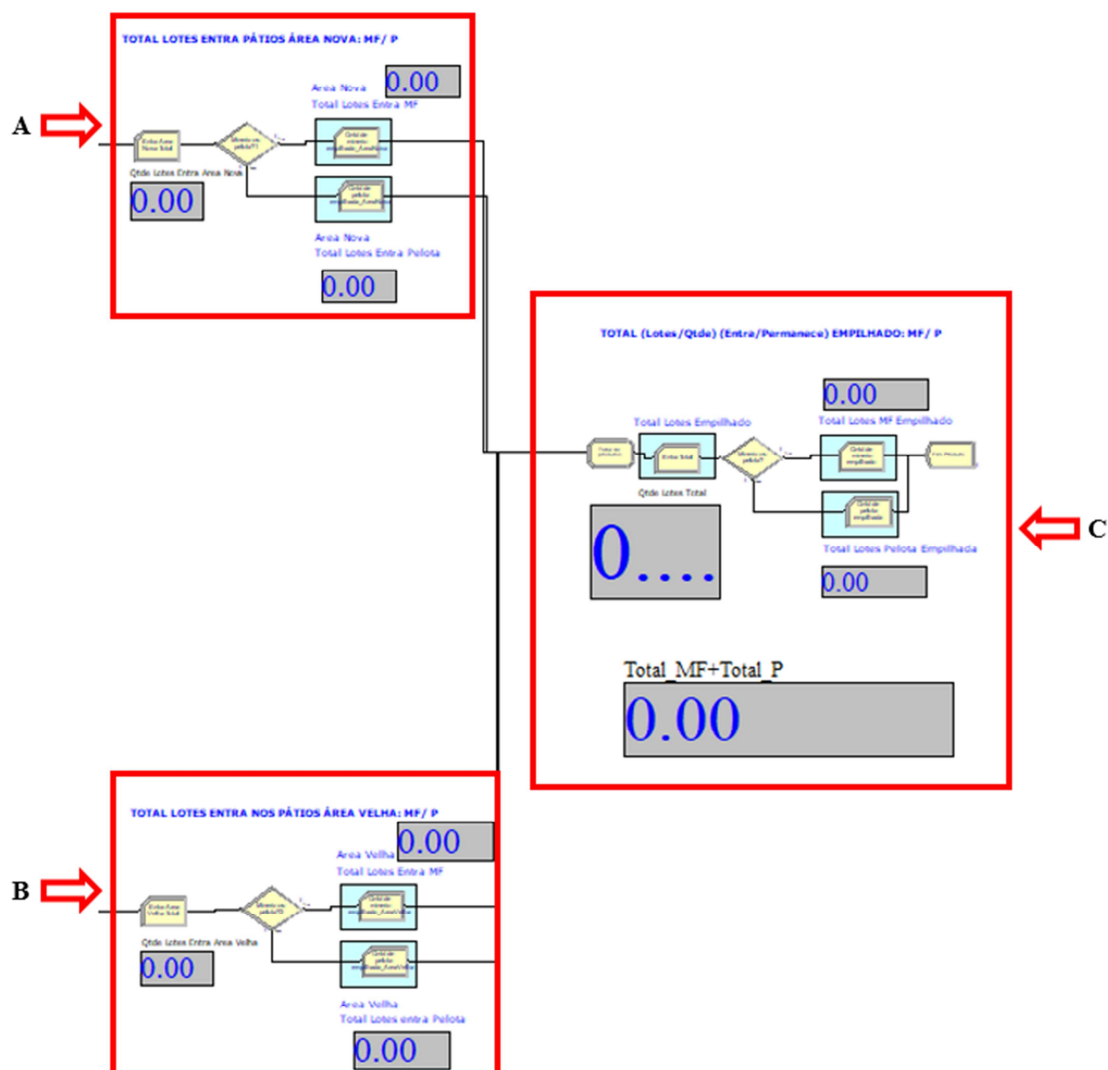
Para melhor visualização, segue a etapa **C.1** ampliada:



C.1 – Esta etapa corresponde ao empilhamento, propriamente dito, dos produtos em cada pátio da área velha. Assemelha-se ao descrito na etapa **B.1**, diferenciando-se somente quanto a quantidade de contadores, a qual apresenta somente 5 (cinco), pois eliminou-se o que acompanha a taxa de ocupação do pátio.

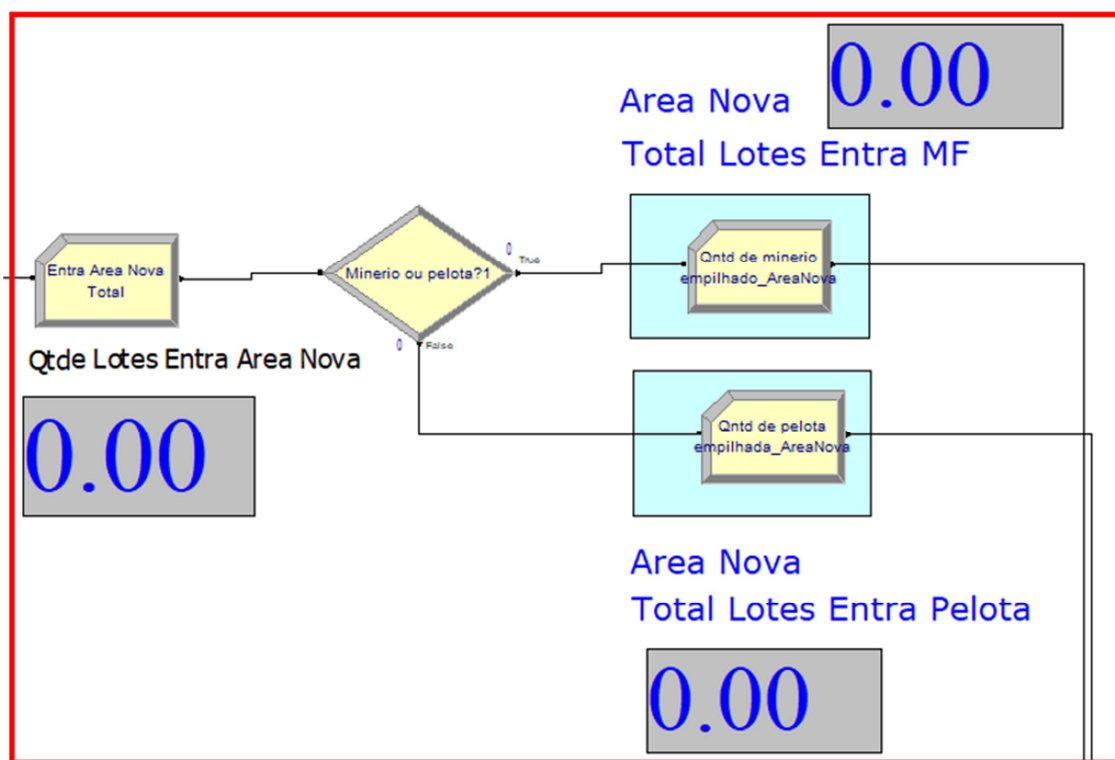
Obs.: A ordem de empilhamento para os pátios é: G/H/C/B/F/I/E/A/D/J/P. Para aqueles pátios que apresentam, além da empilhadeira, também, uma máquina híbrida, a prioridade é para a máquina que só empilha.

Sub-bloco 1.3 – Cálculo do total empilhado e do estoque de material



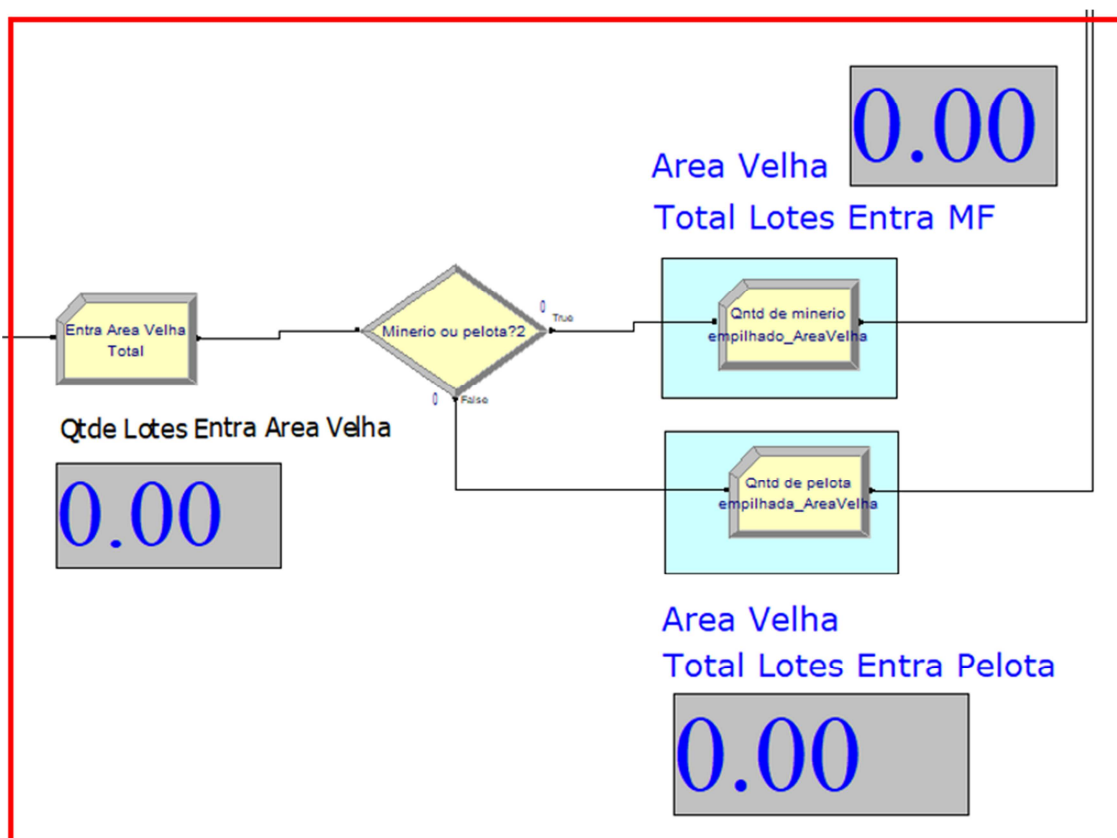
Os produtos (MF e PE), que passam pelos pátios da área nova (da etapa **B do sub-bloco 1.2**) são contabilizados na etapa **A** deste **sub-bloco 1.3**, já os produtos (MF e PE), que passam pelos pátios da área velha (da etapa **C do sub-bloco 1.2**) são contabilizados na etapa **B** deste **sub-bloco 1.3**. A etapa **C** realiza o cálculo total da quantidade de produtos em toneladas que foram empilhados nos pátios e o total de lotes empilhados.

