



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS**

FLÁVIO OLIVEIRA DE BRITO

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO HÍBRIDA EM UM AMBIENTE
LOGÍSTICO**

Limeira
2018

FLÁVIO OLIVEIRA DE BRITO

APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO HÍBRIDA EM UM AMBIENTE LOGÍSTICO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura, na área de Pesquisa Operacional e Gestão de Processos

Orientador: PROF. DR. EDUARDO PAIVA OKABE

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO FLÁVIO OLIVEIRA DE BRITO, E ORIENTADA PELO PROF. DR. EDUARDO PAIVA OKABE

Limeira
2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Sueli Ferreira Júlio de Oliveira - CRB 8/2380

B777a Brito, Flavio Oliveira, 1989-
Aplicação da simulação híbrida em um ambiente logístico / Flavio Oliveira de Brito. – Limeira, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Eduardo Paiva Okabe.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Simulação (Computadores). 2. Sistemas híbridos. 3. Logística - Modelos matemáticos. I. Okabe, Eduardo Paiva. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Application of hybrid simulation in a logistical environment

Palavras-chave em inglês:

Simulation (Computers)

Hybrid simulation

Logistics - mathematical models

Área de concentração: Pesquisa Operacional e Gestão de Processos

Titulação: Mestre em Engenharia de Produção e de Manufatura

Banca examinadora:

Eduardo Paiva Okabe [Orientador]

José Arnaldo Barra Montevechi

Paulo Sérgio de Arruda Ignácio

Data de defesa: 24-08-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia de Produção e de Manufatura

Folha de Aprovação

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Paiva Okabe (Orientador/Presidente)
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Dr. Jose Arnaldo Barra Montevechi
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Prof. Dr. Paulo Sergio de Arruda Ignácio
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Limeira
2018

Aos meus pais e avós

Agradecimentos,

À minha família e amigos que me apoiaram e incentivaram ao longo deste período, e compreenderam as minhas ausências mesmo em momentos importantes.

Ao Prof. Dr. Eduardo Okabe, pela paciência e orientação durante esta importante etapa da minha vida.

RESUMO

Devido a crescente utilização da simulação como auxiliar na tomada de decisões de curto, médio e longo prazo, aumenta-se também a necessidade de maior precisão nos resultados obtidos a partir de modelos computacionais que representam a realidade operacional de companhias de diversas áreas. Desta forma, percebe-se dentre as mais comuns aplicações da Simulação de Eventos Discretos um baixo detalhamento de parâmetros da simulação possivelmente importantes devido ao seu alto impacto nos indicadores finais analisados, sendo os mesmos simplificados através de médias ou curvas estatísticas obtidas através de amostras específicas, das quais normalmente não são atualizadas após a mudança do ambiente simulado.

Sendo assim, ao invés da utilização de médias ou curvas estatísticas, este trabalho propõe a aplicação de equações dinâmicas, pertencentes a Simulação de Eventos Contínuos, em conjunto com a Simulação de Eventos Discretos em um ambiente logístico através da alteração do método de cálculo da velocidade de uma empilhadeira considerando fatores como torque, massa transportada, massa da empilhadeira, dentre outros, analisando em diferentes cenários o comportamento de um modelo de simulação discreta, construído com a utilização de médias, e outro com equações dinâmicas, identificando em quais situações os métodos se diferem, sendo mais ou menos atrativos. Com o objetivo de simplificar a análise dos resultados, a diferença entre os cenários analisados se resume na variação da massa transportada, demanda de itens a serem transportados e distância percorrida pelas empilhadeiras, identificando ao final das análises que existe uma variação de até 15% na capacidade de transporte quando o layout é alterado para uma distância de deslocamento reduzida, tornando a empilhadeira híbrida menos produtiva devido a mesma se adaptar ao ambiente simulado de forma dinâmica.

Palavras-chave: Simulação discreta. Simulação contínua. Simulação híbrida. Logística.

ABSTRACT

Due to the increasing use of simulation as an aid to support decisions in short, medium and long periods, there is also a need for greater accuracy in the results obtained from computational models that represent the operational reality of companies from different areas. In this way, among the most common applications of Discrete Events Simulation is checked a low detailing of possibly important simulation parameters due their high impact in the final indicators analyzed, which is usually simplified through averages or statistical curves obtained through specific samples, which are not usually updated after the simulated environment changes.

Therefore, instead of the use of averages or statistical curves, this work proposes the application of dynamic equations, belonging to Continuous Event Simulation, together with Discrete Event Simulation in a logistic environment by changing the method of calculating the speed of a forklift considering factors such the torque, mass transported, forklift mass, and others, thus measuring the impact of changing an environment with different load profiles in a discrete simulation model built using averages, and another built using dynamic equations, identifying in which situations the differ methods, being more or less attractive. In order to simplify the results analysis, the difference between scenarios can be summarized in mass transported, demand for items to be transported and the distance traveled by the forklifts, identifying results up to 15% of difference in carrying capacity when the layout is changed to shorter distance, becoming a hybrid forklift in less productivity due his ability to adapt to another environment dynamically.

Keywords: Discrete-event simulation. System dynamics simulation. Hybrid simulation. Logistics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Sequência de etapas de um projeto de simulação. Fonte: Montevechi et al. (2010)	21
Figura 2.2 - Nível de líquido do Tanque - Thomas P. (1999) - Livro Simulation of Industrial Processes for Control Engineers	25
Figura 2.3 - Consumo de combustível do veículo em função da condição de operação do MCI (Eckert, 2017).	28
Figura 2.4 - Interação conceitual entre Simulação Discreta e Contínua. Zeigler et al. (1976).....	29
Figura 2.5 - Trajetória linear de um Sistema Dinâmico (DS) em momentos discretos. Fonte: Giambiasi e Carmona (2006).	31
Figura 2.6 - Abordagem de Abduaziz et al. (2014) para aplicação da simulação híbrido	33
Figura 2.7: Consumo de combustível real x previsto (Diandarloo e Siami-Irdemoosa (2016)).....	38
Figura 3.1: Empilhadeira subindo em aclave (Amaral, 2016).....	42
Figura 3.2: Variação da Velocidade x Tempo	43
Figura 3.3 – Períodos em aceleração, velocidade nominal e frenagem.....	45
Figura 3.4 - Fluxograma de cálculo do tempo de deslocamento da empilhadeira	49
Figura 3.5: Modelo de simulação criado no software FlexSim	50
Figura 3.6: Consumo da empilhadeira ao longo da simulação	52
Figura 3.7: Variação do eixo Y da empilhadeira ao longo da simulação	52
Figura 3.8: Bloco de programação para cálculo do consumo da empilhadeira.....	53
Figura 3.9: Resultado do tempo computacional com o código direto no software FlexSim.	53
Figura 3.10: Resultado do tempo computacional com o código executado em uma biblioteca externa	54
Figura 4.1 - Layout Modelo de Simulação.....	55
Figura 4.2- Planta baixa do modelo simulado	56
Figura 4.3 – Componentes do Tempos de ciclo da empilhadeira	57
Figura 4.4 - Resultado de 8 horas simuladas.....	59

Figura 4.5 - Gráfico de utilização da Empilhadeira Discreta	60
Figura 4.6 - Resultado de 50 replicações do modelo observando o total de itens transportados	61
Figura 4.7 - Comportamento da fila de peças no Ponto de Carga com variabilidade na chegada.....	62
Figura 4.8 - Ociosidade da Empilhadeira com inserção da variabilidade do tempo de chegada de entidades	63
Figura 4.9 - Utilização da Empilhadeira Híbrida	64
Figura 4.10 - Variação da velocidade da empilhadeira ao longo do tempo.....	65
Figura 4.11 - Detalhamento dos motivos das reduções de velocidade da empilhadeira ao longo do tempo	66
Figura 4.12- Resultado de 50 replicações do modelo observando o total de itens transportados pela empilhadeira híbrida	68
Figura 4.13 - Explicitação dos períodos em cada estado.....	69
Figura 4.14 - Comparação entre Empilhadeira Discreta e Híbrida.....	71
Figura 4.15 - Conteúdo do Buffer em um cenário com demanda balanceada	72
Figura 4.16 - Diferença do conteúdo do Buffer (Modelo Híbrido - Modelo Discreto) em um cenário com demanda balanceada	72
Figura 4.17 - Comparação do total transportado em um cenário balanceado	73
Figura 4.18 - Comparação da utilização das empilhadeiras em uma replicação de um cenário balanceado	73
Figura 4.19 - Comparação entre Total de Itens Transportados e Utilização das Empilhadeiras em um cenário de baixa demanda.....	74
Figura 4.20 - Comparação do total transportado em um cenário com diferentes perfis de demanda.....	76
Figura 4.21 - Comparação do total transportado em um cenário com diferentes perfis de demanda com chegada balanceada.....	77
Figura 4.22 - Teste de Normalidade para os cenários com Perfis de chegada diferentes (Software Minitab).....	79
Figura 4.23 - Teste de variância entre os cenários com Perfis de chegada diferentes e demanda balanceada.....	80
Figura 4.24 - Resultado teste de hipóteses 2 Sample t para diferentes Perfis de demandas com chegada balanceada.....	81

Figura 4.25 - Total de Itens Transportados por cada tipo de Empilhadeira.....	83
Figura 4.26 - Ociosidade em cada tipo de Empilhadeira.....	83
Figura 4.27 - Relação entre Número de Peças Transportadas e Ociosidade Médias das Empilhadeiras.....	84
Figura 4.28 - Layout com distâncias reduzidas.....	85
Figura 4.29 - Comparação do total transportado entre empilhadeiras em um cenário com distâncias reduzidas.....	86
Figura 4.30 - Comparação entre períodos de aceleração da empilhadeira em diferentes layouts.....	87
Figura 4.31 - Diferença peças transportadas x Distância entre pontos.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Massas das entidades simuladas	56
Tabela 4.2 - Cálculo teórico da utilização da empilhadeira	59
Tabela 4.3 - Tempo de permanência da empilhadeira em cada período de deslocamento.....	67
Tabela 4.4 - Características empilhadeira (fonte: www.toyotaforklift.com).....	70
Tabela 4.5 - Tabela de perfis de cargas transportadas	75
Tabela 4.6 - Total de peças transportadas referentes a dois cenários de diferentes Perfis de demanda e tipos de empilhadeiras	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
FCA	Faculdade de Ciências Aplicadas
PME	Pequenas e Médias Empresas
SBU	Sistema de Bibliotecas da Unicamp
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time To Repair
DESS	Differential Equation System Specifications
DTSS	Discrete Time System Specifications
DEVS	Discrete Event System Specifications
CNC	Computer Numeric Control
MCI	Motor de Combustão Interna
SD	System Dynamics
SKU	Stock Keeping Unit
DLL	Dynamic-Link Library
PEM	Polymer Electrolyte Membrane
CD	Centro de Distribuição

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1.	Simulação	18
2.2.	Simulação de Eventos Discretos	22
2.3.	Simulação Contínua.....	25
2.4.	Simulação Híbrida.....	29
2.5.	Simulação Baseada em Agentes	34
2.6.	Logística.....	36
2.7.	Considerações Revisão Bibliográfica.....	39
3.	METODOLOGIA	40
3.1.	Simulação com eventos calculados pelo comportamento físico	41
3.2.	Simulação com taxa discreta	50
4.	MODELO DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS	55
4.1.	DESENVOLVIMENTO do MODELO simulado	55
4.2.	Modelo Discreto	57
4.3.	Modelo Híbrido.....	64
4.4.	Comparação do Modelo Discreto com o Modelo Híbrido.....	70
4.4.1.	Comparação entre Modelo Discreto e Modelo Híbrido em uma situação de demanda balanceada.....	71
4.4.2.	Comparação entre Modelo Discreto e Modelo Híbrido em uma situação de baixa demanda.....	74
4.4.3.	Comparação entre Modelo Discreto e Modelo Híbrido alterando o perfil de peças transportadas com demanda infinita	75
4.4.4.	Comparação entre Modelo Discreto e Modelo Híbrido alterando o perfil de peças transportadas com demanda balanceada.....	76

4.4.5.	Análise do Modelo Discreto e Híbrido correlacionando a ociosidade com o total de peças transportadas	82
4.4.6.	Comparação entre Modelo Discreto e Modelo Híbrido em um layout compactado	84
4.4.7.	Sumário dos cenários simulados	89
5.	CONCLUSÃO	90
5.1.	Trabalhos Futuros.....	92
6.	REFERÊNCIAS.....	93

1. INTRODUÇÃO

Diante do aumento da competição entre as empresas nos últimos anos devido ao fenômeno da globalização, aumenta-se também a necessidade da redução de custos nas mais diversas áreas de manufatura e logística ao redor do mundo, de tal forma a tornar necessário o desenvolvimento de técnicas e ferramentas cada vez mais eficientes e precisas para o planejamento e execução das atividades, reduzindo o risco de falhas nestas etapas da cadeia de produção. Embora novas ferramentas são desenvolvidas constantemente por especialistas em suas respectivas áreas, uma prática comum é a junção de diferentes conhecimentos já presentes e comprovados na prática para formação de técnicas, produtos ou ferramentas híbridas que, através da seleção das melhores características de cada um, atendam a necessidade de uma classe específica de usuários. Por exemplo, a junção de ferramentas de melhoria contínua como Lean Manufacturing (Manufatura Enxuta) e o Seis Sigma geraram o Lean Six Sigma. Outros exemplos são os veículos flex que funcionam com diversos tipos de combustíveis, os celulares “smartphones” que incorporaram funções do computador, as lojas de conveniência que agregaram a função de mercado/lanchonete aos postos de combustível.

A cadeia logística de um produto desde matéria-prima até o consumidor final é um exemplo interessante de combinação de elementos discretos (as unidades do produto) e elementos contínuos (a movimentação do produto). Esta movimentação é normalmente modelada de forma simplificada cuja única variável é uma velocidade média constante, usada para calcular o tempo de transporte em função da distância. Em muitos casos, o tempo desta movimentação é desprezado no projeto da fábrica, principalmente em situações que os deslocamentos são internos à planta fabril.

No entanto, os veículos que realizam o transporte dos produtos têm inércia e estão sujeitos ao ambiente e suas variações. Por exemplo, uma empilhadeira leva mais tempo para movimentar uma carga pesada do que realizar este mesmo serviço sem carga. Ou ainda, um navio petroleiro tem maior dificuldade de atravessar um trecho durante uma tempestade, e um drone levará um tempo maior para realizar uma entrega se o vento estiver desfavorável.

Deste modo, a maneira ótima de simular estes eventos é inserir estas variáveis em um modelo físico do veículo e integrá-lo ao ambiente da simulação discreta, pois neste caso podemos aproveitar as melhores características de cada

modelagem. Esta solução híbrida consiste na utilização da Simulação de Eventos Discretos em conjunto com a Simulação de Eventos Contínuos (SED). Dentro da classe de eventos contínuos, os Sistemas Dinâmicos (DS – Dynamic Systems) são normalmente utilizados para simular o comportamento isolado de equipamentos considerando variáveis relacionadas ao seu comportamento físico, e assim assegurando maior precisão para estudo da máquina ou do equipamento abordado. Desta forma, um modelo híbrido criado através da integração SED e DS tem por objetivo aumentar o nível de detalhamento em sistemas com esta necessidade, aumentando conseqüentemente o intervalo de confiança e a assertividade nas análises quando comparadas com os modelos simulados em uma das duas metodologias isoladas.

Visto que a inserção de equações físicas exige um esforço e conhecimento de áreas que normalmente não fazem parte das especialidades atualmente contidas em um projeto de simulação, e ainda possuem um nível de complexidade considerável, é válida a hipótese de que a aplicação das mesmas em determinadas situações não seja viável do ponto de vista econômico em um projeto de simulação. O presente trabalho tem por objetivo principal identificar através de um modelo simplificado, que representa um sistema de transporte, quais variáveis dentre as analisadas possuem maior impacto no número de itens transportados por uma empilhadeira híbrida em comparação com uma empilhadeira discreta criada pelo método convencional de eventos discretos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SIMULAÇÃO

Embora a palavra simulação seja bastante popular não apenas no meio acadêmico e profissional, mas também na própria cultura humana, a mesma contém uma vasta gama de aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento.

De acordo com Zeigler et al. (1976), a simulação teve sua origem na utilização de equações complexas com o objetivo de prever um resultado a partir das alterações das variáveis que compunham essas equações. Alguns formalismos são comumente utilizados para a especificação dos sistemas dos quais basicamente se distinguem entre a estrutura interna (constituição interior do sistema) e o comportamento (manifestação exterior) do sistema, sendo os principais:

- DESS (Differential Equation System Specifications – Especificação do Sistema de Equações Diferenciais) - o tradicional sistema de equações diferenciais, do qual possui um comportamento de estados contínuos e um sistema temporal também contínuo;
- DTSS (Discrete Time System Specifications – Especificação do Sistema em Tempo Discreto) - os sistemas que operam com uma base discreta de tempo em um modelo automático;
- DEVS (Discrete Events System Specifications – Especificação do Sistema de Eventos Discretos) - da qual já foi uma grande dependente das várias linguagens de programação ou de expressões e algoritmos, mas que agora desfruta de maior aceitação devido à possibilidade de representar diversos sistemas de forma relativamente simples através da abstração de parte dos modelos, representando apenas as partes interessadas.

Schriber (1989) apresentou o conceito de GPSS (General Purpose Simulaton System – Sistema de Simulação de Aplicação Geral) de forma resumida, descrevendo diversos programas de computador voltados para a simulação e citando algumas vantagens e desvantagens juntamente com os respectivos sistemas e linguagens necessárias para utilização dos mesmos. Além disso, o autor dedica parte do artigo para descrever alguns mitos que pairam sobre o assunto “simulação” como,

por exemplo, que a simulação é algo trivial de ser aprendido, o que ignora o fato que para se obter um conhecimento aprofundado do assunto é preciso um longo estudo, que nem sempre é de fácil compreensão, mas necessário para se analisar os resultados da simulação. Por fim, o exemplo de um modelo simples de filas é apresentado de forma detalhada, explicando as diferentes terminologias e lógica de funcionamento para então concluir com os benefícios da simulação.

Beek (1997) cita que o uso da simulação para o desenvolvimento e teste de sistemas possui uma vantagem significativa em relação a utilização de máquinas reais por uma série de motivos, com por exemplo, a utilização de máquinas pode ser perigosa por causa da alta possibilidade de acontecerem erros; muitas vezes o sistema já se encontra em operação, o que seria custoso além de parar a produção para o teste do novo sistema; em alguns casos, as máquinas ainda não existem.

Segundo BANKS (1998), a simulação é a imitação de um processo ou sistema do mundo real. A simulação consiste na criação de uma história artificial, permitindo a geração e observação dos cenários artificiais para obtenção de respostas que representem as características do sistema real simulado.

Ungureanu et al. (2005) descreve uma das etapas principais do projeto da simulação como sendo a coleta e análise dos dados de entrada do modelo simulado, comentando a importância dos mesmos e citando os meios de análise através das principais distribuições estatísticas utilizadas. É citado também ao longo do artigo os diferentes testes de correlação dos dados e os problemas de uma simulação feita com dados estatísticos incoerentes com o sistema simulado.

Devido ao grande universo de aplicação da simulação, frequentemente as pessoas acabam obtendo uma visão distorcida das possíveis utilizações deste método, sendo assim, Chwif e Medina (2007) utilizaram uma explicação interessante sobre o que a simulação não faz, deixando claro alguns destes conceitos distorcidos encontrados na indústria. São eles:

- Bola de Cristal (não prevê o futuro);
- Modelo Matemático (expressão analítica fechada);
- Ferramenta de Otimização (ferramenta descritiva);
- Substituição de um pensamento inteligente (na tomada de uma decisão);

- Técnica de último recurso (quando outras técnicas falham);
- Uma panaceia (é aplicada apenas a problemas específicos).

Em linha com a crescente utilização da simulação para auxiliar a tomada de decisões importantes, Sargent (2009) faz uma análise voltada para as diferentes abordagens utilizadas para a verificação e validação de modelos de simulação, já que uma questão recorrente é o quão “correto” está o modelo utilizado para tomada de decisões. Devido a particularidade de cada sistema simulado, não existe uma técnica ou algoritmo que comprove a melhor abordagem, sendo assim utilizado normalmente técnicas isoladas ou combinações entre abordagens práticas de análise/verificação do modelo simulado.

Montevecchi et. al. (2010) apresentou uma técnica de modelagem conceitual, denominada IDEF-SIM (Integrated Definition Methods – Simulation), voltada para uma abordagem de “mapear” o processo a ser simulado com uma visão que permita ao modelador identificar os pontos de decisão e questionamentos semelhantes aos ocorridos na etapa de criação de um modelo de simulação. Deste modo, a técnica aumenta a utilidade da modelagem conceitual, facilita a programação do modelo por parte do especialista em simulação e principalmente as etapas de verificação e validação face-a-face com o especialista no processo simulado (do qual normalmente não possui muita experiência em simulação).

Observa-se através da Figura 2.1 que um projeto de simulação completo é composto por três grandes etapas, da qual uma delas é totalmente voltada para a modelagem conceitual, que não apenas completa a fase de concepção, mas também possui outras funções ligadas a coleta de dados, pontos de decisão, cenários futuros, dentre outros benefícios.

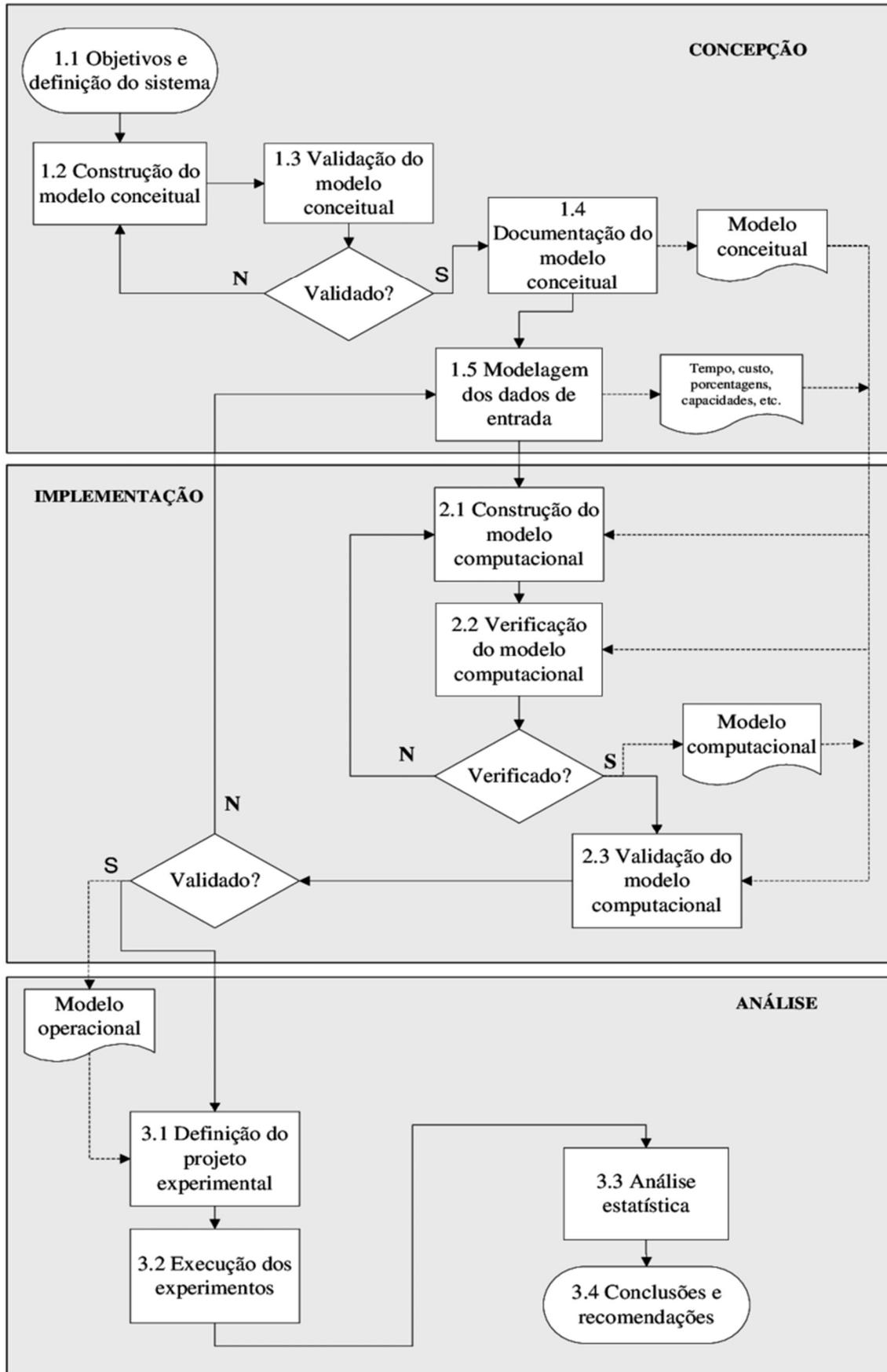


Figura 2.1 - Sequência de etapas de um projeto de simulação. Fonte: Montevechi et al. (2010)

Fisher e Ittner (2018) aplicaram a simulação para estudar o impacto da variedade de produtos em uma linha de montagem de carros. O estudo abrangeu análises relacionadas às perdas de produção provenientes da alta variedade, ao desempenho dos equipamentos da linha, às alternâncias e combinações dos turnos de trabalho das equipes, considerando horas extras, perdas de produtividade, etc. A simulação neste caso, mostrou que um bom sequenciamento de produção, mesmo com alta variedade de produtos, pode reduzir significativamente os níveis dos estoques intermediários (buffers), identificando que aleatoriedade é mais impactante do que a variedade propriamente dita.

2.2. SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

A simulação baseada em eventos discretos é largamente usada na análise de sistemas produtivos e logísticos, sintetizando o comportamento dos seus elementos por eventos governados pela lógica descrita pelo sistema analisado. Gordon (1961) descreveu um programa de simulação computacional em estrutura de blocos que permite estudar o impacto que cada bloco possui em um sistema ou fluxo bem como o compartilhamento de recursos, permitindo assim a análise de diversos dados de saída através da limitação das capacidades e velocidades dos recursos envolvidos. Gordon (1961) continuou o desenvolvimento da ideia adicionando conceitos de inclusão de variabilidade estatística entre tempos de chegada ou tempos de execução das atividades, o que delinearía os blocos básicos da simulação discreta.

Conforme citado por Cao (1995), sistemas de eventos discretos são sistemas dinâmicos que possuem seus estados alterados apenas em instantes discretos de tempo quando algum evento ocorre. Exemplos de eventos discretos se encontram em diversas áreas, tais como empresas de manufatura, redes de computadores e comunicação, sistemas de tráfego aéreo ou terrestre, multinacionais financeiras, dentre diversos outros.

Law e Kelton (2000) citaram que uma SED (simulação de eventos discretos) também pode ser feita de forma manual, já que como os eventos em um sistema acontecem em pontos discretos de tempo, uma vez ocorrido, o evento pode alterar totalmente o comportamento do sistema, porém, em um ambiente de

complexidade média para alta, estes cálculos se tornam inviáveis de serem calculados “à mão”, já que o número de eventos se torna muito alto.

Robinson (2005) fez uma análise geral sobre o desenvolvimento da SED (simulação de eventos discretos) desde suas abordagens iniciais em 1950 e seu desenvolvimento junto ao avanço da tecnologia computacional, chegando às aplicações em áreas como otimização, realidade virtual e integração com outros programas computacionais nos variados setores produtivos. Além disso, faz também uma série de comentários sobre as possibilidades futuras do avanço e contribuição da SED para a sociedade.

Iannoni e Morabito (2006) aplicaram a simulação de eventos discretos em um estudo logístico de abastecimento de uma usina de cana, onde tinham como objetivo minimizar a interrupção do fornecimento de matéria-prima para a fábrica, pois este efeito é de grande preocupação para a empresa devido à paralização das operações da indústria. Os autores estudaram a estratégia utilizada pela empresa em sua frota de caminhões, investigando alguns pontos-chaves como tempo de fila dos caminhões da frota, tempo de descarga de moinho, tempo de deslocamento de cada perfil de caminhão mapeado, dentre outros foram utilizados para validar a modelagem. A partir daí diferentes estratégias foram simuladas para identificação daquela que melhor atenderia a indústria, chegando a conclusão de que a adição de um estoque intermediário juntamente com a correta alocação da frota de caminhões garantiria o abastecimento do moinho, mantendo assim a operação industrial uniforme.

Conforme citado por Schappo (2006), os métodos comumente utilizados em ambientes industriais têm se mostrado parcialmente insuficientes para o estudo das complexas operações devido aos altos níveis de interação entre os processos e sistemas utilizados nas empresas. Além disso, a constante busca pela satisfação do cliente através do aumento da variedade de produtos fabricados por uma única companhia, redução extrema da ocorrência de erros de processos, aumento de trocas de ferramentas (setups) dos equipamentos devido a produção de lotes cada vez menores, dentre diversos outros métodos utilizados, aumenta significativamente o dinamismo e a necessidade de respostas quase imediatas a cenários planejados em um curto período de tempo, pois apenas dessa forma uma empresa sobrevive. Com

base neste cenário a simulação computacional vem crescendo de forma significativa exatamente por atender a essa necessidade.

Lourenço Junior (2012) aplicou em um sistema de produção contínuo de alto volume de condutores elétricos os princípios de Produção Enxuta, tais como Kanban, WIP, VSP, Produção Empurrada vs Produção Puxada, etc, e através do uso da simulação de eventos discretos (SED), pode-se então prever os impactos das implementações dos princípios citados acima em um processo produtivo já existente, antes de aplicá-los efetivamente.

Pissinelli et al. (2015) utilizou a SED para estudo do comportamento do fluxo de veículos em uma rodovia próxima a metrópoles, identificando gargalos e analisando o escoamento de veículos mediante variação dos dados de entrada em um modelo de simulação que considera os pontos de entrada, saída e tráfego contínuo na rodovia ao longo de um dia.

Barbosa e Santos (2015) citaram que o correto planejamento e criação de um projeto de simulação tem apresentado ganhos assertivos em sistemas de produção de motores de veículos em um ambiente virtual com o escopo e, após a validação, projeto e construção, com o real. Porém, alertaram também que existe um grande desafio ao simular equipamentos complexos que são utilizados para a produção de peças como o bloco e o cabeçote do motor de um veículo, tais como centros de usinagem CNC, lavadoras de alta pressão, testes de estanqueidade e células de montagem. Estes equipamentos possuem variáveis como MTBF, MTTR, atividades de preparação, limpeza, preparação da peça, troca complexas de ferramenta, o que faz com que os equipamentos sofram interações entre si, criando uma cadeia de dependências que somados aos padrões estocásticos, podem gerar resultados distantes da realidade.

Soofastaei (2016) apresentou o impacto do acúmulo de veículos carregados em diversas minas do estado do Arizona-EUA em fatores como perda de produtividade, consumo de combustível, emissão de gases, etc. Dado que caminhões carregados de forma excessiva possuem menores velocidades e maior consumo de combustíveis que os caminhões com menos carga, o autor fez um estudo através da aplicação da simulação discreta sobre a variação dos fatores que mais interferem no

acúmulo de veículos em pontos importantes do processo, visando identificar a melhor estratégia de operação para melhorar a eficiência da mina e reduzir o consumo de combustível proveniente do acúmulo de veículos em áreas específicas.