Para melhor visualização, segue a etapa **A** ampliada:



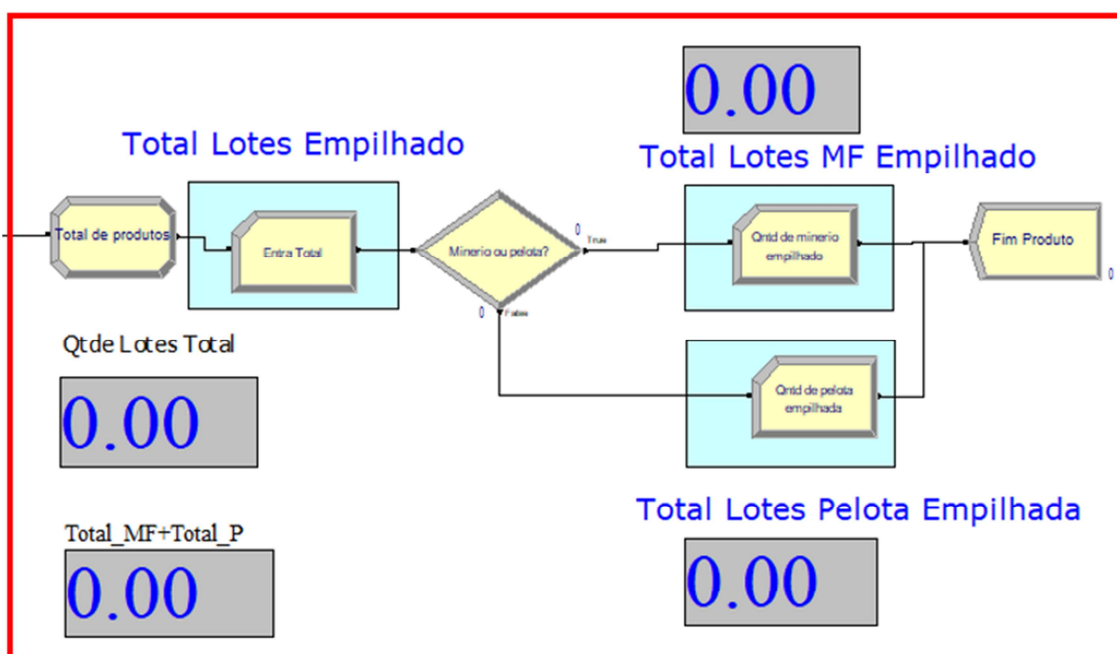
A – Esta etapa corresponde a contabilização dos lotes que entram nos pátios da área nova. O bloco Record “Entra Area Nova Total” grava a quantidade de lotes total (MF e PE). Na sequência é utilizado um Decide “Minerio ou pelota?1” em que é definido de acordo com o valor do atributo MF, se diferente de zero, o lote será contabilizado como sendo lote de MF, caso contrário, de PE. Em seguida existem 2 (dois) blocos Record “Qntd de minério empilhado_AreaNova” e “Qntd de pelota empilhada_AreaNova”, que gravam, respectivamente, as quantidades de lotes de MF e as quantidades de lotes de pelota. E, para obter a visualização de valores na tela foram utilizados 3 (três) contadores, para acompanhar as quantidades de: total de lotes empilhados e total de lotes parciais (empilhados) de MF e de PE.

Para melhor visualização, segue a etapa **B** ampliada:



B – Esta etapa corresponde a contabilização dos lotes que entram nos pátios da área velha. Portanto, sendo semelhante a etapa **A**, diferenciando-se apenas em relação a área. Dessa forma, verificar a explicação descrita para a etapa **A**.

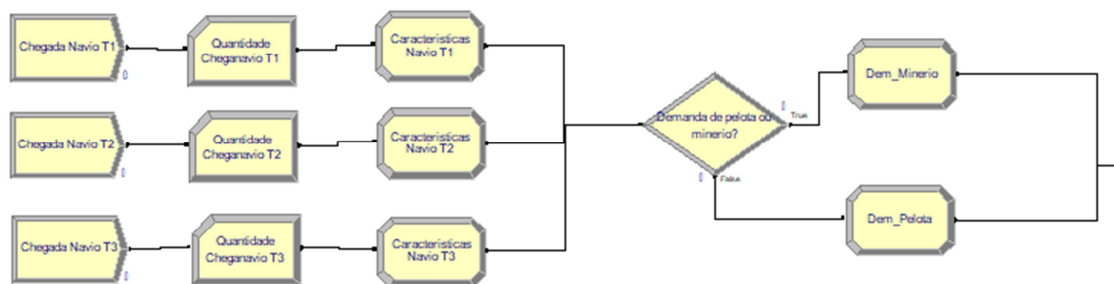
Para melhor visualização, segue a etapa **C** ampliada:



C – Esta etapa corresponde a contabilização total dos lotes, que entram nos pátios (da área nova e da área velha), que são empilhados. Além da contabilização do total de produtos estocados nos pátios em toneladas. O bloco Assign “Total de produtos” determina o total de MF e o total de PE, em toneladas, que permanece estocado no pátio após o término do tempo de simulação. Em seguida há um bloco Record “Entra Total” para gravar a quantidade de lotes que passaram pelos pátios durante o tempo de simulação. Na sequência é utilizado o Decide “Minério ou pelota?” em que é definido de acordo com o valor do atributo MF, se diferente de zero, o lote será contabilizado como sendo lote de MF, caso contrário, de PE. Em seguida são utilizados 2 (dois) blocos Record “Qntd de minério empilhado” e “Qntd de pelota empilhada”, que gravam, respectivamente, as quantidades de lotes de MF e as quantidades de lotes de pelota. E, para obter a visualização de valores na tela foram utilizados 4 (quatro) contadores, para acompanhar as quantidades de: total de lotes empilhados, total de lotes parciais (empilhados) de MF e de PE e o total de MF e de PE que ficam estocados nos pátios.

Em seguida a etapa C é finalizada pelo Dispose “Fim Produto”.

Sub-bloco 2.1 – Criação de navios



O bloco Create de nome “Chegada Navio T1” utiliza a expressão: `eval (intervnavio1)` e *First Creation*. A expressão utilizada mostra que o valor “intervnavio1” vem de uma planilha do Excel, que cria navios segundo o intervalo entre chegada de navios do tipo T1, que é o navio *panamax*. A primeira criação do navio do tipo *panamax* ocorre após a duração “*First Creation*” em horas, depois de iniciada a simulação. Esses valores de intervalo entre chegada de navios e *First Creation* são apresentados na seção 3.3.2. Os demais blocos Create de nomes: “Chegada Navio T2” e “Chegada Navio T3” estão relacionados aos tipos de navios: *capesize* e *valemax*, respectivamente.

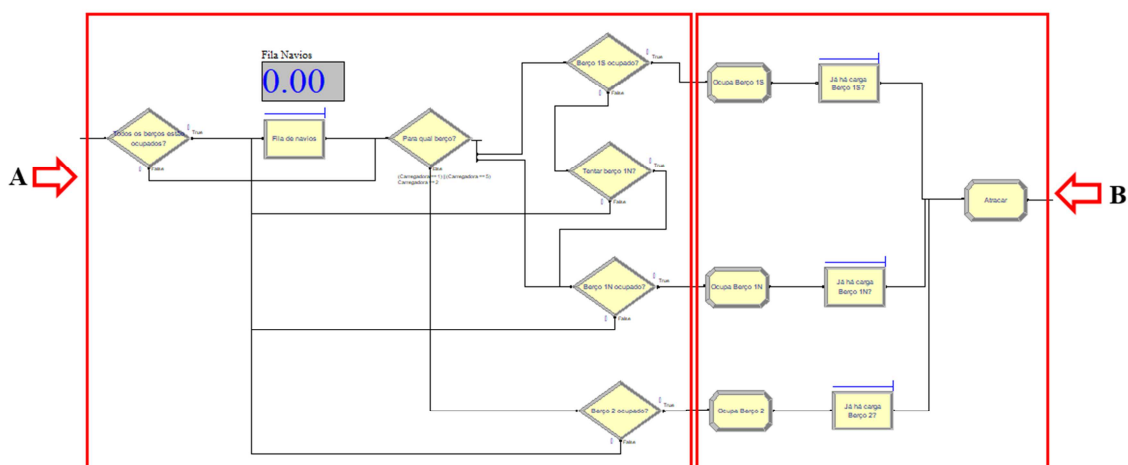
Em seguida existem blocos Record “Quantidade Cheganavio T1”, “Quantidade Cheganavio T2” e “Quantidade Cheganavio T3” para gravar estes intervalos entre chegadas gerados. Na sequência são utilizados os Assign “Características Navio T1”, “Características Navio T2” e “Características Navio T3”, criando-se atributos: Capacidade e Carregadora, que vem do Excel e que são apresentados na subseção 3.5.2.