2.3. SIMULAÇÃO CONTÍNUA

Diferente da simulação de eventos discretos, a simulação contínua possui um comportamento alterado de forma contínua ao longo do tempo, pois o estado do sistema muda constantemente sem a necessidade de um evento específico. Thomas (1999) utilizou a simulação dinâmica para abordar um processo clássico de diferenças de pressão e vazão em um recipiente conforme a Figura 2.2, nesta situação, o autor apresentou um sistema de equações diferenciais que tem por objetivo representar a variação da pressão e vazão dos fluxos de saída e entrada do recipiente. Para a coleta de indicadores do comportamento do sistema representado, o autor utiliza vetores que demonstram os estados em intervalos de tempos específicos através de premissas de entradas nas equações diferenciais, como por exemplo, o momento “x” de tempo em que tais válvulas atingem o percentual pré-determinado de abertura.

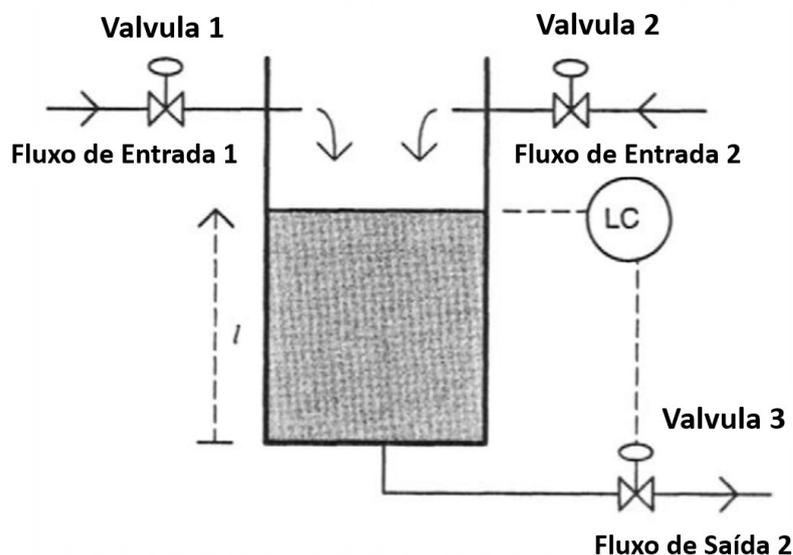


Figura 2.2 - Nível de líquido do Tanque - Thomas P. (1999) - Livro Simulation of Industrial Processes for Control Engineers

Borshchev e Filippov (2004) apresentaram um conceito interessante e que gera eventuais dúvidas dentro da simulação contínua que é a diferenciação entre Sistemas Dinâmicos (DS – Dynamic Systems) e Dinâmica de Sistemas (SD - System

Dynamics), pois embora ambos métodos de modelagem estejam dentro do campo “simulação contínua”, cada um é aplicado em uma situação específica.

Desenvolvido pelo engenheiro elétrico Jay W. Forrester em 1950, segundo Forrester (1968): “a dinâmica de sistemas é o estudo das características da realimentação das informações das atividades industriais para mostrar como a estrutura organizacional, amplitude (em políticas) e atrasos de tempo (em decisões e ações) interagem para influenciar o sucesso do empreendimento”. A abrangência de aplicação de sistemas SD, incluem campos sociais, ecológicos, comportamento de estoques (custos com material, pessoas, demandas, etc), dentre outros campos que normalmente possuem um ciclo de informações, políticas, ou materiais que interagem entre si, mudando o comportamento dos componentes do sistema de forma a considerar diversos fatores. Matematicamente, o SD é um conjunto de equações diferenciais, que devido a propriedade de agregação de variáveis, o sistema se torna incapaz de distinguir, por exemplos, características individuais das entidades tratadas, fazendo assim com que a SD seja aplicada de forma global.

Os Sistemas Dinâmicos (DS – Dynamic Systems) são tratados como um ancestral da Dinâmica de Sistemas (SD), este método de modelagem é frequentemente tratado em disciplinas de mecânica, elétrica e química, pois normalmente é abordado de forma conjunta com ferramentas de modelagem, que representam a relação física entre diferentes componentes de um conjunto, e devido a essa interface com modelos físicos realistas, possui uma relação muito próxima as variáveis físicas, tais como: velocidades, torque, força gravitacional, pressão, tensão, posição, etc.

Shouping et al. (2005) utilizou a simulação de dinâmica de sistemas com o objetivo de modelar o setor logístico, com foco especial no mercado chinês, observando variações de fatores econômicos, taxa de aumento de demanda, custos gerais, investimentos em logística, investimentos gerais, diferentes perfis de atraso, dentre diversos outros fatores, e assim observar o período de crescimento da China ao longo dos anos juntamente com o comportamento, por exemplo, dos custos atrelados a logística como um todo desde décadas atrás até o momento atual.

Fatma (2015) analisou a questão da manutenção da sustentabilidade junto ao crescimento da demanda de atum no mundo, considerando não apenas a pesca,

mas também variáveis de investimentos, políticas, lucratividade, dentre outros fatores ao longo de 25 anos em um modelo de dinâmica de sistemas (SD) para avaliar o cenário futuro de diferentes pontos de vista.

Devido à complexidade de manuseio de materiais na indústria química, Li et al. (2016) apresentou uma forma de mitigar o risco da cadeia de fornecimento deste setor através do uso de uma modelagem contínua utilizando dinâmica de sistemas (SD) de forma a considerar os principais fatores de risco no transporte e abastecimento de produtos químicos, causando assim possíveis atrasos ou avarias no processo de abastecimento como um todo.

Drews et al. (2016) apresenta a metodologia Lean (Manufatura Enxuta), presente em muitas empresas no mundo, vista através da SD, e assim correlacionando os princípios da Manufatura Enxuta do ponto de vista de um tomador de decisões, permitindo uma compreensão dos componentes básicos de um sistema com um todo, e o entendimento da relação entre estes componentes, tais como fatores humanos, estratégias de tomadas de decisões, fluxo e comportamento de estoques, entre outros.

Eckert (2017) estudou um objeto típico na vida de milhões de pessoas, os veículos automotores, os quais dependem de combustíveis. Conforme ele mostra na Figura 2.3, pode-se observar o consumo de combustível diante do regime de operação do MCI (Motor de Combustão Interna) de acordo com o segmento do ciclo NBR6601. Nota-se que embora existam diferentes divisões de um mesmo ciclo de operação (Marcha Lenta, Aceleração, Trocas de Marcha e Frenagem), diversos patamares de consumo de combustível e velocidades são atingidas e alteradas quase que de forma instantânea na maior parte do tempo. Este mesmo comportamento é estendido para a maioria das variáveis deste veículo como, por exemplo, força e o torque em todos os componentes do veículo.

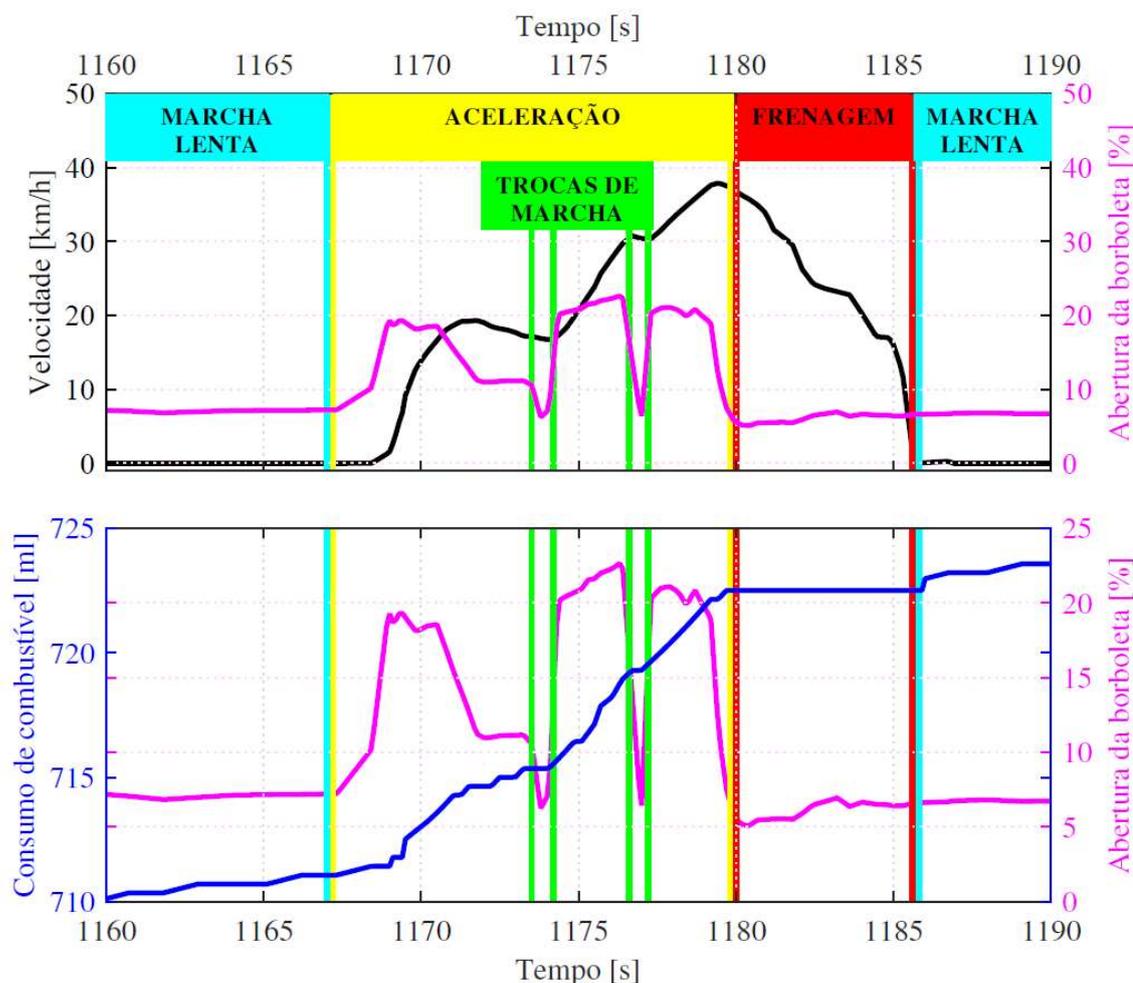


Figura 2.3 - Consumo de combustível do veículo em função da condição de operação do MCI (Eckert, 2017).

Storlen e Nielsen (2018) fizeram uso da simulação contínua para testar diferentes modelos de simulação de uma turbina Francis, incluindo variáveis como torque, calor, ângulo das pás da turbina, dentre outras, identificando a importância de cada uma na simulação. Embora nenhum dos modelos testados apresentaram uma aderência completa com os resultados reais devido a algumas perdas derivadas de fatores geométricos e do fluxo de entrada do fluido, o artigo demonstra que o trabalho futuro se refere à inclusão destas perdas de eficiência na transformação de energia, deixando assim o modelo mais próximo ao sistema real.

Lee (2018) utilizou a dinâmica de sistemas de forma relaxada para representação de equações diferenciais ordinárias (ODE) aplicadas a situações gaussianas de tal forma que a mesma teria maior similaridade com eventos físicos,

tais como a lei de resfriamento de Newton, o atrator de Lorenz descrevendo o comportamento de convecção da atmosfera terrestre e o modelo de Fitz Hugh – Nagumo (modelo de equações diferenciais) aplicado em problemas de impulsos elétricos.

2.4. SIMULAÇÃO HÍBRIDA

De acordo com Zeigler et al. (1976), para o entendimento da combinação destas duas abordagens é fundamental a compreensão sobre como os eventos discretos são impactados pelos eventos contínuos, os quais fazem assim com que os eventos ocorram. Conforme citado, na maioria das vezes em sistemas reais um mesmo ambiente possui os dois modelos de sistemas (discretos e contínuos) e ainda sim, cada sistema possui as suas próprias entradas discretas (X^{disc}) e entradas contínuas (X^{cont}) onde, de acordo com a Figura 2.4, a entrada discreta pode sofrer interferências diretas da entrada contínua. Ambos sistemas também possuem suas próprias saídas (Y^{disc} e Y^{cont}) e, para definição dos mesmos, os sistemas podem interagir entre si trocando informações para representar o sistema simulado.

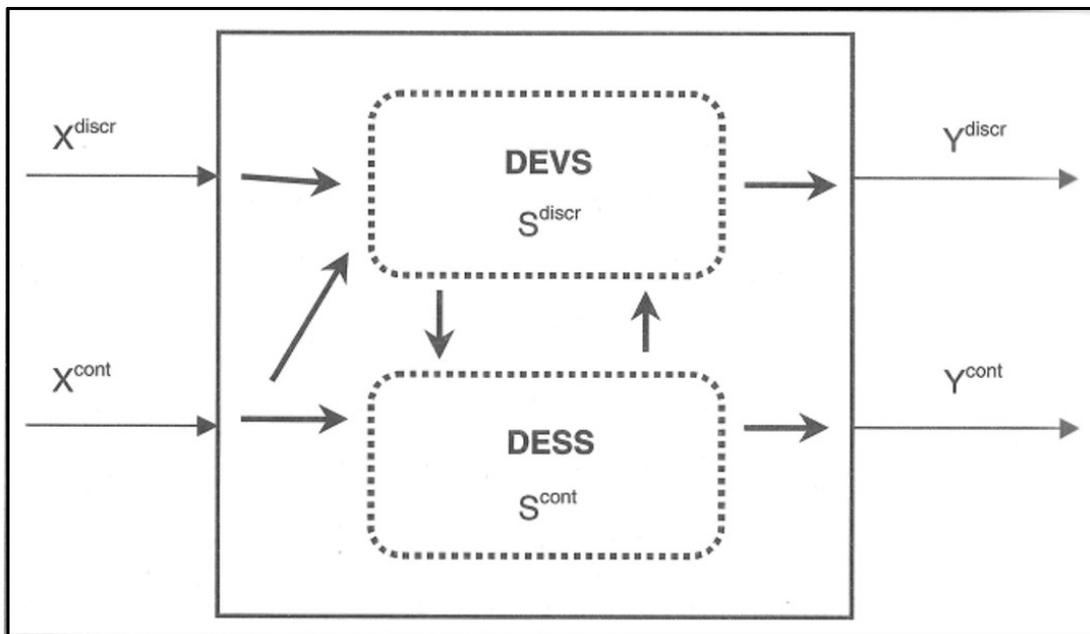


Figura 2.4 - Interação conceitual entre Simulação Discreta e Contínua. Zeigler et al. (1976)

Coyle (1985) apresentou uma metodologia de simulação híbrida de SED (simulação de eventos discretos) e SD (dinâmica de sistemas) aplicada em uma mina de carvão através da junção de processos de produção da mina combinados com as

políticas de controle das frentes de lavra, o que gerou as iterações presentes em simulações de sistemas dinâmicos.

Reilly (1995) apresentou uma das primeiras linguagens utilizadas que permitiu a simulação conjunta de diferentes abordagens, o SLAM (Simultaneous Localization And Mapping – Localização e Mapeamento Simultâneos), onde o autor explica de forma detalhada a estruturação de um modelo passando pelas entidades, recursos, atividades, estados, conexões, até chegar à elaboração de cenários e obtenção de resultados.

Hatch e Schultz (1996) apresentaram em seu trabalho alguns paradigmas frequentemente encontrados em diversas pesquisas com o objetivo de juntar metodologias através de modelos híbridos ou complementares, apresentando assim estes métodos juntamente com seus limites de aplicações em três principais grupos: o sequencial, o paralelismo e o interativo.

Helal e Rabelo (2004) aplicaram a SED e SD de forma conjunta para simulação de uma ferramenta de gerenciamento conhecida como BSC (Balanced ScoreCard) desenvolvida por Kaplan e Norton, voltada para a gestão de uma equipe ou uma empresa observando diferentes aspectos gerenciais (financeiro, cliente, processos internos, aprendizado e crescimento), analisando assim a interação entre estes aspectos e o comportamento da técnica como um todo em função do objetivo definido pela empresa.

Giambiasi e Carmona (2005) apresentaram uma abordagem voltada para a integração entre os formalismos de SED e DS, onde aumentaram a precisão de um modelo discreto generalizado através da inclusão de sistemas dinâmicos representando a trajetória polinomial de uma partícula em um cenário discreto, prevendo assim a posição da mesma em momentos definidos, ou então definindo os próximos eventos da simulação através da equação do sistema dinâmico, conforme demonstrado na Figura 2.5.

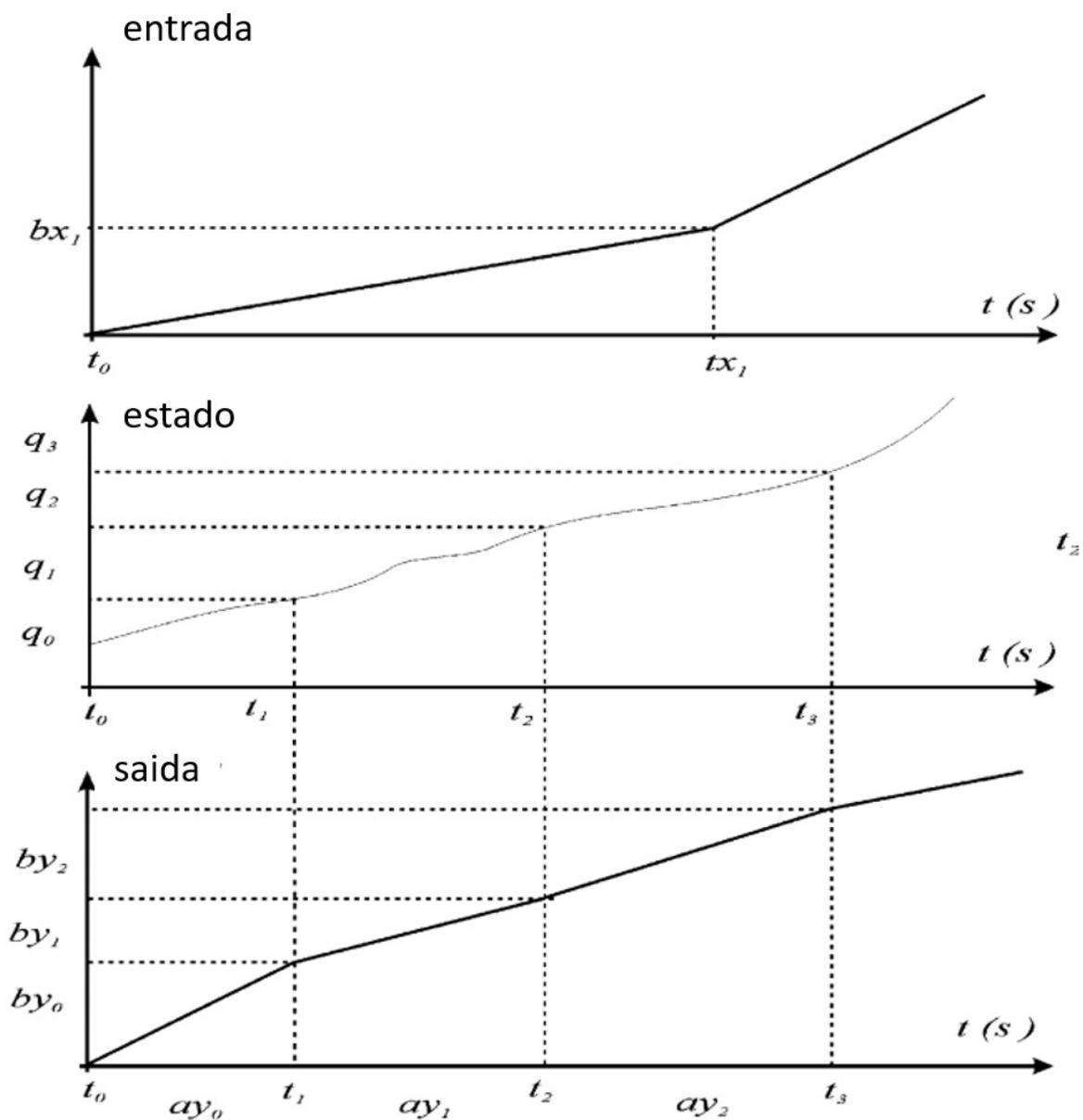


Figura 2.5 - Trajetória linear de um Sistema Dinâmico (DS) em momentos discretos. Fonte: Giambiasi e Carmona (2006).

Hartwig (2011) descreveu o uso da SD em definições de priorização, cronogramas e balanceamento de uma linha de montagem sem o auxílio da SED, mostrando através de diversos testes e análises em ambas metodologias que com o uso de boas práticas e utilização correta da SD, que a mesclagem entre ambas metodologias se torna desnecessária.

Tako e Robinson (2012) fizeram uma comparação da utilização da SED e SD em diferentes ambientes, citando as principais vantagens e desvantagens das

abordagens individuais, além de apresentar também situações onde ambas são normalmente aplicadas de forma conjunta em diferentes níveis de projetos logísticos que necessitam deste perfil de abordagem. Os autores fazem uma classificação onde se encontram em uma extremidade os projetos voltados para o lado Estratégico e na outra extremidade projetos com focos mais Operacionais ou Táticos, sendo respectivamente as abordagens da dinâmica de sistemas (SD) e simulação de eventos discretos (SED).

Abduaziz et al. (2014) utilizou a simulação híbrida para análise de boas práticas logísticas em uma indústria automotiva com o objetivo de melhorar a emissão de Dióxido de Carbono (CO₂), reuso e reciclagem de materiais, eliminação de resíduos e utilização de energia, porém, conforme visto através da Figura 2.6 a simulação dinâmica é realizada de forma separada da simulação discreta, porém elas se auto alimentam, ou seja, as saídas das duas simulações são usadas como entrada para ambas.

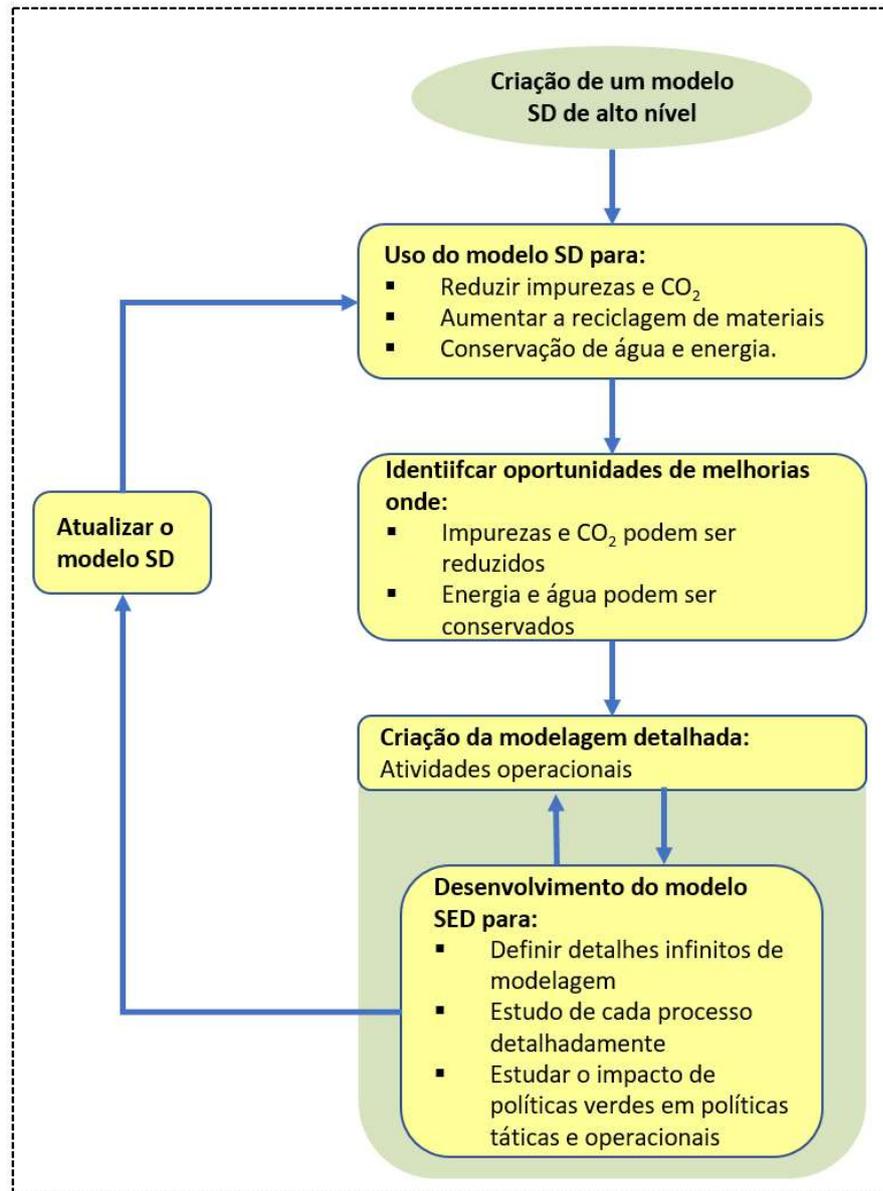


Figura 2.6 - Abordagem de Abduaziz et al. (2014) para aplicação da simulação híbrido

Morgan et al. (2017) apresentou uma revisão da literatura sobre as aplicações e formas de utilização da SED em conjunto com a SD, visando o desenvolvimento de uma metodologia de identificação para utilização da simulação híbrida em diferentes situações, visto que a mesma se adequa de forma individual para cada aplicação e objetivo.

Já Laurindo et al. (2018) utilizou a simulação híbrida de forma a integrar um programa de Simulação de Eventos Discretos (SED) e um programa de simulação dinâmica de sistemas mecânicos, permitindo uma interface complexa também com um CLP (controlador lógico programável) para controle de um sistema em tempo real.

O sistema utilizado para demonstração do funcionamento da integração foi uma linha de produção de latas, composta por diversos equipamentos e, desta forma, os modelos dos equipamentos foram construídos através da SD e o sistema como um todo através da SED, permitindo assim a interação entre as simulações. Como conclusão o autor ressalta o aumento no detalhamento de equipamentos que normalmente são simplificados em um modelo de SED convencional. Conseqüentemente o modelo híbrido proporciona ao modelador ou analista maior precisão e riqueza nas análises feitas.

2.5. SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES

Segundo Coelho (2007), a Simulação Baseada em Agentes (SBA) se baseia na criação de um modelo de simulação com entidades autônomas, das quais podem ser, por exemplo, pessoas, animais, organizações, sociedades, veículos, dentre outros objetos ou recursos que possuem atributos próprios, tais como exigências individuais, tempo de vida, capacidade de deslocamento ou armazenamento, dentre outros possíveis.

De acordo com Lima et al. (2009), a SBA é uma técnica de modelagem eficaz principalmente em casos onde o sistema modelado é complexo e composto por unidades autônomas que interagem entre si com a possibilidade de aprendizagem e adaptação, podendo o espaço no qual estes se encontram ser crucial e o posicionamento dos agentes não ser fixo.

Barros et al. (2011) cita que um dos principais fatores pelo qual a Simulação Baseada em Agentes vem ganhando espaço é devido a Simulação de Eventos Discretos não ser a ferramenta ideal para simular fenômenos obscuros ou pouco compreendidos, dos quais são mais bem representados pela SBA.

Szimanski (2013) aplica a simulação baseada em agentes em conjunto com outras técnicas de mineração com o objetivo de preencher uma lacuna existente em análises com altos níveis de abstração feitas atualmente, gerando assim “logs” no modelo simulado e posteriormente comparando com os “logs” do sistema real.

Becker et al. (2016) aplica a simulação baseada em agentes combinada com redes neurais com o objetivo de melhorar a produtividade logística de um ambiente portuário através da otimização de rotas de trabalho dos veículos (considerados os agentes da simulação). Através da simulação e comparação com outras 5 heurísticas utilizadas para otimização de rotas presentes na literatura, o sistema apresentado apresentou ainda sim um resultado significativamente melhor já na prática.

Meng et al. (2017) aborda uma cadeia de suprimentos de 3 níveis (manufatura, distribuidor e varejista) utilizando a simulação baseada em agentes objetivando identificar diferentes combinações de contratos entre as partes, de tal forma que o melhor cenário seja identificado. Tais contratos são variados e testados através da simulação alterando fatores como um contrato de recompra de produtos sazonais caso as vendas não sejam efetivadas, ou então um compartilhamento da receita total obtida, dentre outros fatores. De tal forma, cada nível citado é considerado um agente que possui o comportamento determinado e variado de acordo com os parâmetros alterados na simulação.

Démare et al. (2017) utiliza a simulação baseada em agentes em conjunto com gráficos dinâmicos para representar um sistema logístico de importação e distribuição de produtos em diferentes áreas urbanas, tratando os agentes como todos os responsáveis pela movimentação dos produtos entre as diferentes áreas com infraestrutura e características individuais, desde os portos até as fábricas e lojas, podendo as decisões de cada agente ou interface entre eles tomar decisões autônomas, beneficiando ou prejudicando o sistema dependendo do comportamento adotado, como por exemplo um sistema centralizado ou descentralizado.

2.6. LOGÍSTICA

Uma cadeia de suprimentos é, de forma geral, uma rede de fornecedores que trabalham juntos para a entrega de um produto final, transportando, armazenando, fornecendo e recebendo materiais brutos, produtos intermediários e produtos acabados de tal forma que o cliente final seja atendido de forma satisfatória, conforme citado por Demirtas e Tuzkaya (2012).

Diante de tal cenário, um dos custos que vem ganhando destaque entre os diversos componentes do custo total de um centro de distribuição (CD), é o custo relativo à energia (combustível) consumida pelos recursos de transporte utilizados para movimentação das cargas. Renquist et al. (2012) fez uma comparação entre diversos modelos de células de combustível utilizadas em empilhadeiras e paleteiras com o objetivo de compará-las economicamente. Um dos principais motivadores da comparação diz respeito a uma nova tecnologia de células de combustível, conhecida como MEP (Membrana Eletrolítica de Polímero), que apresentou reduções significativas de custos e melhoria ambiental em relação as tecnologias utilizadas atualmente, indicando que a tendência das fontes energéticas utilizadas pelas empilhadeiras está fortemente ligada a PEM, assim como os próprios incentivos governamentais.

Holzapfel et. al. (2016) relatou que o comércio varejista tem sofrido mudanças radicais nos últimos trinta anos através da integração vertical de tarefas logísticas (tarefas executadas internamente ao invés da terceirização), gerando assim um aumento no número de Centros de Distribuições (CDs) de uma única rede, sendo que antigamente era mais comum as operações “diretas para as lojas”, das quais os produtos saíam das linhas de produção e seguiam direto para as lojas onde eram vendidas para o consumidor final, o que demandava um baixo número de estoques intermediários. De acordo com Demirtas e Tuzkaya (2012), a sobrevivência de corporações em um mercado global está fortemente relacionada ao fornecimento de produtos a partir de uma demanda totalmente dinâmica, com um custo baixo e no tempo requerido dentro da cadeia de suprimentos. E neste ambiente as corporações ainda necessitam aumentar a sua lucratividade e eficiência para sempre atender a alta variação de demanda de forma totalmente contínua. Com esta mesma linha de pesquisa, Holzapfel et. al. (2016) continua citando que a necessidade da criação de

CDs espalhados em pontos próximos aos grandes centros comerciais é necessária para o atendimento rápido e de qualidade ao consumidor final.