Na sequência é utilizado um Decide “Demanda de pelota ou minerio?” que defini que 75% dos lotes seguem para as rotas do porto (cargas para embarque) e 25% dos lotes seguem para as rotas da pelotização (que irão abastecer as usinas de pelotização).

Em seguida existem dois Assign: “Dem_Minerio” e “Dem_Pelota”, criando-se os atributos: Capacidade_MF, Capacidade_Pe, PE e MF, os quais diferenciam-se entre os Assign. O primeiro Assign “Dem_Minerio” tem para os valores de: Capacidade_MF, a Capacidade inserida pelo Excel, para Capacidade_Pe, o valor igual a zero, para o Pe, zero e MF igual a 4500, invertendo-se para o Assign “Dem_Pelota”, que tem para Capacidade_Pe, a Capacidade inserida pelo Excel e a Capacidade_MF, o valor igual a zero. O Pe e o MF, recebendo 4500 e zero, respectivamente.

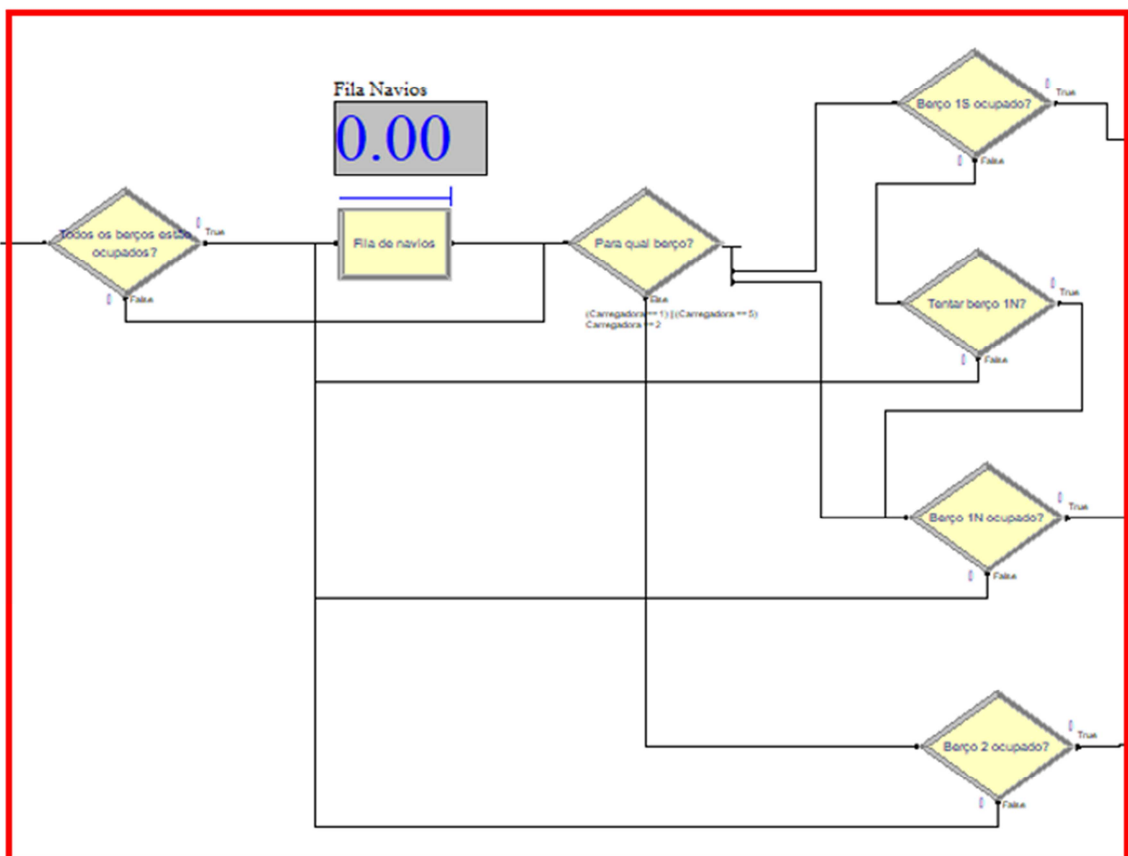
Obs.: “Carregadora” é o mesmo que carregador de navios (CN).

Sub-bloco 2.2 – Atracação dos navios



Este **sub-bloco** realiza a escolha do berço para a atracação de cada tipo de navio. A atracação ocorre, caso tenha o produto suficiente para o embarque completo do navio (capacidade máxima) e o berço esteja disponível. Após, é atualizada a capacidade (quantidade) em estoque (toneladas) de MF e de PE, sendo calculada no **Bloco 1** (estocar material no pátio), e depois do embarque por um navio, atualiza-se, então, o valor de MF e PE estocados no **Bloco 2**.

Para melhor visualização, segue a etapa A ampliada:

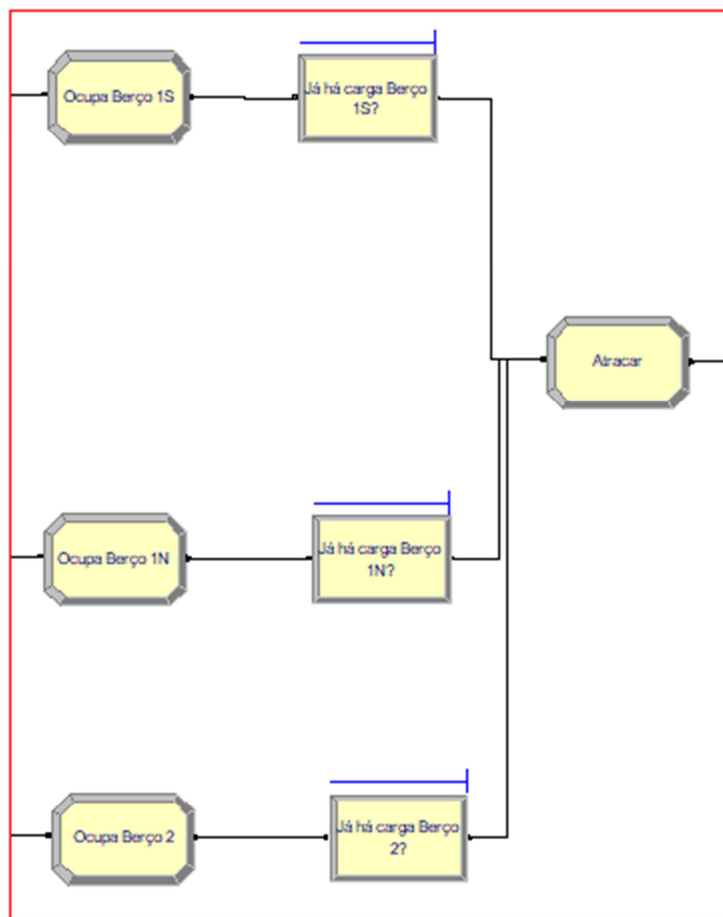


A – Esta etapa é a continuação do **sub-bloco 2.1**. Primeiro há um Decide “Todos os berços estão ocupados?” onde é definida uma expressão: $((\text{Ocupa_Berço1S} <> 0) \&\& (\text{Ocupa_Berço1N} <> 0)) \&\& ((\text{Ocupa_Berço2} <> 0))$, cujas variáveis todas diferentes de zero, significa todos os berços ocupados, portanto, deverá seguir para o Hold “Fila de Navios”, e aguardar algum navio desatracar e o seu respectivo berço ser liberado. Este tempo dura até o recebimento de um sinal do “Signal” do **sub-bloco 2.3** – Desatracação dos navios.

Por outro lado, caso alguma variável: Ocupa_Berço 1S, Ocupa_Berço 1N e Ocupa_Berço 2 seja igual a zero, significa que o seu respectivo berço estará desocupado e em seguida seguirá para um outro Decide “Para qual berço?” onde é definido qual o berço que poderá ser ocupado, de acordo com o tipo de navio que chega. Expressões utilizadas como: $(\text{Carregadora} == 1) \parallel (\text{Carregadora} == 5)$, por exemplo, garantem de acordo com o atributo Carregadora se um determinado tipo de navio poderá ou não atracar naquele berço desocupado, isso só ocorrerá caso o berço possa comportar o navio adequado, conforme sua capacidade. Para tanto, se o valor do atributo Carregadora for igual a 1, ou 5, o tipo de navio considerado poderá atracar somente no berço 1S, ou em qualquer um dos berços do píer 1 (um), ou seja, berços 1S ou 1N, se for igual a 2 (dois) seguirá para o berço 1N e igual a 3 (três) o tipo de navio seguirá para o berço 2.