Para Shucheng Yu et al. (2016), no gerenciamento de uma cadeia de suprimentos, tomadores de decisões precisam levar em consideração uma série de fatores ao optarem por abrir ou não um Centro de Distribuição, tais como a localização, capacidade, transporte, custos de inventário, dentre outros. Desta forma, percebe-se a importância do baixo custo para a operação visto que, embora o centro faça parte da rede, o objetivo do mesmo é entregar de forma rápida e eficiente o produto final ao consumidor através de um custo mínimo, do qual permite à empresa fornecedora permanecer viva no mercado.

Al-Shaebi A. et al. (2017) faz um estudo relacionado ao impacto dos diferentes comportamentos dos motoristas de empilhadeiras na produtividade dos mesmos (em estrados transportados por hora, por exemplo) através de análises estatísticas e regressões. No experimento, os dados foram coletados em campo e analisados através de uma associação com os perfis de cada motorista. Da análise destaca-se três pontos: 1) Motoristas que executam as mesmas tarefas, possuem um comportamento diferente entre eles; 2) A produtividade dos motoristas aumenta quando as tarefas de se deslocar e elevar os garfos das empilhadeiras ocorre de forma simultânea; 3) O consumo de energia é a variável que mais sofre impacto quando a velocidade média das empilhadeiras é alterada, sendo assim um ponto relevante nesta análise. Diante das conclusões, pode-se citar as variações no consumo de combustível em função do perfil de cada motorista, no qual observa-se que um motorista agressivo, por exemplo, chega a consumir até 30% mais combustível se comparado com um motorista moderado. O motorista mais agressivo diminui o período em que a empilhadeira permanece em um estado constante e, conseqüentemente, aumenta o número de acelerações e desacelerações da mesma, e como sabe-se que quanto maior o número de acelerações, maior o consumo de combustível além de a empilhadeira produzir menos energia com a frenagem (a empilhadeira estudada utilizava os freios para “recuperar” parte da energia).

Em uma análise do funcionamento de equipamentos e recursos reais, percebe-se que os eventos contínuos e discretos trabalham de forma totalmente integrada, na Figura 2.7, Dindarloo e Siami-Irdemoosa (2016) demonstraram que a

variação do consumo de combustível em cada ciclo de trabalho medido através de dados de um ambiente real e previsto.

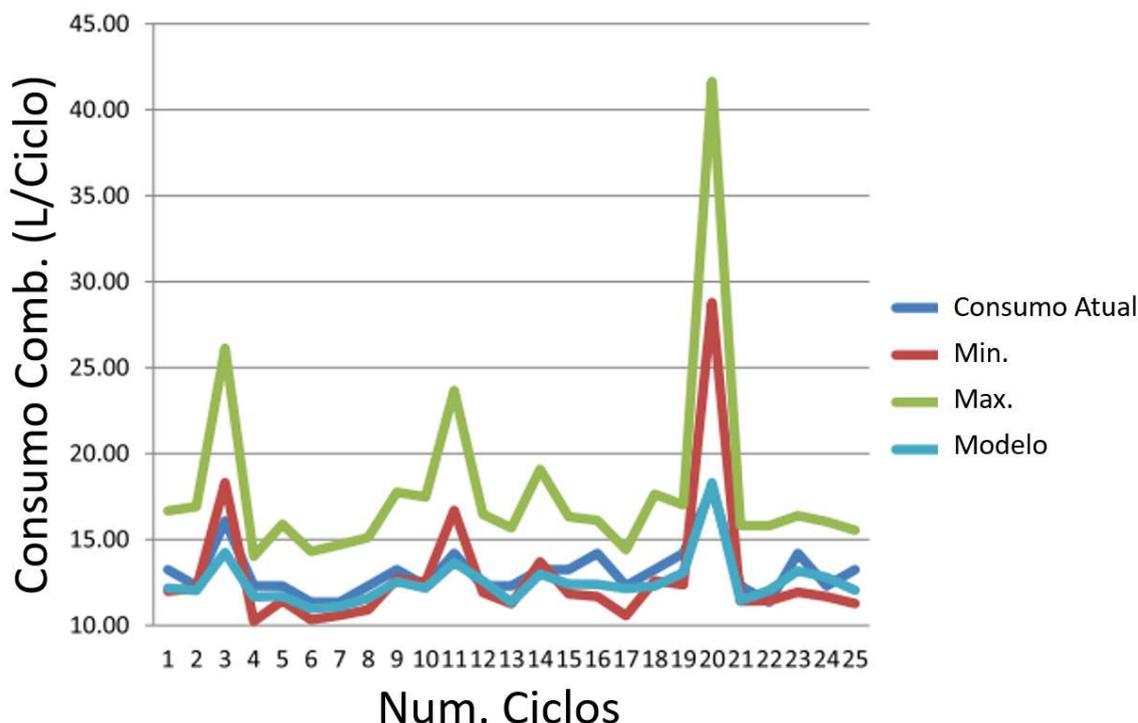


Figura 2.7: Consumo de combustível real x previsto (Diandarloo e Siami-Irdemoosa (2016)).

Conforme citado por Dubey e Veeramani (2017), devido à alta competitividade do mercado, o varejista tem se esforçado para oferecer uma alta variedade de produtos juntamente com uma disponibilidade praticamente imediata em suas lojas, tudo isso ao mesmo tempo que buscam reduzir os custos envolvidos no processo. Diante deste cenário, todo o dimensionamento de equipamentos e recursos utilizados nos Centros de Distribuições necessitam ser dimensionados para movimentar as cargas com as mais variadas características, ou seja, desde caixas de baixo volume com peso baixíssimo, quanto para cargas elevadas, como pneus, baterias, etc.

Como exemplo de tal complexidade, pode-se citar o fluxo de materiais da empresa Magazine Luiza, que possui uma variedade de aproximadamente 44 mil SKUs (Stock Keeping Unit – Unidade de Manutenção de Estoque) distribuídos em 9 centros de distribuição, o que exige um eficiente sistema de controle de estoque e uma gama de equipamentos e recursos que atendam o alto nível de serviço exigido pelo mercado.

2.7. CONSIDERAÇÕES REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dada tal revisão bibliográfica, percebe-se que existem diversas aplicações tanto da Simulação de Eventos Discretos quanto da Simulação de Eventos Contínuos em áreas bastante variadas com uma vasta gama de objetivos abordados, e o mesmo acontece com a junção de ambas metodologias, da qual abordam diferentes temas e métodos de junção de forma a extrair o melhor de cada metodologia dado a natureza do tema abordado em cada trabalho apresentado.

Porém, foi percebido pelo autor uma lacuna pouco explorada na literatura da qual retrata a inadaptabilidade dos recursos pertencentes a Simulação de Eventos Discretos em ambientes com variáveis mandatórias dinâmicas, assim como simplificações do funcionamento de recursos e equipamentos através da inclusão de curvas estatísticas ou variáveis que abstraem o funcionamento real de tal equipamento ou recurso, restringindo assim uma possível análise detalhada de seu comportamento baseado em detalhes mais complexos, tais como os componentes mecânicos ou comportamentos físicos aplicados ao objeto escolhido.

Percebe-se através do item 2.5 que a Simulação Baseada em Agentes apresenta uma alta correlação com a lacuna identificada pelo autor, porém, devido à alta popularidade a aplicação atual da Simulação de Eventos Discretos este trabalho tem como objetivo contribuir com a literatura enriquecendo a SED através da junção com a Simulação de Eventos Contínuos, visto que ambas possuem alta recomendação para processos discretos menos complexos, necessitando da incorporação dos Eventos Contínuos apenas em pontos isolados do modelo.

3. METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o modo pelo qual a simulação de eventos discretos e contínuos podem ser integradas, e assim contribuir de forma significativa para o enriquecimento da simulação em sistemas industriais através da representação mais realista de equipamentos de transporte.

O processo de carregamento é um evento discreto que caracteriza a obtenção do produto para o início do processo de deslocamento da empilhadeira. Embora o deslocamento possa ser considerado um processo discreto, pois tem início e fim bem definidos, o tempo de percurso depende de uma série de variáveis, além disso outras variáveis como o consumo de combustível são impactadas e as mesmas não se caracterizam como discretas, mas como uma curva contínua e dinâmica em função de fatores como o desempenho do motor, a estrutura mecânica da empilhadeira, o peso do objeto transportado, inclinação e tipo do piso do percurso a ser executado, dentre outras variáveis.

Segundo Triviños (1987), as etapas de uma pesquisa experimental se iniciam pela formulação do problema e das hipóteses, delimitando assim as variáveis de forma precisa e controlada que atuam no objeto estudado. Desta forma, através da metodologia de pesquisa experimental o presente trabalho tem como objetivo fazer uma abordagem conjunta do comportamento de ambos modelos de simulação, visando aumentar a capacidade analítica da simulação em ambientes que envolvem este perfil comportamental através de testes de diferentes cenários. Como exemplo, pode-se citar não apenas o consumo de combustível, mas também o consumo de energia elétrica, emissão de CO₂, consumo de energia, desgaste de componentes mecânicos que se desgastam de acordo com o perfil e ambiente de trabalho, fadiga de operadores, etc. Sendo assim, inicialmente foram testados dois métodos para inserção de eventos contínuos em um modelo discreto.

3.1. SIMULAÇÃO COM EVENTOS CALCULADOS PELO COMPORTAMENTO FÍSICO

Esta metodologia visa calcular o momento da ocorrência dos eventos relacionados ao transporte no modelo simulado através da solução analítica das equações diferenciais de movimento do veículo, o que torna desnecessária a criação de inúmeros eventos em intervalos pré-estipulados, ou seja, o número de eventos criados em um período é significativamente baixo, quando comparado com o método a ser apresentado na seção “simulação com taxa discreta”, pois a equação diferencial contempla a relação e interdependência de todas as variáveis envolvidas na equação para o cálculo do resultado final. Além disso, este método possui uma precisão superior quando comparado com o método da simulação com taxa discreta, já que elimina os erros relacionados à iteração do modelo contínuo (solução da equação diferencial).

No exemplo abaixo, o método de eventos calculados pelo comportamento físico foi aplicado para identificar o tempo de deslocamento de uma empilhadeira em um modelo simples onde os eventos futuros são calculados e definem as variáveis da empilhadeira com base nas equações descritas adiante, permitindo assim o cálculo de indicadores considerando diversas características do produto, equipamento e percurso. Os eventos são calculados apenas nos momentos em que a empilhadeira passa por um vértice ou ponto de decisão levando em consideração os seguintes fatores:

- Distância até o próximo ponto;
- Diferença do próximo ponto no eixo z;
- Capacidade de carga da empilhadeira.
- Velocidade máxima da empilhadeira;
- Tração máxima na empilhadeira;
- Massa da empilhadeira;
- Massa da carga transportada.

A partir destas variáveis, o método determina qual seria o período e esforço da empilhadeira em cada etapa do seu trajeto, sempre levando em consideração as características da empilhadeira, do piso onde a empilhadeira se encontra e também da carga transportada, conforme demonstrado na Figura 3.1.

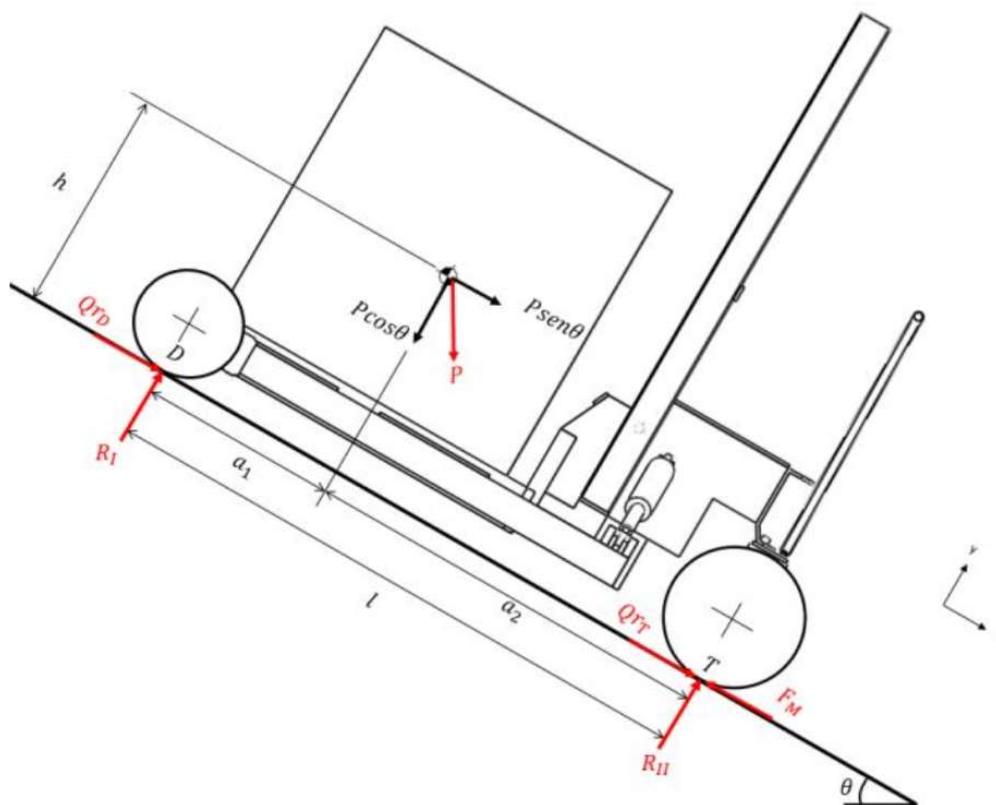


Figura 3.1: Empilhadeira subindo em aclave (Amaral, 2016)

Através das equações dinâmicas de movimento apresentadas por Gillespie (1992) é possível encontrar os momentos exatos que a empilhadeira permanece nos estados de aceleração, velocidade contínua e desaceleração, conforme demonstrado na Figura 3.2.

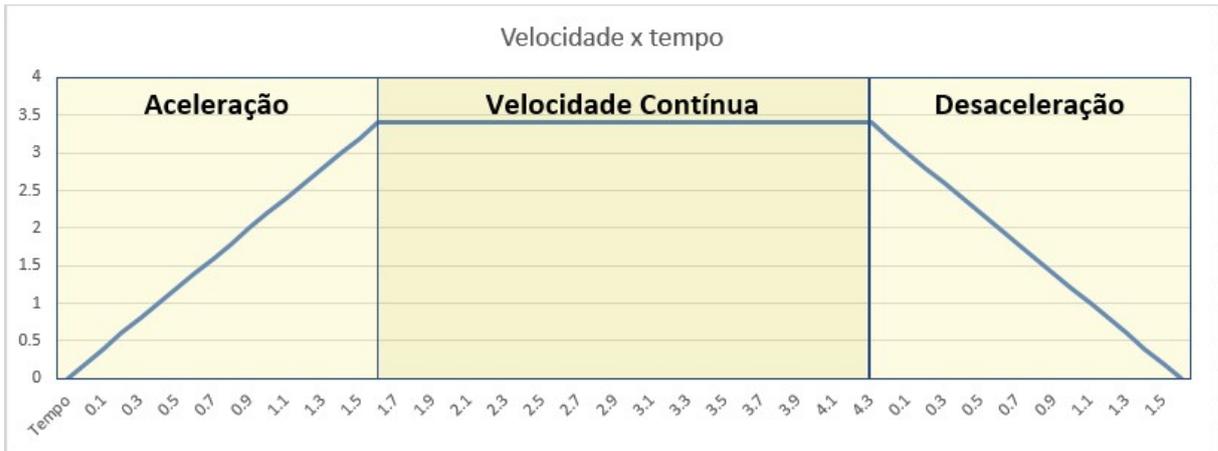


Figura 3.2: Variação da Velocidade x Tempo

As equações abaixo demonstram o desenvolvimento do cálculo para identificação das acelerações máximas de aceleração e frenagem da empilhadeira.

Cálculo para aceleração máxima é:

$$F_{acel.max} = m_{e+c}\alpha_{max} \quad (1)$$

Onde,

$F_{acel.max}$ = Força de aceleração máxima.

m_{e+c} = Massa da empilhadeira somada a massa da carga transportada.

α_{max} = Aceleração máxima atingida pela empilhadeira.

Baseando o cálculo da aceleração máxima nas características da empilhadeira, utiliza-se a equação:

$$F_{acel.max} = \frac{T_{motor}\eta_{trans}N_{trans}}{r_{pneu}} - m_{e+c}gsen\theta \quad (2)$$

Sendo,

T_{moto} = Torque do motor

η_{trans} = Eficiência de transmissão

N_{trans} = Razão de transmissão

r_{pneu} = Raio do pneu de tração da empilhadeira

g = Aceleração gravitacional

θ = Ângulo de inclinação do piso

Obtendo por fim a aceleração máxima obtida a partir das características físicas da empilhadeira:

$$\alpha_{max} = \frac{T_{motor}\eta_{trans}N_{trans}}{m_{e+c}r_{pneu}} - g\text{sen}\theta \quad (3)$$

Se $\alpha_{acel} > \alpha_{acelmax}$ então $\alpha_{acel} = \alpha_{acelmax}$

Também é necessário calcular a aceleração máxima do pneu para identificar se o mesmo suporta a aceleração da empilhadeira:

$$F_{pneu.max.acel} = \mu F_{tracao} - m_{e+c}g\text{sen}\theta \quad (4)$$

Onde,

$F_{pneu.acel.max}$ = Força de aceleração/tração máxima do pneu.

μ = Coeficiente de atrito do pneu em relação ao piso.

F_{tracao} = Força de tração exercida pela empilhadeira.

Identificado a força (Eq. 3.4), identifica-se a aceleração máxima:

$$\alpha_{acelpneu} = \frac{F_{pneu.max.acel}}{m_{e+c}} \quad (5)$$

Se $\alpha_{acel} > \alpha_{acelpneu}$ então $\alpha_{acel} = \alpha_{acelpneu}$

Da mesma forma que para encontrar a aceleração máxima, é também necessário encontrar a força máxima de frenagem:

$$F_{pneufrenmax} = \mu F_{fren} - m_{e+c} g \sin \theta \quad (6)$$

Onde,

$F_{pneufrenmax}$ = Força de frenagem máxima do pneu.

F_{fren} = Força de frenagem exercida pela empilhadeira

Desta forma,

Se $\alpha_{acelfrenmax} > \alpha_{fren}$ então $\alpha_{fren} = \alpha_{frenmax}$

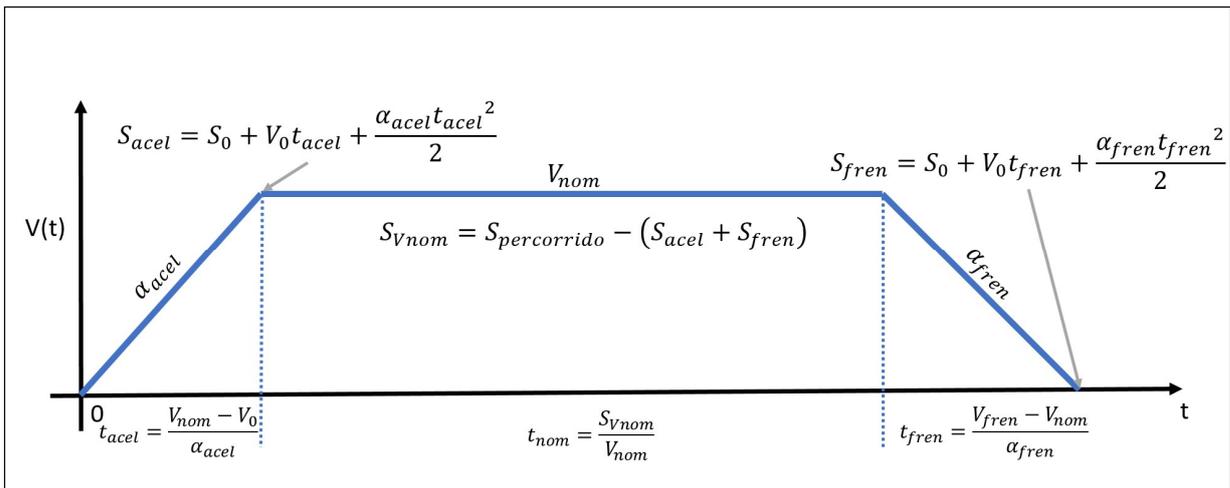


Figura 3.3 – Períodos em aceleração, velocidade nominal e frenagem

Dado as variáveis necessárias obtidas nas equações anteriores, o próximo passo é identificar primeiramente os tempos de permanência e espaço percorrido pela empilhadeira em cada momento de aceleração (3.7) e (3.8) e frenagem (3.9) e (3.10), sendo respectivamente as equações de tempo de permanência e espaço percorrido.

$$t_{acel} = \frac{V_{nom} - V_0}{\alpha_{acel}} \quad (7)$$

Onde,

t_{acel} = Tempo de permanência em aceleração.

V_{nom} = Velocidade nominal da empilhadeira.

V_0 = Velocidade inicial da empilhadeira.

α_{accel} = aceleração da empilhadeira.

$$S_{accel} = S_0 + V_0 t_{accel} + \frac{\alpha_{accel} t_{accel}^2}{2} \quad (8)$$

Sendo,

S_{accel} = Espaço percorrido em aceleração.

S_0 = Local inicial da empilhadeira no início da aceleração.

Da mesma forma, através da seguinte equação tem-se o tempo de frenagem:

$$t_{fren} = \frac{V_{fren} - V_{nom}}{\alpha_{fren}} \quad (9)$$

Onde,

t_{fren} = Tempo de frenagem.

V_{fren} = Velocidade final de frenagem

α_{fren} = Aceleração da frenagem

E também o espaço percorrido durante a frenagem:

$$S_{fren} = S_0 + V_{nom} t_{fren} + \frac{\alpha_{fren} t_{fren}^2}{2} \quad (10)$$

Sendo,

S_{fren} = Espaço percorrido para frenagem

Se $S_{acel} + S_{fren} > S_{percurso}$ então calcular o novo $S_{percurso}$:

$$S_{perc} = V_0 \left(\frac{V_{nom} - V_0}{a_{acel}} \right) + \frac{a_{acel}}{2} \left(\frac{V_{nom} - V_0}{a_{acel}} \right)^2 + V_{nom} \left(\frac{V_{final} - V_{nom}}{a_{fren}} \right) + \frac{a_{fren}}{2} \left(\frac{V_{final} - V_{nom}}{a_{fren}} \right)^2 \quad (11)$$

Onde,

S_{perc} = Espaço total percorrido

V_{final} = Velocidade final

Caso contrário, o S_{perc} corresponde ao espaço percorrido considerando o período de aceleração, velocidade nominal e desaceleração desenvolvido pela equação a seguir:

$$S_{perc} = V_0 \left(\frac{V_{nom} - V_0}{a_{acel}} \right) + \frac{(V_{nom} - V_0)^2}{2a_{acel}} + V_{nom} \left(\frac{V_{final} - V_{nom}}{a_{fren}} \right) + \frac{(V_{final} - V_{nom})^2}{2a_{fren}} \quad (12)$$

Isolando-se a velocidade nominal tem-se:

$$V_{nom}^2 = \left(\frac{1}{a_{fren} - a_{acel}} \right) (-V_0^2 a_{fren} + V_{final}^2 a_{acel} + S_{perc} 2a_{acel} a_{fren}) \quad (13)$$

Resultando assim na equação.

$$V_{nom} = \sqrt{\frac{V_{final}^2 a_{acel} - V_0^2 a_{fren} + 2S_{perc} a_{acel} a_{fren}}{a_{fren} - a_{acel}}} \quad (14)$$

Assumindo que $V_0 = 0$ e $V_{final} = 0$ e substituindo em (3.14), tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$S_{perc} = \frac{a_{acel}}{2} \left(\frac{V_{nom}}{a_{acel}} \right)^2 - \frac{V_{nom}^2}{a_{fren}} + \frac{a_{fren}}{2} \left(\frac{-V_{nom}}{a_{fren}} \right)^2 \quad (15)$$

$$S_{perc} = \frac{V_{nom}^2}{2a_{acel}} - \frac{V_{nom}^2}{a_{fren}} + \frac{V_{nom}^2}{2a_{fren}} = \frac{V_{nom}^2 (a_{fren} - 2a_{acel} + a_{acel})}{2a_{acel}a_{fren}} \quad (16)$$

$$V_{nom} = \sqrt{\frac{S_{perc}(2a_{acel}a_{fren})}{-a_{acel}}} = \sqrt{\frac{2S_{perc}a_{acel}a_{fren}}{a_{fren} - a_{acel}}} \quad (17)$$

A partir da identificação do espaço a ser percorrido em cada estado (aceleração, velocidade constante e frenagem), calcula-se então o tempo total de deslocamento:

Caso $S_{acel} + S_{fren} < S_{percorrido}$, então:

$$S_{Vnom} = S_{percorrido} - (S_{acel} + S_{fren}) \quad (18)$$

$$t_{nom} = \frac{S_{Vnom}}{V_{nom}} \quad (19)$$

$$t_{tot} = t_{acel} + t_{nom} + t_{fren} \quad (20)$$

Sendo assim, adicionando a formulação apresentada no modelo de simulação, tem-se o fluxograma demonstrado na Figura 3.4, onde a partir do recebimento da tarefa de transporte, a primeira atividade realizada pela empilhadeira é coletar todos os dados pertinentes a situação simulada, tais como a distância a ser percorrida até o próximo ponto de desaceleração, massa da carga transportada, modelo da empilhadeira e todas outras informações necessárias para a próxima atividade, que é o desenvolvimento das equações demonstradas no capítulo 3.1, logo

em seguida a empilhadeira inicia então o seu deslocamento até atingir o próximo ponto, identificando se o mesmo é o ponto final ou não, reiniciando o ciclo de atividades novamente em caso negativo e finalizando a tarefa de transporte dos itens em caso positivo.

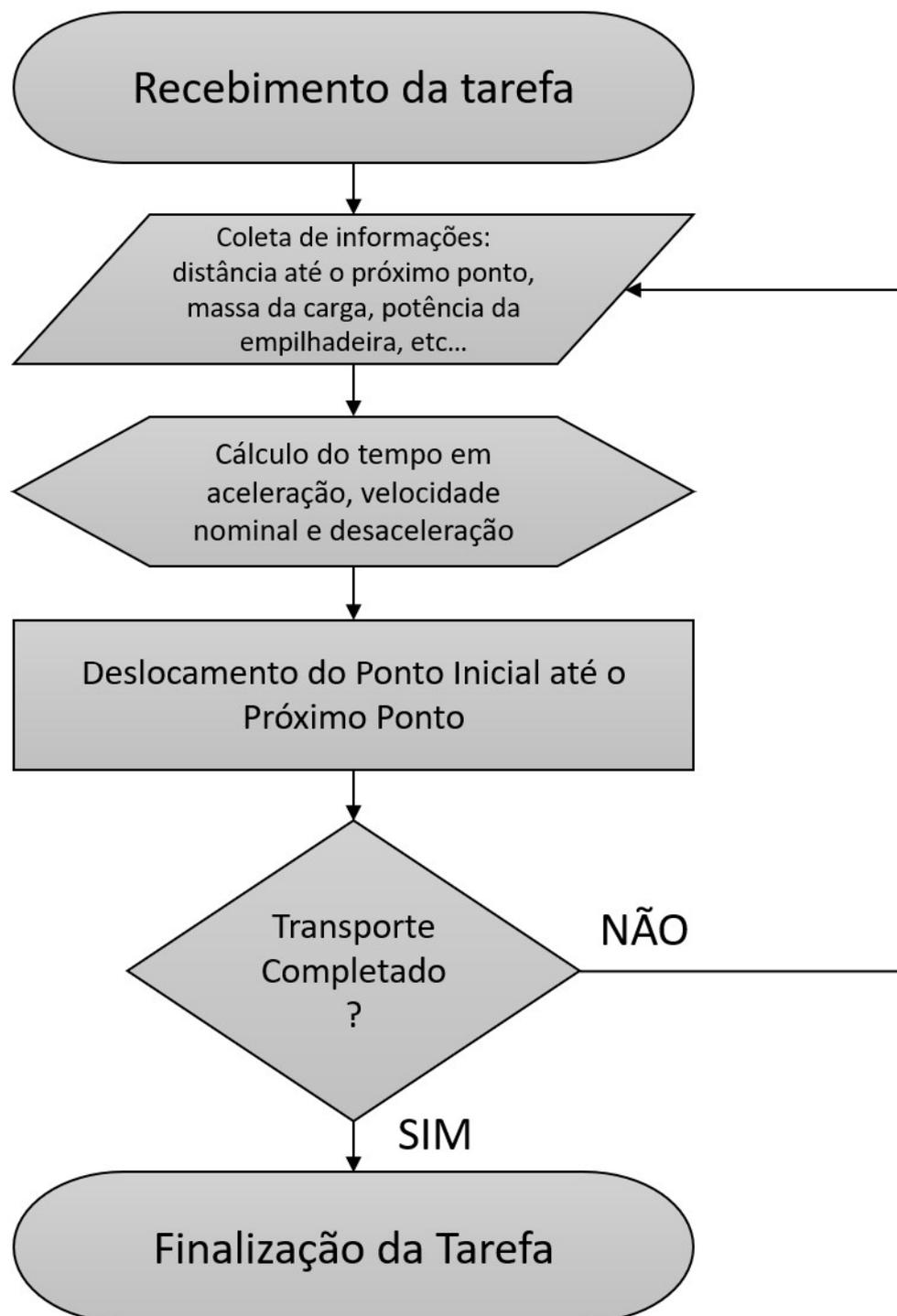


Figura 3.4 - Fluxograma de cálculo do tempo de deslocamento da empilhadeira

3.2. SIMULAÇÃO COM TAXA DISCRETA

Esta metodologia, também conhecida como “time slicing” (fatiamento do tempo), visa gerar diversos eventos discretos com curtos intervalos entre as execuções, permitindo assim um monitoramento constante das variáveis em análise. Para um breve estudo, um modelo simples foi desenvolvido no programa de simulação FlexSim para identificar o modelo de análise/modelagem mais eficiente do ponto de vista computacional. O modelo foi construído com apenas dois elementos fixos (uma entrada e uma saída de entidades), um elemento móvel (empilhadeira) e dois pontos que definem o percurso a ser realizado pela empilhadeira, que pode assumir diversas posições no ambiente 3D, conforme observado na Figura 3.5.