Na sequência são utilizados os 3 (três) Decide “Berço 1S ocupado?”, “Berço 1N ocupado?” e “Berço 2 ocupado?” em que é definido o valor para a variável Ocupa_Berço 1S, Ocupa_Berço 1N e Ocupa_Berço 2, respectivamente. Quando os valores destas variáveis são iguais a zero seguem para etapa **B**. Caso contrário, retorna-se ao Hold “Fila de Navios” para aguardar a liberação. O resultado do Decide “Berço 1S ocupado?” poderá ser definido pelo valor da variável Ocupa_Berço 1S como igual a 1 (um), direcionando-se para o próximo Decide “Tentar berço 1N?” onde é definida a Carregadora igual a 5 dando sequência para o Decide “Berço 1N ocupado?”, cuja variável Ocupa_Berço 1N poderá seguir para a etapa **B**, se valor igual a zero, ou retorna-se ao Hold “Fila de Navios”, conforme descrito anteriormente.

Para melhor visualização, segue a etapa **B** ampliada:

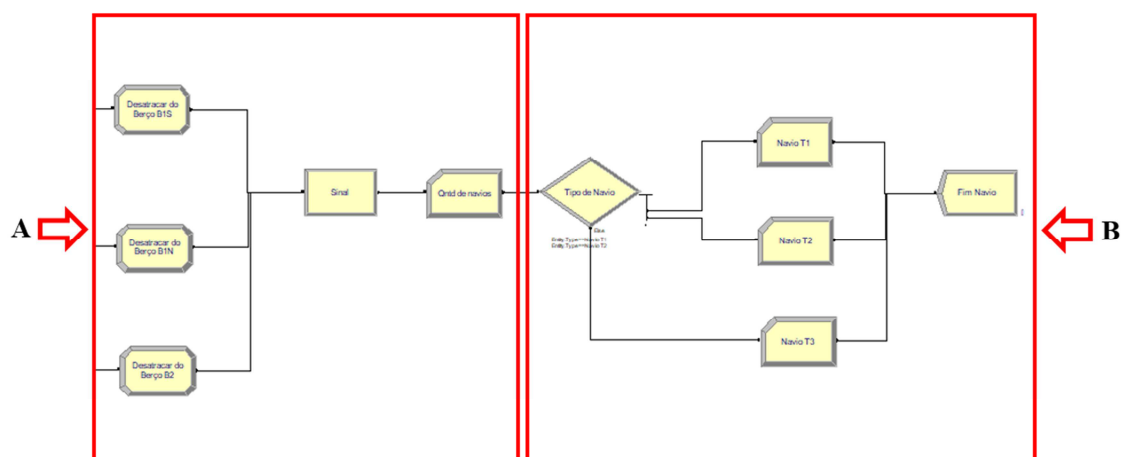


B – Esta etapa corresponde a continuação da etapa **A**, onde são utilizados 3 (três) Assign “Ocupa Berço 1S”, “Ocupa Berço 1N” e “Ocupa Berço 2”, carregando as suas respectivas variáveis, Ocupa_Berço 1S, Ocupa_Berço 1N e Ocupa_Berço 2 com o valor igual a 1 (um), que significa para cada variável respectivamente: “berço 1S, 1N e 2 ocupados”, além da criação do atributo Berço em cada Assign, com o valor igual a 1 (um) para o “Ocupa Berço 1S”, o valor igual a 2 (dois) para o “Ocupa Berço 1N” e igual a 3 (três) para “Ocupa Berço 2”, em conformidade aos seus respectivos berços: 1N, 1S e 2.

Na sequência são utilizados 3 (três) Hold “Já há carga Berço 1S?”, “Já há carga Berço 1N?” e “Já há carga Berço 2?”, que compara o estoque em toneladas, tanto de MF (Total_MF), quanto PE (Total_PE) são maiores que a capacidade dos navios.

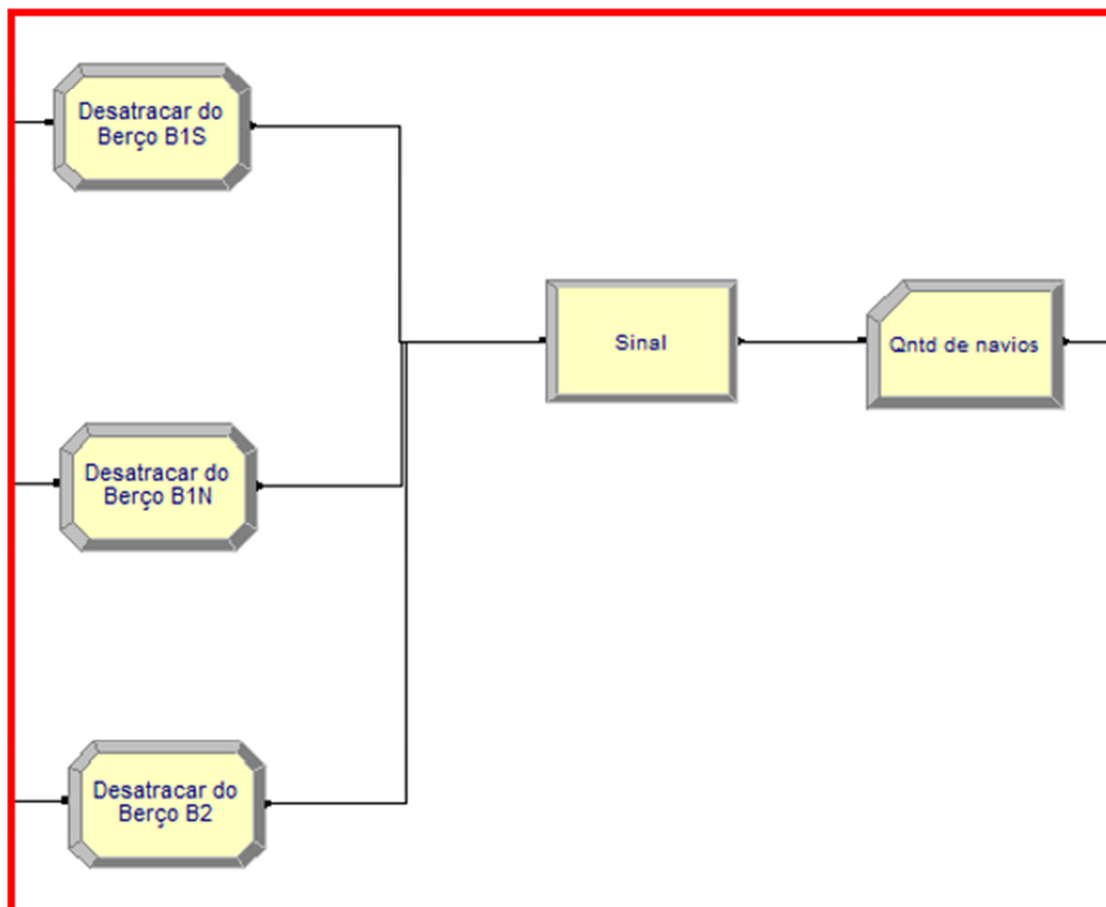
Para finalizar esta etapa foi inserido o bloco Assign “Atracar” que, tanto atualiza o valor em estoque de MF (Total_MF), quanto o valor em estoque de PE (Total_PE), também, cria o atributo escolha, cuja expressão é: ANINT(UNIF(1,14)), que é utilizado no **sub-bloco 3.1** – Recuperação de material.

Sub-bloco 2.3 – Desatracação dos navios



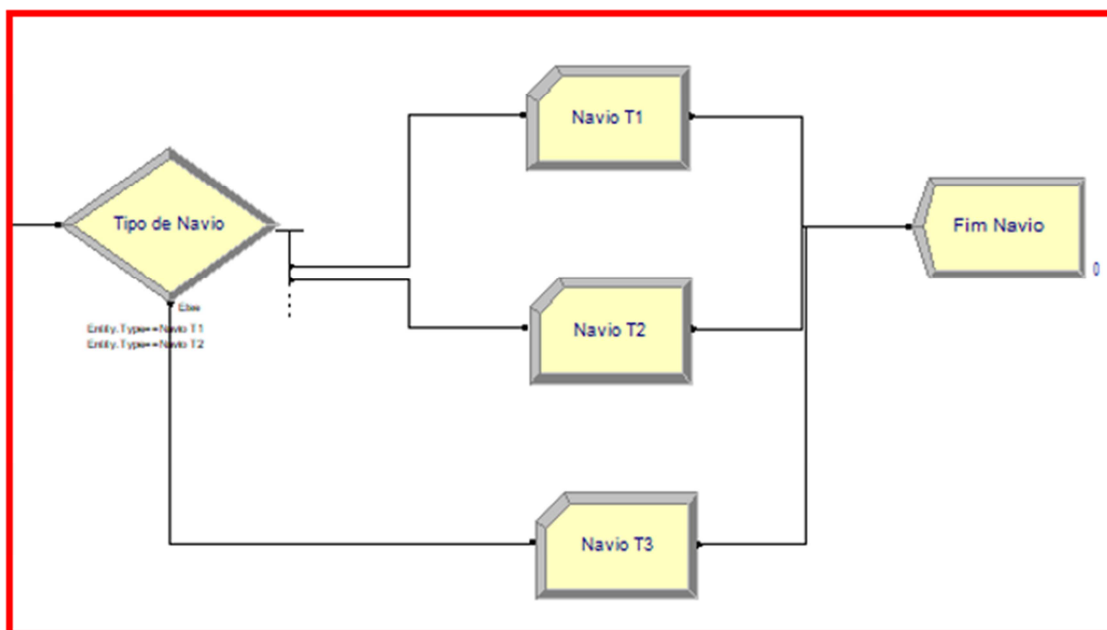
Este **sub-bloco** ocorre após o **sub-bloco 3.3**– Carregamento dos navios. Neste **sub-bloco** o navio desatraca e um berço é desocupado, e em seguida, é enviado um comando para liberar um navio em fila de espera, a fim de que venha a ocupar o berço agora livre, caso esse berço seja específico para aquele tipo de navio. Por fim, contabiliza-se a quantidade de navios por tipo (*panamax*, *capsize* e *valemax*) que deixam o porto carregado de MF ou PE.