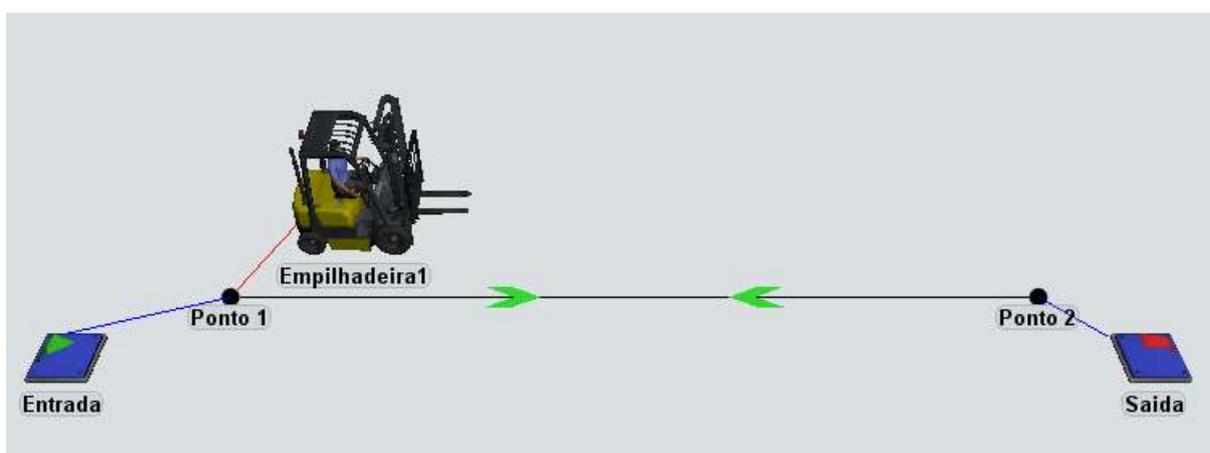


Figura 3.5: Modelo de simulação criado no software FlexSim

Analisando o modelo unicamente pelo ponto de vista da simulação discreta, a ação da empilhadeira de transporte das entidades do Ponto 1 até o Ponto 2 é composto, resumidamente, por seis eventos:

1. Chegada da entidade/produto;
2. Deslocamento da empilhadeira até a entidade/produto;
3. Carregamento do produto na empilhadeira;
4. Deslocamento da empilhadeira carregada até o local de saída;
5. Descarregamento da entidade/produto;
6. Saída da entidade/produto do modelo.

Outros eventos estão envolvidos neste processo, porém, o foco será no evento 4 descrito na Figura 3.5, que é a movimentação da empilhadeira carregada do ponto 1 até o ponto 2. Usualmente este evento possui dois momentos de execução, o primeiro é quando a empilhadeira sai do ponto 1, onde todos os parâmetros de distância, velocidade, aceleração, etc, são definidos. O segundo momento relacionado a esta etapa só é “ativado” quando a empilhadeira chega ao ponto 2. Para a representação da simulação de eventos contínuos foi utilizada uma ferramenta chamada “User Event” (evento do usuário), de forma que um evento X é criado e repetido frequentemente ao longo da simulação do modelo, visando determinar a variação no estado da Empilhadeira, e assim alterando continuamente a execução das atividades.

No modelo corrente tem-se como objetivo o estudo da variação do consumo de combustível da Empilhadeira ao longo de seu trajeto considerando a inclinação da mesma em relação a superfície do modelo, ou seja, caso a Empilhadeira se desloque em uma superfície plana, seu consumo deverá ser de X, caso a mesma esteja em uma descida, o consumo será reduzido ou aumentado no caso de uma subida. Para este exemplo, a seguinte equação foi criada e utilizada de forma a representar esta variação:

$$\text{consumo} = A + B \cdot \text{sen}\theta_y \quad (4.21)$$

Sendo que A e B são constantes relacionadas ao desempenho da empilhadeira e θ_y é a inclinação do trajeto. Para verificação do modelo, alguns testes foram realizados com duração de 100 segundos, alterando as posições dos pontos nos eixos cartesianos (Figura 3.6 e Figura 3.7).

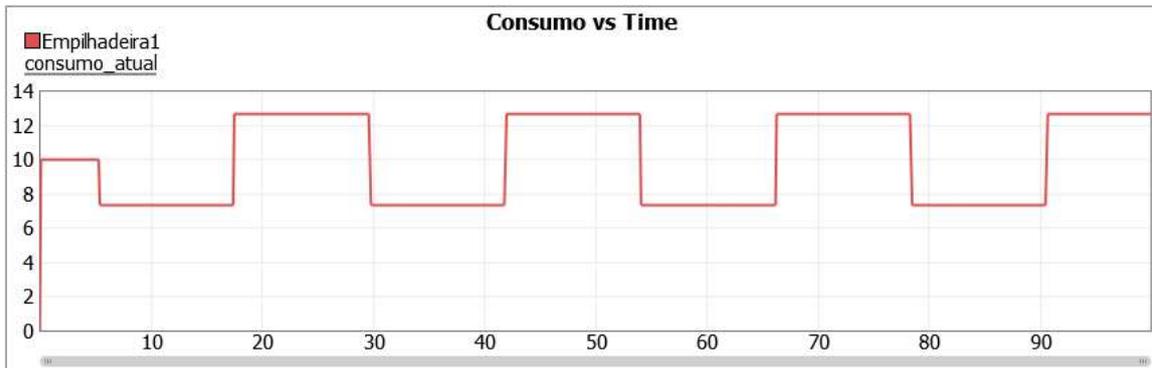


Figura 3.6: Consumo da empilhadeira ao longo da simulação

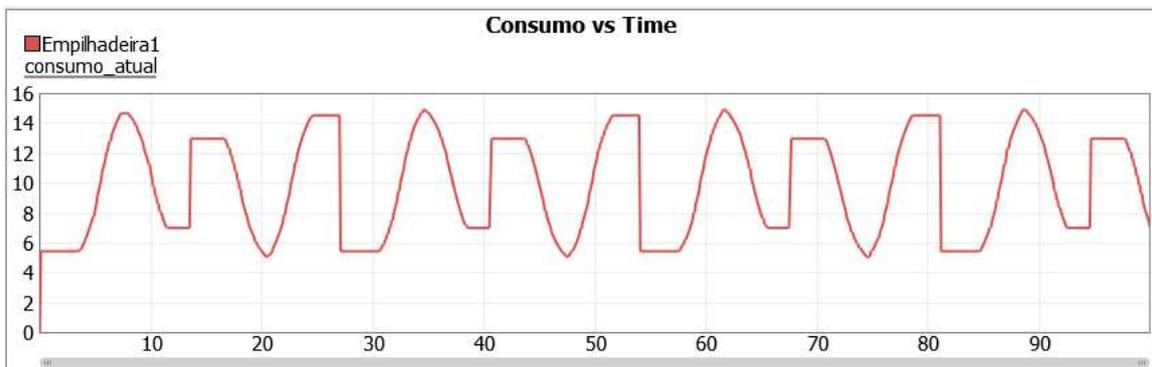


Figura 3.7: Variação do eixo Y da empilhadeira ao longo da simulação

Visto que a equação é executada e funciona de acordo com o esperado, podendo então ser relacionada a diversos outros fatores como carga, atrito, torque, etc, o segundo passo deste estudo é identificar a viabilidade computacional da inserção deste tipo de evento.

Dois testes foram feitos nesta análise.

No primeiro teste a Eq. 4.21 foi inserida diretamente no programa, e para que a mesma seja executada da forma correta, alguns parâmetros para leitura e armazenagem dos dados são necessários, resultando no algoritmo demonstrado na Figura 3.8, que foi inserido no "User Event" (evento do usuário)

```

event
1 /**Calculo Experimental*/
2 treenode current = ownerobject(c);
3
4 treenode empilhadeira = node("Empilhadeira", model());
5
6 double roty = yrot(empilhadeira);
7
8 double consumo = 10 + roty * 0.1;
9
10 //settablenum("teste", 1, 1, consumo);
11
12 treenode label_atual = label(empilhadeira, "consumo_atual");
13 treenode label_media = label(empilhadeira, "consumo_medio");
14
15 inc(gettablecell(label_media, 1, 1), consumo);
16 inc(gettablecell(label_media, 2, 1), 1);
17
18 double media = gettablenum(label_media, 1, 1) / gettablenum(label_media, 2, 1);
19
20 setnodenum(label_atual, consumo);
21 setnodenum(label_media, media);

```

Figura 3.8: Bloco de programação para cálculo do consumo da empilhadeira.

Os resultados demonstrados na Figura 3.9 apresentam o tempo computacional obtido pelo cálculo do consumo de combustível sendo feito diretamente no programa de simulação. Duração a simulação de cem segundos, o algoritmo foi executado 9999 vezes, resultando em um total de tempo de 14,25 milissegundos.

FlexScript Code Profile			
<input checked="" type="checkbox"/> Enable FlexScript Code Profiling		<input type="button" value="Reset Code Profile Data"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Self Time (ms)	Total Time (ms)	Hit Count	Path
14.25	14.25	9999	/Tools/UserEvents/Analise_Continua>variables/event

Figura 3.9: Resultado do tempo computacional com o código direto no software FlexSim.

O segundo teste consistiu basicamente em executar o mesmo código descrito no primeiro teste, porém, de forma externa através de uma DLL (biblioteca de chamada dinâmica). Para o desenvolvimento da biblioteca, foi utilizado o programa

Visual Studio 2015 a partir do modelo desenvolvido e disponibilizado em <https://www.flexsim.com/community/forum/showthread.php?t=382>.

Ao executar a simulação observa-se através da Figura 3.10 que o tempo de cálculo do bloco foi consideravelmente maior que no primeiro teste (Figura 3.9).

Self Time (ms)	Total Time (ms)	Hit Count	Path
353.15	353.15	9999	/Tools/UserEvents/Analise_Continua>variables/event

Figura 3.10: Resultado do tempo computacional com o código executado em uma biblioteca externa

Para execução dos mesmos 9999 eventos (*Hit Count*), o software levou cerca de 353.15 milissegundos (*Total Time (ms)*), ou seja, um valor consideravelmente mais alto que na abordagem anterior.

Embora o resultado esperado não fosse o previsto, pois esperava-se que um código já compilado em uma biblioteca dinâmica obtivesse um desempenho computacional melhor que o código inserido no evento do usuário do primeiro teste, o segundo método permite que o modelo de simulação trabalhe em conjunto com qualquer outro programa que ofereça a interface para ser executado através de uma biblioteca dinâmica (DLL) como, por exemplo, alguns programas de otimização.

Mesmo com pior desempenho, o segundo método é de extrema importância para o desenvolvimento de trabalhos futuros, uma vez que o mesmo tem como objetivo integrar eventos contínuos na simulação discreta, e estes eventos podem depender diretamente de algoritmos complexos para atualização ou otimização de alguma função relacionada a atividade simulada, desta forma, é interessante seguir esta linha de desenvolvimento.

4. MODELO DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS

4.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO SIMULADO

O modelo descrito a seguir foi usado para demonstrar a aplicabilidade da simulação híbrida em sistemas semelhantes a operações reais. Conforme mencionado anteriormente, a simulação unicamente de eventos discretos carece de informações muitas vezes necessárias para análise detalhada de operações reais, e por outro lado, a simulação isolada de eventos contínuos não permite muitas vezes que o modelo represente a interação de eventos relacionados a outro sistema que não seja o representado pela modelagem computacional já desenvolvida.

O modelo de simulação utilizado representa um sistema simplificado de transporte de produtos por empilhadeiras em um espaço relativamente pequeno, contendo apenas um ponto de carga da empilhadeira, dois corredores perpendiculares e um ponto de descarga, conforme apresentado na Figura 4.1.

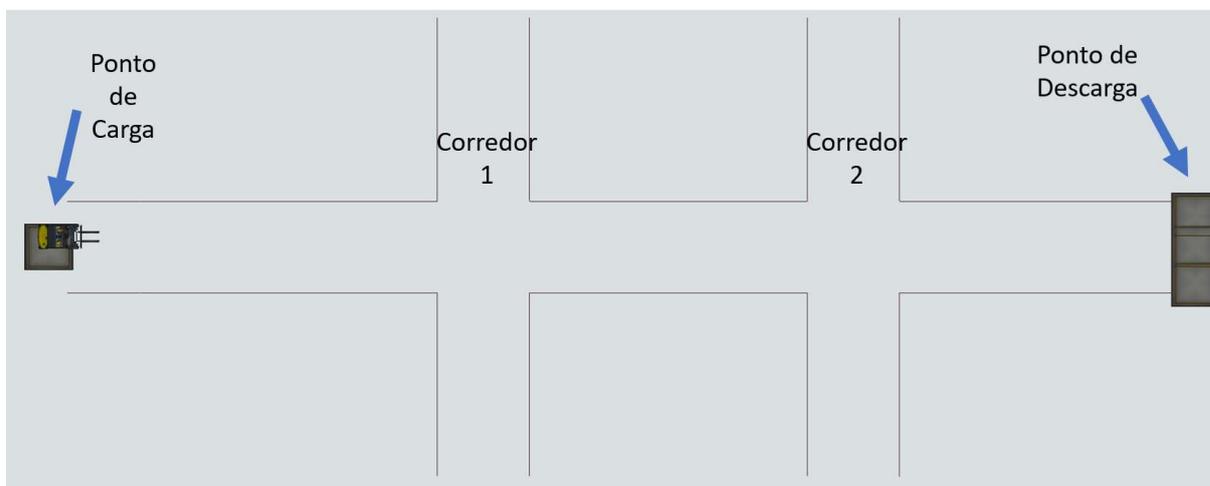


Figura 4.1 - Layout Modelo de Simulação

Conforme apresentado na Figura 4.2, a distância total percorrida pela empilhadeira a partir do ponto de carga, até o ponto de descarga é de 60 metros, onde o mesmo é dividido em três partes sendo a distância percorrida do ponto de carga até o primeiro cruzamento é de 20 metros, a empilhadeira deve percorrer mais 20 metros até atingir o segundo cruzamento e mais 20 metros até o ponto de descarga.

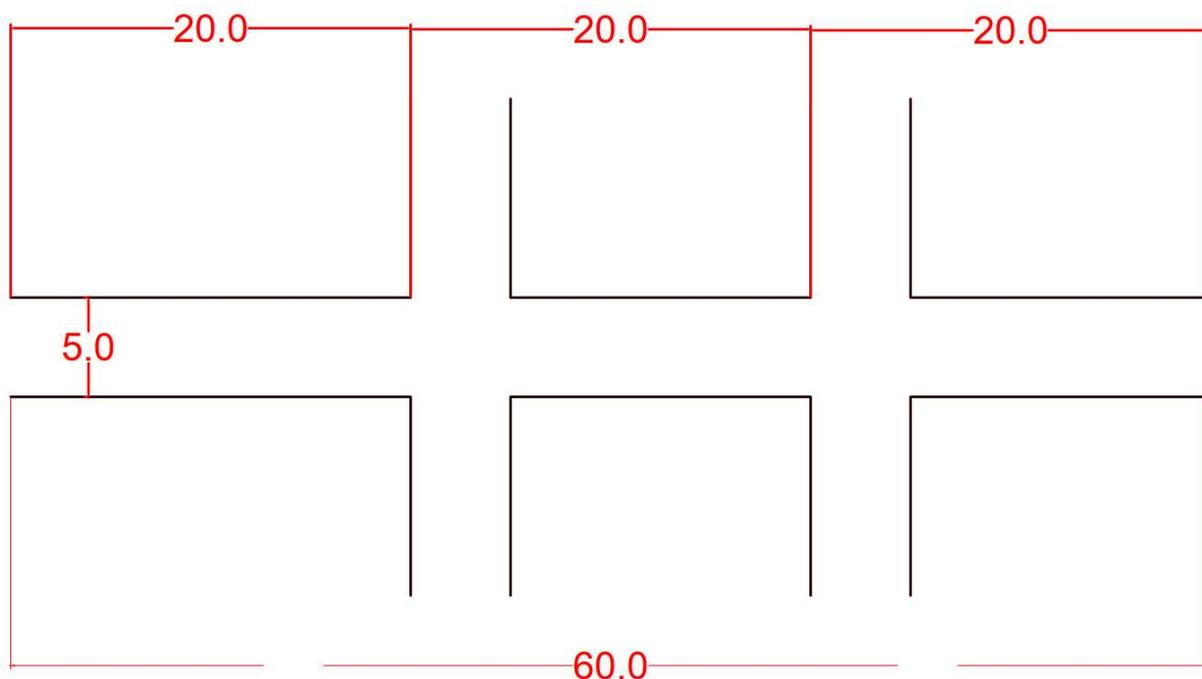


Figura 4.2- Planta baixa do modelo simulado

No modelo simulado foram considerados dois tipos de entidades a serem transportadas, onde a principal diferença entre ambas está relacionada a sua massa, conforme demonstrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Massas das entidades simuladas

Entidade	Massa (Kg)
Tipo 1	500
Tipo 2	1500

Sabe-se que em um sistema real, por medida de segurança, ao transportar o produto do ponto de carga ao ponto de descarga a empilhadeira reduz a velocidade nos cruzamentos para evitar qualquer tipo de acidente, o que impacta no tempo de percurso.