Para melhor visualização, segue a etapa A ampliada:



A - Esta etapa corresponde a verificação de 3 (três) Assign “Desatracar do Berço B1S”, “Desatracar do Berço B1N” e “Desatracar do Berço B2” definindo o valor como igual a zero, de cada uma das suas variáveis respectivas: Ocupa_Berço 1S, Ocupa_Berço 1N e Ocupa_Berço 2, resulta na sequência do bloco Signal “Sinal”, um sinal de comando para que o navio, no **sub-bloco 2.2** – Atracação dos navios, seja liberado do Hold “Fila de Navios” e por fim, contabiliza-se a quantidade de navios que deixam o porto.

Para melhor visualização, segue a etapa **B** ampliada:



B – Esta etapa é a continuação da etapa **A**. Primeiro há um Decide “Tipo de Navio” onde são diferenciados cada um dos tipos de navios. Na sequência existem blocos Record “Navio T1”, “Navio T2” e “Navio T3” para gravar a quantidade de navios T1 (*panamax*), a quantidade de navios T2 (*capsize*) e a quantidade de navios T3 (*valemax*) que deixam o porto carregado de MF ou PE.

Em seguida a etapa B é finalizada pelo Dispose “Fim Navio”.

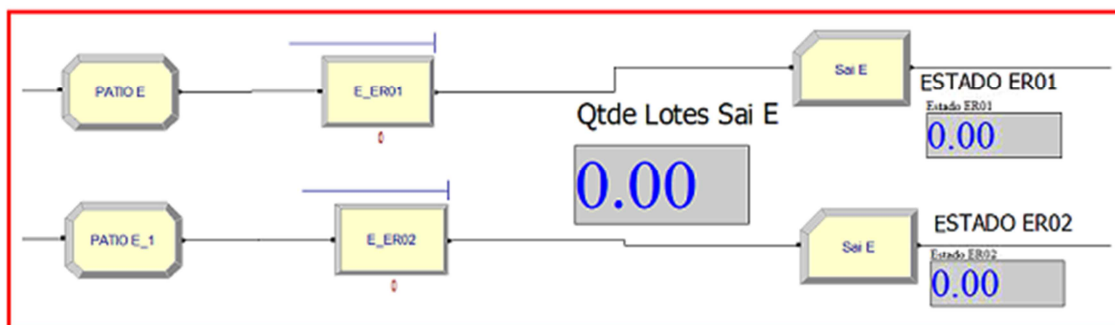
A – Esta etapa corresponde ao desmembramento, a escolha e a decisão do pátio para a recuperação. Diferente do empilhamento, antes de se chegar ao Decide “Recuperar de qual pátio?” em que é decidido, de qual pátio e de qual máquina será realizada a recuperação dos lotes de MF e de PE, passa-se pelos blocos: Separate “Desmembrar carga”, Delay “Delay Recuperação” e Assign “escolhe o pátio novamente”.

Na sequência, com a chegada da entidade navio é utilizado o bloco Separate “Desmembrar carga” que transforma a entidade navio em uma certa quantidade de “lotes” desmembrados, que no caso em questão, são lotes de 4500ton, portanto entrará neste bloco uma entidade e sairá dela quantas entidades (lotes de 4500ton) forem suficientes para compor a capacidade máxima daquele navio, que se refere à capacidade de algum tipo de navio específico (*panamax*, *capsize* e *valemax*), dando origem aos lotes (entidades menores). Esta divisão em entidades menores é necessária para que seja possível ocorrer a retirada de material dos pátios sem ocupar uma única máquina (recuperadora ou híbrida) para realizar toda a recuperação de um único navio, dando assim um ritmo para o fluxo do processo.

Em seguida, a entidade de 4500ton segue para o Delay “Delay Recuperação”, onde aguarda um determinado tempo, até dar sequência ao próximo bloco Assign “escolhe o pátio novamente” para a criação do atributo “escolha”, cujo valor é definido como sendo “ANINT (unif (1,14))”, ou seja, é uma distribuição utilizada para o direcionamento da ordem de prioridade na recuperação das entidades (lotes de 4500ton) dos pátios em geral. Esta determinação é importante, uma vez que prioriza a retirada de material, daqueles pátios, que já iniciaram o empilhamento, portanto já terão material em estoque para serem recuperados. E, das máquinas que estejam “desocupadas”, que são daqueles pátios, começando pelas recuperadoras e depois as híbridas.

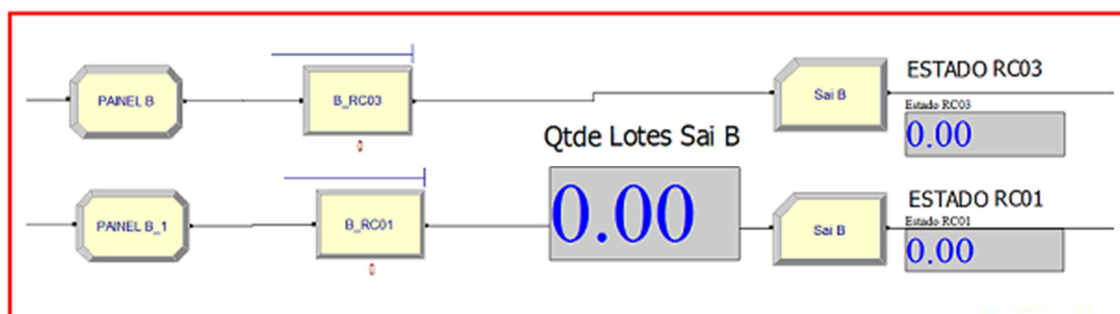
Na sequência é utilizado um Decide “Recuperar de qual pátio?” em que é definido o pátio e a recuperadora/híbrida, de onde será retirado/recuperado o material (lote de 4500ton MF ou de PE) para envio ao navio específico (MF ou PE). Caso não tenha capacidade de 4500ton de MF ou PE em pátio específico, e/ou a máquina que recupera esteja ocupada, a entidade segue para Delay “Delay Recuperação”, aguardando para retornar ao Decide, mas antes se defini a nova ordem para o atributo “escolha”, o qual é definido com valor desde 1 até 14, sendo que para os pátios/máquinas: G/RC_04 e H/RC_05 não é considerado valor, sendo prioritários para a recuperação, logo após, retorna-se a decisão descrita anteriormente. Para a decisão entre pátio e recuperadora, chegou-se a expressão: (((MF > 1) && (C_MF > 4499)) || ((PE > 1) && (C_P > 4499))) && escolha==1 && STATE(RC_03) == -1. Assim sendo, a expressão mostra, que a entidade (lote de 4500ton) será recuperada do pátio, cuja capacidade é no mínimo de 4500ton, e a sua respectiva máquina, cujo estado seja “desocupado”. A expressão descrita está relacionada ao pátio C, mas se repete para os demais pátios da área nova ou velha e suas respectivas máquinas que recuperam.

Para melhor visualização, segue a etapa **B.1** ampliada:



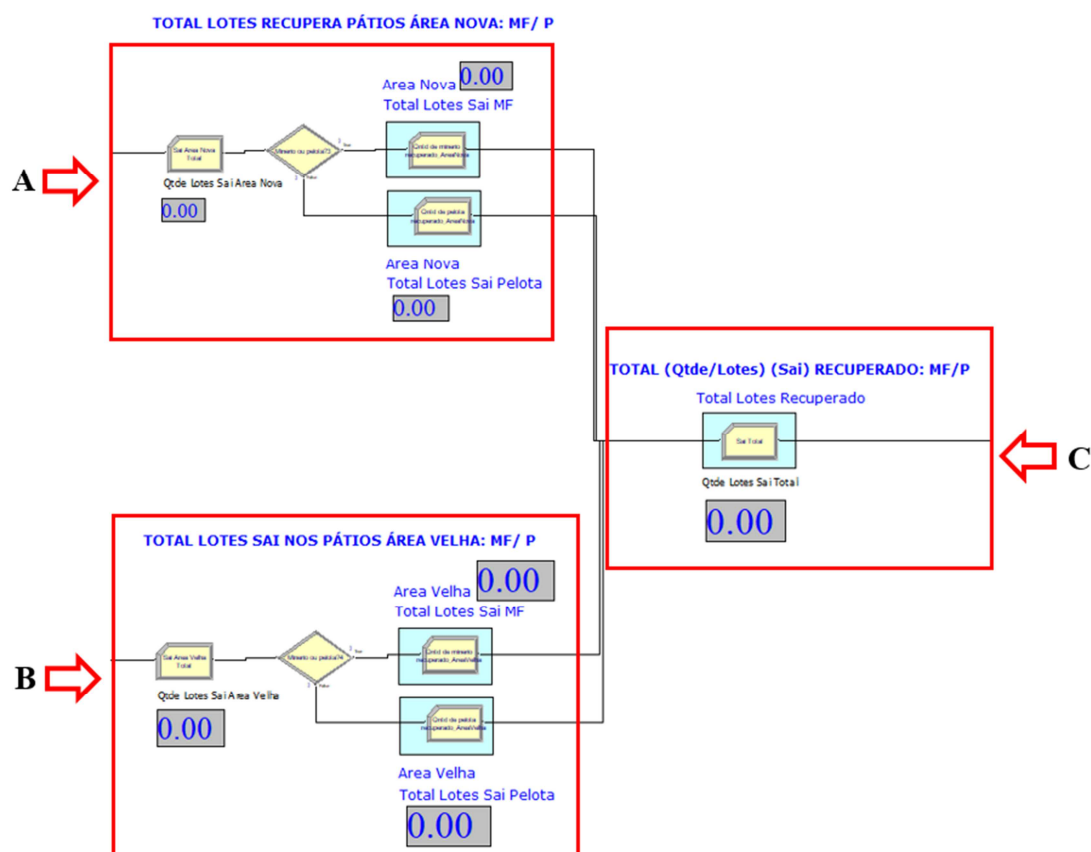
B.1 – Esta etapa corresponde a recuperação, propriamente dita, dos produtos (lotes) em cada pátio da área nova. Assim sendo, uma vez definido o pátio e a recuperadora, em seguida são utilizados os Assign “PATIO E” e “PATIO E_1”, criando-se as variáveis “E_MF” e “E_P”, em que ambos ocorre a atualização, em estoque de minério de ferro no pátio E ($E_MF = E_MF - MF$) e a atualização em estoque de pelota no pátio E ($E_P = E_P - PE$) da quantidade em toneladas de MF e de PE no pátio E. Segue para dois Process “E_ER01” e “E_ER02”, cujos, respectivos, recursos são: “ER01” e “ER02” e cujas expressões são: “ $(1/eval (ProdER01))*4500$ ” e “ $(1/eval (ProdER02))*4500$ ”, respectivamente. Na sequência é utilizado o bloco Record para gravar a quantidade de lotes/entidades que saem do pátio. Para a visualização de valores na tela foram utilizados 3 (três) contadores, para assim, acompanhar a quantidade total de lotes que saem do pátio E, e os estados das máquinas que recuperam. Isso se repete para cada pátio e as suas respectivas máquinas.

Para melhor visualização, segue a etapa **C.1** ampliada:



C.1 – Esta etapa corresponde a recuperação, propriamente dita, dos produtos em cada pátio da área velha. Assemelha-se ao descrito na etapa **B.1**.

Sub-bloco 3.2 – Cálculo do total recuperado

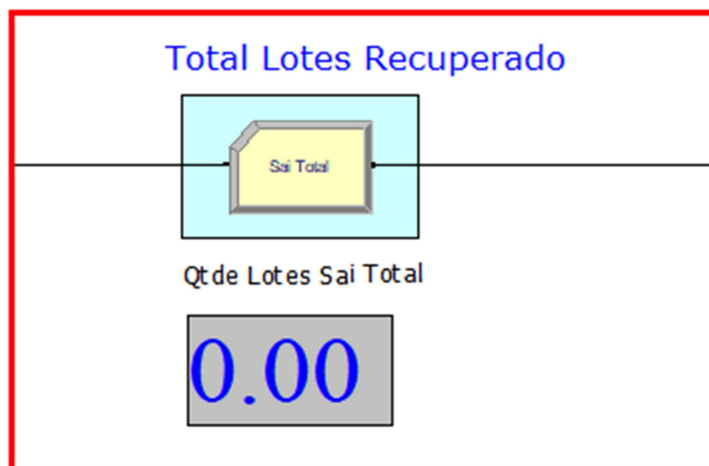


Os produtos (MF e PE), que são recuperados pelos pátios da área nova (da etapa **B do sub-bloco 3.1**) são contabilizados na etapa **A** deste **sub-bloco 3.2**, já os produtos (MF e PE), que são recuperados pelos pátios da área velha (da etapa **C do sub-bloco 3.1**) são contabilizados na etapa **B** deste **sub-bloco 3.2**. A etapa **C** realiza o cálculo total da quantidade de lotes recuperados de todos os pátios. Lembrando, que os lotes, aqui, contabilizados são originados pelo desmembramento de uma entidade “navio” (**sub-bloco 3.1** - Recuperação de material), cujo valor de sua capacidade em toneladas é dividido por 4500, ou seja, cada lote corresponde a 4500 ton.

A – Esta etapa é semelhante a etapa **A** do **sub-bloco 1.3**, com a diferença estar na concepção de saída de material dos pátios, isto é, MF e PE são recuperados para envio aos carregadores de navio.

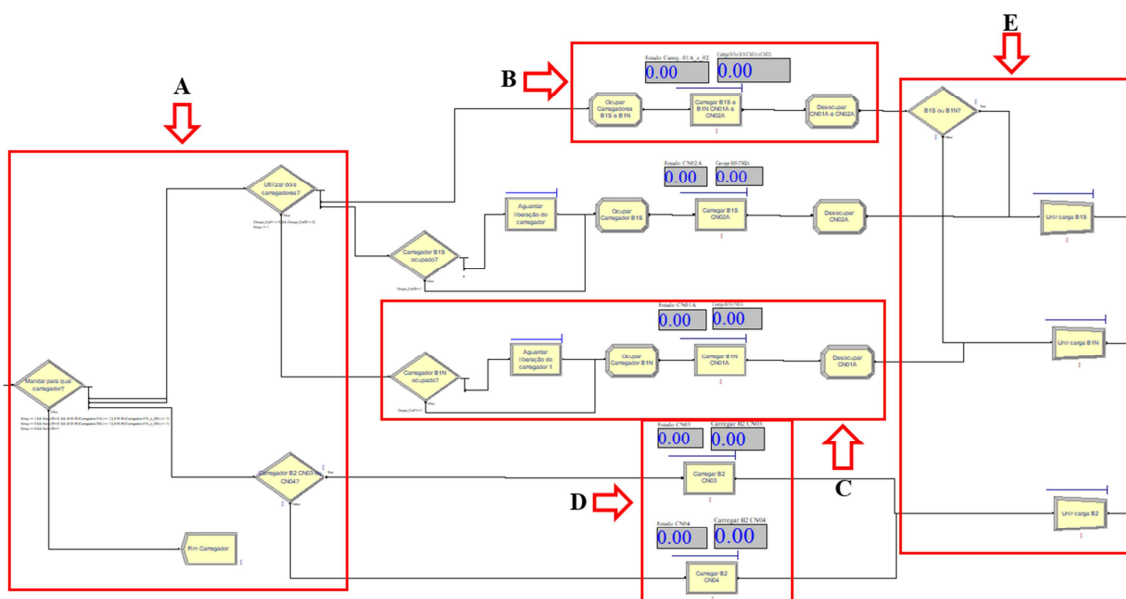
B – Esta etapa é semelhante a etapa **B** do **sub-bloco 1.3**, com a diferença estar na concepção de saída de material dos pátios, isto é, MF e PE são recuperados para envio aos carregadores de navio.

Para melhor visualização, segue a etapa **C** ampliada:



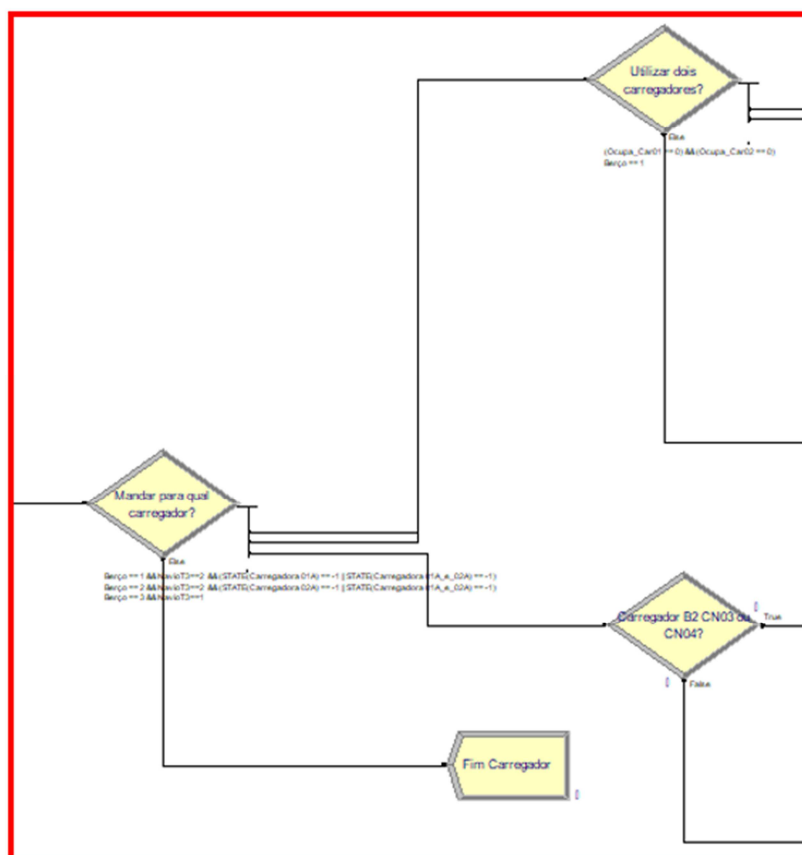
C – Esta etapa corresponde a contabilização total dos lotes, que saem dos pátios (da área nova e da área velha), que são recuperados. Há um bloco Record “Sai Total” para gravar a quantidade de lotes que saíram dos pátios durante o tempo de simulação. E, para obter a visualização de valores na tela foram utilizados 2 (dois) contadores, para acompanhar na tela a quantidade de lotes que são recuperados dos pátios, durante simulação. Para obter o valor da quantidade em toneladas de produtos recuperados, deve-se lembrar de multiplicar o total de lotes por 4500.

Sub-bloco 3.3 – Carregamento dos navios



Este **sub-bloco 3.3** é a continuação do **sub-bloco 3.2** - Cálculo do total recuperado. Pode ser definido pelas lógicas de escolha do carregador de navios a serem utilizadas para o embarque, e pelas lógicas para a formação do navio com carga completa.

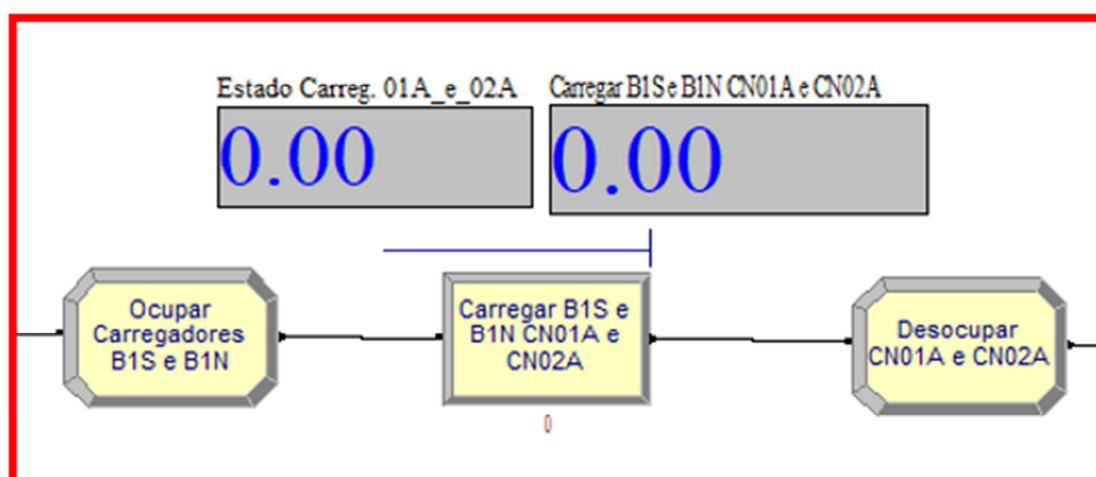
Para melhor visualização, segue a etapa A ampliada:



A – Nesta etapa, primeiro, há um Decide “Mandar para qual carregador?” onde é definido por expressões, tais como: “Berço == 1 && (STATE (Carregadora 01A) == -1 || STATE (Carregadora 01A_e_02A) == -1)”. Assim sendo, a expressão mostra que os lotes de 4500 ton (desmembramento no **sub-bloco 3.1** – Recuperação de material) seguem para o berço 1S, se ao mesmo tempo um ou outro carregador de navios: CN01A ou CN01A_e_02A estiver desocupado. O CN01A_e_02A tem o seu significado explicado na subseção 3.5.3, criando-se, assim, um novo carregador de navios, com características de ambos os carregadores (CN01A e CN02A). Outra expressão, “Berço == 2 && (STATE (Carregadora 02A) == -1 || STATE (Carregadora 01A_e_02A) == -1)”, diferenciando-se somente para o berço 1N. Em seguida, a expressão: “Berço == 3”, para dar sequência ao carregamento via berço 2, que suportam somente os navios *valemax*. E, por fim este Decide é finalizado pelo Dispose “Fim Carregador”.

Em seguida, há outros 2 (dois) Decide “Utilizar dois carregadores?” e “Carregador B2 CN03 ou CN04?”. O primeiro Decide, caso a primeira ou segunda expressões, anteriormente, descritas no Decide “Mandar para qual carregador?” for aceita, é definida a expressão: “(Ocupa_Car01 == 0) && (Ocupa_Car02 == 0)”, onde as variáveis: Ocupa_Car01 e Ocupa_Car02 devem estar desocupadas para seguirem para a etapa B, senão, a próxima expressão: “Berço == 1” dá seguimento ao Decide “Carregador B1S ocupado?” e como a sua sequência é semelhante a etapa C, não será aqui explicado, o que é só analisar a descrição da etapa C, fazendo as devidas considerações de berço e variáveis. Caso contrário, a lógica seguirá para “Carregador B1N ocupado?” que é definido na etapa C, mais a diante. O segundo Decide “Carregador B2 CN03 ou CN04?” defini o % de lotes (50%) para cada carregador no berço 2: CN03 e CN04.

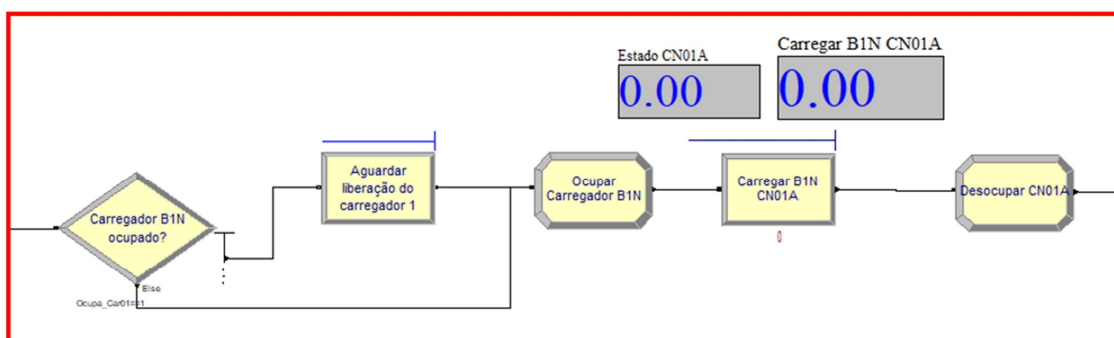
Para melhor visualização, segue a etapa **B** ampliada:



B – Esta etapa corresponde ao direcionamento dos lotes de 4500ton para serem carregados no píer 1, através do carregador “CN01A_e_02A”, caso ambos os carregadores que o constituem (CN01A e CN02A) estejam desocupados, com valores iguais a zero, conforme descrito na etapa A, fazendo, assim, os carregadores

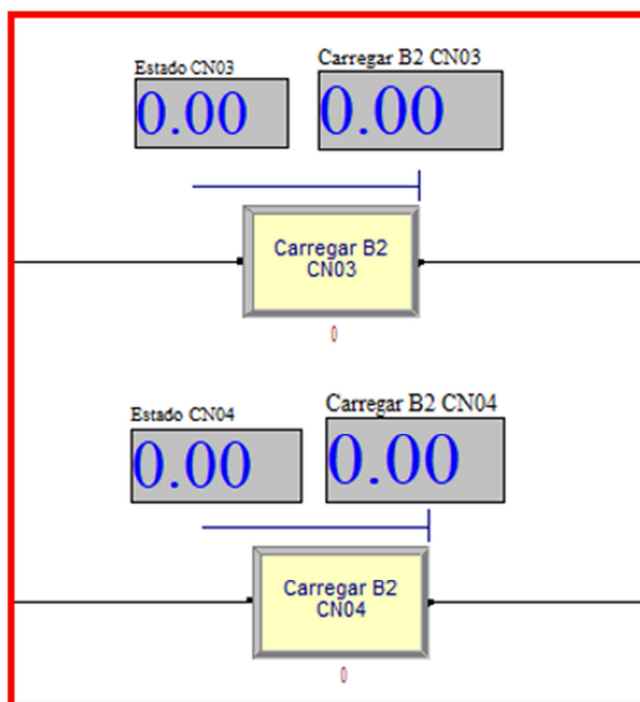
trabalharem juntos. Lembrando, que até esta etapa não será possível decidir por qual berço (1S ou 1N) será realizado o embarque dos produtos, sendo só possível na etapa E. Esta etapa dá seguimento a primeira linha de expressão do Decide “Utilizar dois carregadores?”. O primeiro bloco Assign “Ocupar Carregadores B1S e B1N”, criando-se variáveis Ocupa_Car01 e Ocupa_Car02, com valores iguais a 1. Em seguida, o Process “Carregar B1S e B1N CN01A e CN02A” onde cria o recurso “Carregadora 01A_e_02A” e cuja expressão é: “(1/eval (ProdCN01Ae02A)) * 4500”. Para finalizar o Assign “Desocupar o CN01A e CN02A”, volta a receber zero, para as variáveis: Ocupa_Car01 e Ocupa_Car02.

Para melhor visualização, segue a etapa C ampliada:



C – Esta etapa corresponde ao direcionamento dos lotes de 4500ton para serem carregados no píer 1, berço 1N, através do carregador “CN01A”. A etapa dá seguimento ao Decide “Utilizar dois carregadores?”, cuja lógica segue para o atributo “Berço == 2”, dando continuidade ao Decide “Carregador B1N ocupado?” para verificar se a variável: “Ocupa_Car01” é igual a 1, o que indica CN01A ocupado, e portanto, a entidade lote 4500ton, que está passando terá que aguardar o Hold “Aguardar liberação do carregador 1” mudar a sua condição: “Ocupa_Car01 == 0”, condição que ao ser satisfeita seguiu ao Assign “Ocupar Carregador B1N”. Caso contrário, ou seja, “Ocupa_Car01” igual a zero, seguirá direto ao Assign anterior, fazendo com que a variável “Ocupa_Car01” receba o valor igual a 1, para então, passar pelo Process “Carregar B1N CN01A” onde cria o recurso “Carregadora 01A” e cuja expressão é: “(1/eval(ProdCN01A))*4500”. Para finalizar o Assign “Desocupar o CN01A”, volta a receber zero, para a variável: Ocupa_Car01.

Para melhor visualização, segue a etapa D ampliada:

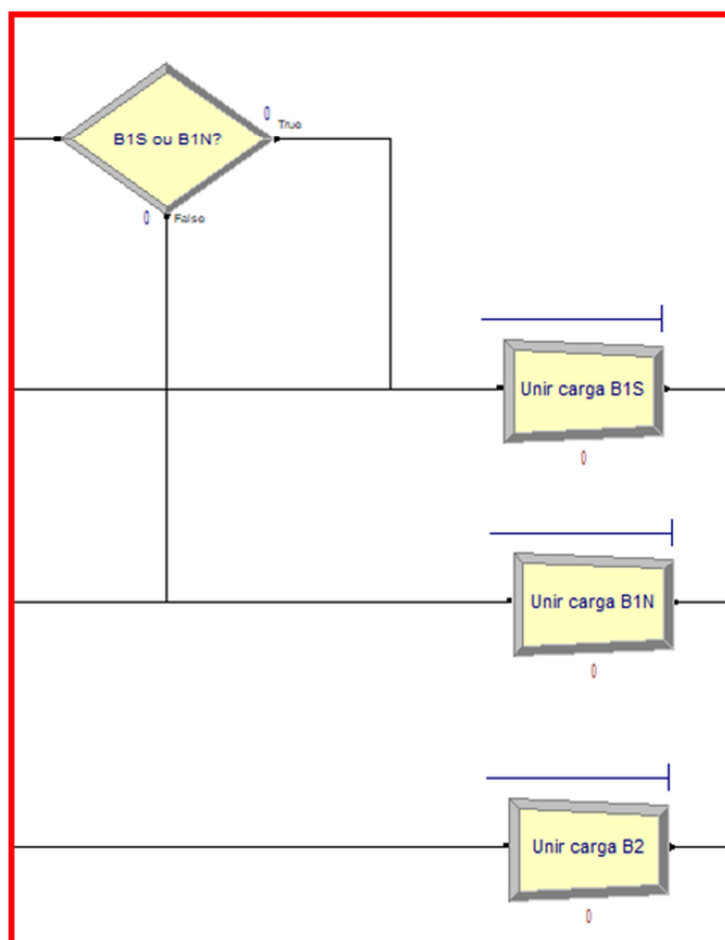


D – Esta etapa corresponde à continuação da etapa **A** e mais precisamente no Decide “Carregador B2 CN03 ou CN04?” onde é definido que metade dos lotes 4500ton segue para o Process “Carregar B2 CN03” onde cria o recurso “Carregadora 03”, cuja expressão é: “(1/eval (ProdCN03))*4500” e a outra metade segue para o Process “Carregar B2 CN04”, cujo recurso “Carregadora 04” e expressão: “(1/eval (ProdCN04))*4500”.

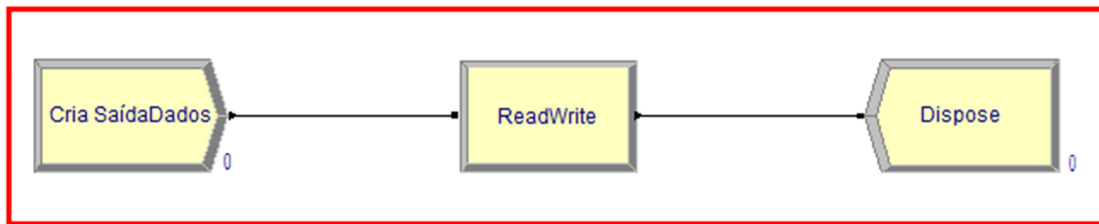
Para melhor entendimento e visualização, segue a explicação e logo após a ampliação da etapa **E**:

E – Etapa que corresponde à finalização das etapas **B**, **C** e **D** e, assim, finalizando o **sub-bloco 3.3** – Carregamento dos navios. Esta etapa é a continuidade da etapa **B** no Decide “B1S ou B1N?” para verificar se os lotes serão embarcados no berço 1S ou berço 1N, lembrando que na etapa **B** o embarque é sempre pelo carregador “CN01A_e_02A. Caso o “Berço==1” o embarque será no berço 1S, caso contrário no berço 1N. Na sequência, as entidades “lotes de 4500ton” se juntarão em um único “lote navio” até chegarem ao valor da capacidade do navio que os originaram, formando novamente a entidade navio. Isso, através do bloco Batch “Unir carga B1S”, “Unir carga B1N” e “Unir carga B2”, respectivamente, ligados aos seus berços específicos para embarque e cujo tamanho é: (Capacidade/4500).

Após esta etapa, com a união da carga (capacidade máxima do navio), forma-se novamente a entidade navio, dando continuidade ao **sub-bloco 2.3** – Desatracação dos navios.



Bloco 4 – Saída de dados



Este bloco representa a plotagem dos dados de saída na planilha Excel, sendo gerados os resultados referentes às Tabelas 12, 14, 16 e 18: Valores médios acumulados dos pátios, para cada um dos cenários de 1 a 4, respectivamente.

O **Bloco 4** contém 3 (três) blocos do Arena: Create, ReadWrite e Dispose. O Create “Cria SaídaDados” gera uma entidade por dia, durante 120 dias (mesma duração de cada rodada – 120 dias), porém com um número de simulações igual a 5 (cinco). Seguindo para o bloco ReadWrite “ReadWrite” onde são definidas tarefas (*assignments*) no Arena, como:

“**NC(EmpilhadoMF)*5880**”, quantidade empilhada de MF em toneladas;

“**NC(EmpilhadoPE)*5880**”, quantidade empilhada de PE em toneladas;

“**Total_MF**”, estoque de MF em toneladas;

“**Total_PE**”, estoque de PE em toneladas;

“**(NC(EmpilhadoMF)*5880) + (NC(EmpilhadoPE)*5880)**”, total de produtos empilhado em toneladas;

“**Total_MF + Total_PE**”, estoque total de produtos em toneladas;

“**(NC(RecuperadoAreaNovaMF) + NC(RecuperadoAreaVelhaMF)) * 4500**”, total de produtos recuperados de MF em toneladas;

“**(NC(RecuperadoAreaNovaPE) + NC(RecuperadoAreaVelhaPE)) * 4500**”, total de produtos recuperados de PE em toneladas; e

“**NC(SaiTotal) * 4500**”, quantidade total de produtos que deixam os pátios para serem carregados, ou seja, total de produtos recuperados, em toneladas.

Cada uma dessas tarefas é composta por $5 \times 120 = 600$ dados, onde o 5 (cinco) representa as 5 replicações/rodadas, sendo constituída de 5 grupos de 120 dados. Daí nasce os resultados, como média das 5 replicações (sendo eliminados os 20 primeiros dados – *warm up*), sendo os seguintes:

- Ocupação acumulada dos pátios (100 dias);
- Estoque acumulado dos pátios (100 dias);
- Empilhamento acumulado dos pátios (100 dias) e

- Recuperação acumulada dos pátios (100 dias).

Obs.:

- A ocupação acumulada dos pátios por dia, como sendo o Total MF + Total PE dividido pelo estoque estático (3.340.000,00). Daí, tira-se a média dos dados para as 5 (cinco) rodadas ao final dos 120 dias, mas se elimina os 20 dias, obtendo-se os valores da média, desvio padrão, mínimo e máximo para cada cenário, contando os 100 dias restantes em cada rodada;

- O estoque acumulado dos pátios por dia, corresponde ao mesmo tratamento dos dados descrito anteriormente, porém para os seguintes dados: **Total_MF**, **Total_PE** e **Total_MF + Total_PE**;

- O empilhamento acumulado dos pátios por dia, corresponde ao mesmo tratamento dos dados anteriores, porém para os seguintes dados: Empilhado MF (**NC(EmpilhadoMF)*5880**), Empilhado PE (**NC(EmpilhadoP)*5880**) e Empilhado MF + PE (**(NC(EmpilhadoMF)*5880) + (NC(EmpilhadoPE)*5880)**) e,

- A recuperação acumulada dos pátios por dia, corresponde ao mesmo tratamento dos dados anteriores, porém para os seguintes dados: Recuperado MF (**(NC(RecuperadoAreaNovaMF) + NC(RecuperadoAreaVelhaMF))*4500**), Recuperado PE (**(NC(RecuperadoAreaNovaPE) + NC(RecuperadoAreaVelhaPE))*4500**) e Recuperado MF + PE (**NC(SaiTotal)*4500**)

Em seguida é finalizado pelo Dispose “Dispose”.