4.2. MODELO DISCRETO

Um modelo discreto foi criado para servir de base de comparação para o modelo híbrido. Pelo fato do modelo discreto ser relativamente simples e não ter variações, alguns resultados podem ser calculados diretamente sem a necessidade de executar a simulação. Na Figura 4.3 é possível observar o ciclo de trabalho da empilhadeira, da qual parte do ponto de carregamento do modelo e segue a seguinte sequência: 1) Ao receber uma tarefa de transporte inicia o processo de carregamento, do qual foi assumido uma premissa de 2 segundos; 2) Com o item carregado, a empilhadeira inicia o deslocamento a uma velocidade de 4.38 m/s, percorrendo uma distância de 60 metros até o ponto de descarga; 3) Inicia procedimento de descarga do item, do qual possui a duração de 2 segundos; 4) Inicia o deslocamento de retorno até o ponto inicial a mesma velocidade de deslocamento carregado (4.38 m/s), percorrendo o mesmo trajeto para retorno de 60 metros.

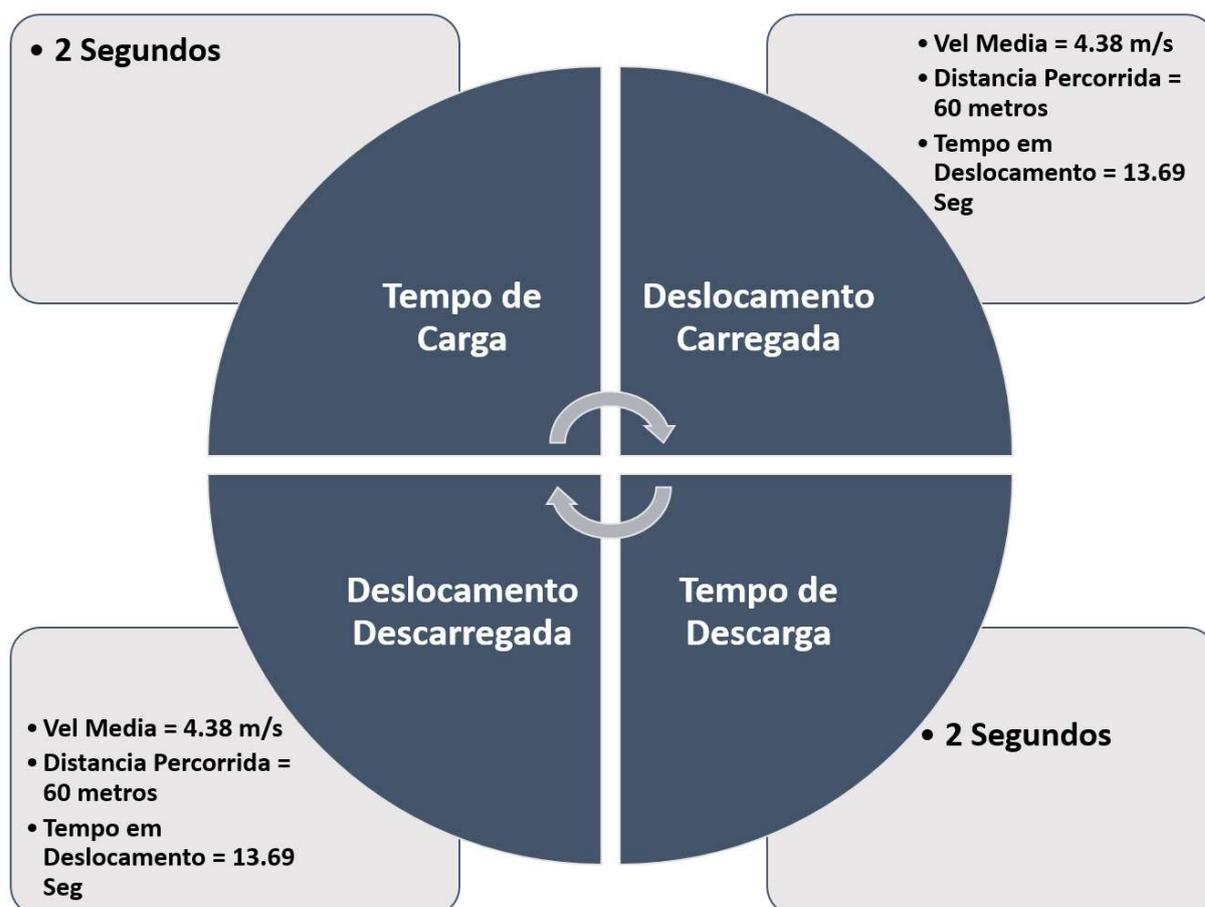


Figura 4.3 – Componentes do Tempos de ciclo da empilhadeira

Na seguinte equação observa-se o cálculo do Tempo de Ciclo da empilhadeira, que é obtido a partir da soma dos componentes demonstrados na Figura 4.3.

$$TC = \text{Tempo de Carga} + \text{Tempo em Deslocamento Carregada} + \text{Tempo de Descarga} \quad (4.22)$$

$$TC = 2 + 13.69 + 2 + 13.69 \quad (4.23)$$

$$TC = 31.38 \quad (4.24)$$

Desta forma, a capacidade de transporte da empilhadeira pode ser calculada previamente e comprovada através do modelo de simulação, ou seja, no caso de um tempo de simulação de 8 horas (28800 segundos), e assumindo a premissa de um fornecimento infinito de peças no Ponto de Carga, um total de 918 itens deverão ser descarregados no ponto de descarga, conforme mostra a equação:

$$\text{Total Transportado} = \frac{\text{Tempo Simulado}}{\text{Tempo de Ciclo (TC)}} \quad (4.25)$$

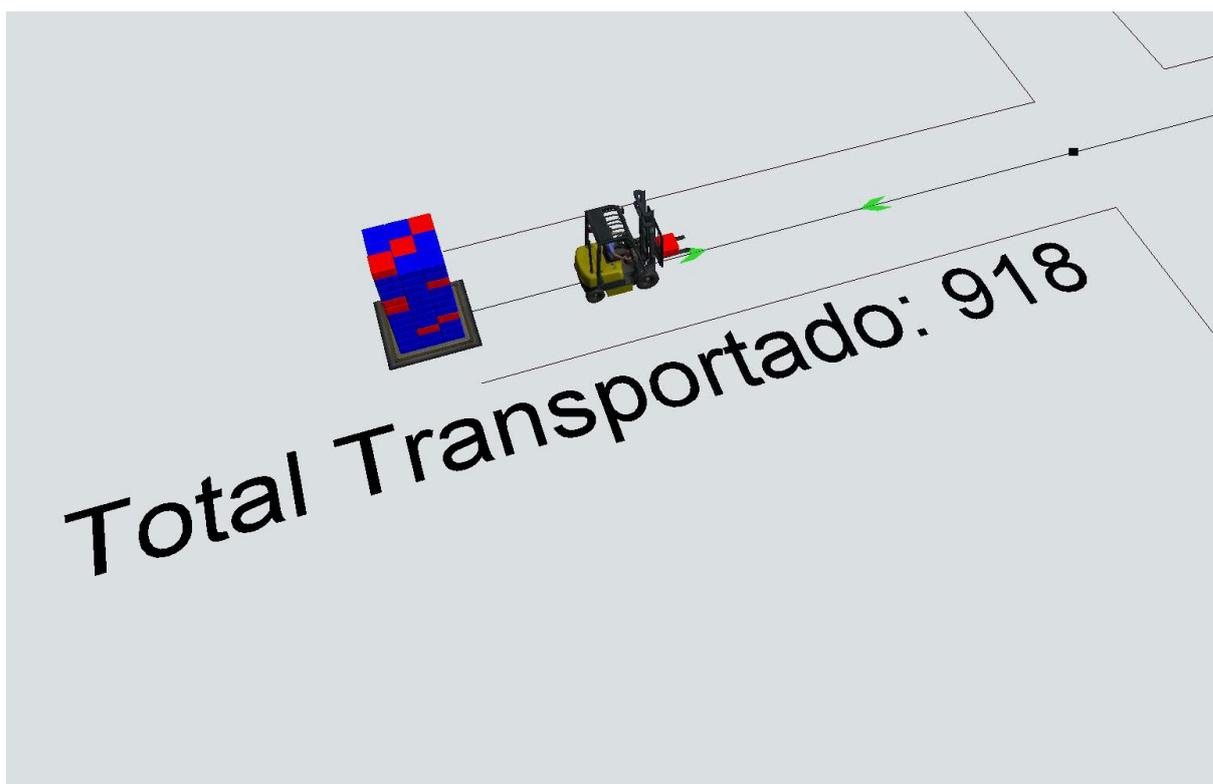
$$\text{Total Transportado} = \frac{28800}{31.38} \quad (4.26)$$

$$\text{Total Transportado} \cong 918 \quad (4.27)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio, devido ao ciclo ser o mesmo durante todo o período simulado, a Tabela 4.2 contém o comportamento da utilização esperada da empilhadeira.

Tabela 4.2 - Cálculo teórico da utilização da empilhadeira

	<i>Tempo (Segundos)</i>	<i>Utilização (%)</i>
<i>Tempo de Carga</i>	2	6.37%
<i>Deslocamento Carregado</i>	13.69	43.62%
<i>Tempo de Descarga</i>	2	6.37%
<i>Deslocamento Descarregado</i>	13.69	43.62%

**Figura 4.4 - Resultado de 8 horas simuladas**

Diante dos valores calculados anteriormente, a Figura 4.4 demonstra uma “foto” do modelo ao final da simulação de 28800 segundos (8 horas), na qual é possível observar que o total de itens transportados é de exatamente 918 entidades.

E da mesma forma com que foi calculado a quantidade de itens transportados, os valores de utilização presentes na Tabela 4.2 são os mesmos simulados referentes a utilização da empilhadeira, demonstrado na Figura 4.5, o que traz ao modelo simulado a certeza de que, a partir das premissas e ausência de variáveis estocásticas, o mesmo representa fielmente o sistema estudado.

Através da Figura 4.5 percebe-se que é possível identificar apenas o período em que a empilhadeira permaneceu nos estados de deslocamento vazia e carregada (ambas com 43.6%), já que a velocidade média assumida contempla todas as fases do deslocamento (aceleração, manutenção da velocidade e desaceleração).

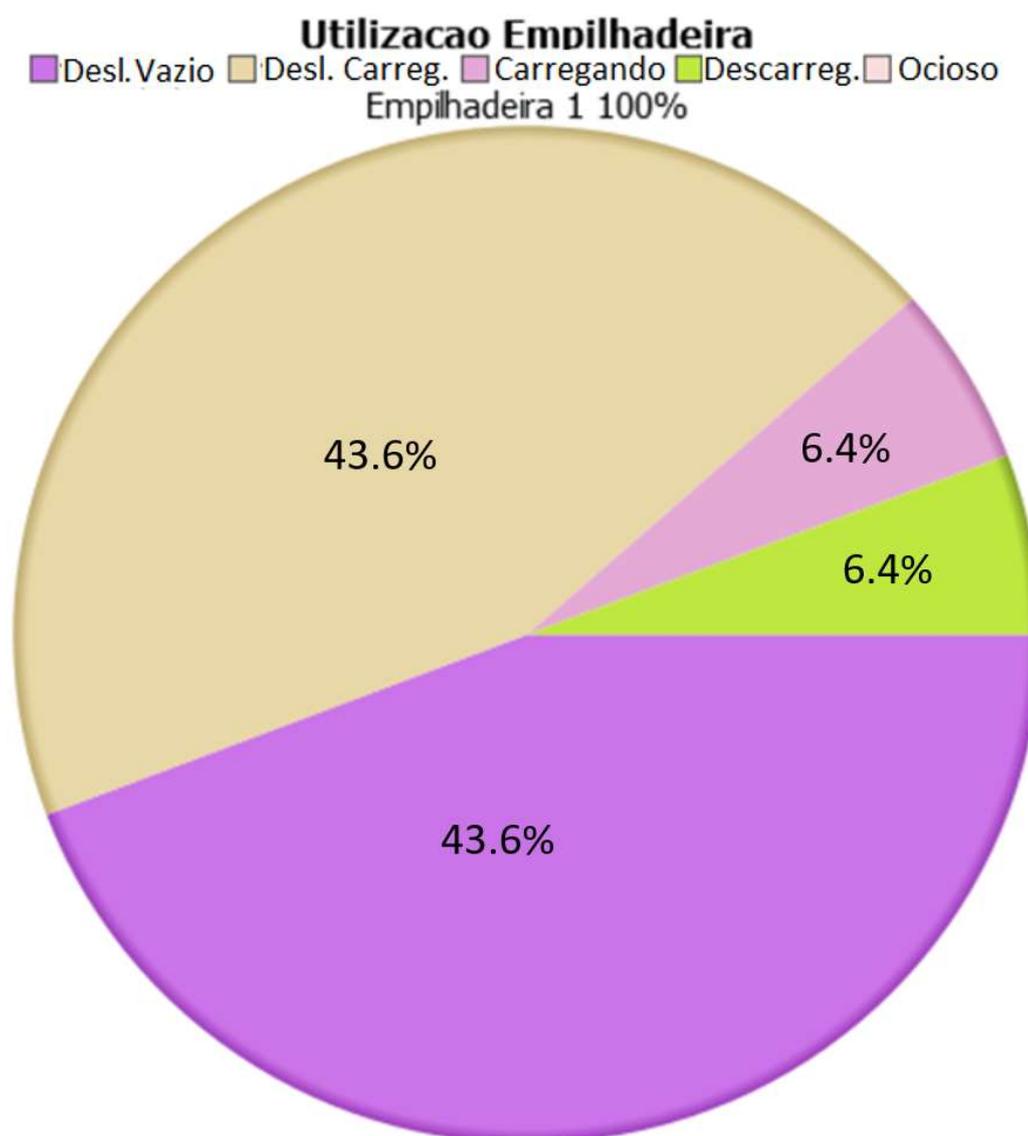


Figura 4.5 - Gráfico de utilização da Empilhadeira Discreta

Conforme citado anteriormente, devido ao modelo discreto possuir as suas principais variáveis decisórias previamente determinadas, como é o caso, por exemplo, da velocidade média da empilhadeira, que por ser fixa, não sofre qualquer impacto com a variação do tipo de carga que está sendo transportada. Desta forma espera-se que independentemente do número de replicações, a variabilidade entre as mesmas seja nula, pois as variáveis do modelo permanecem as mesmas em todas as replicações, a Figura 4.6 apresenta estes resultados a partir da coleta do total de itens transportados em 50 replicações simuladas pelo período de 8 horas.

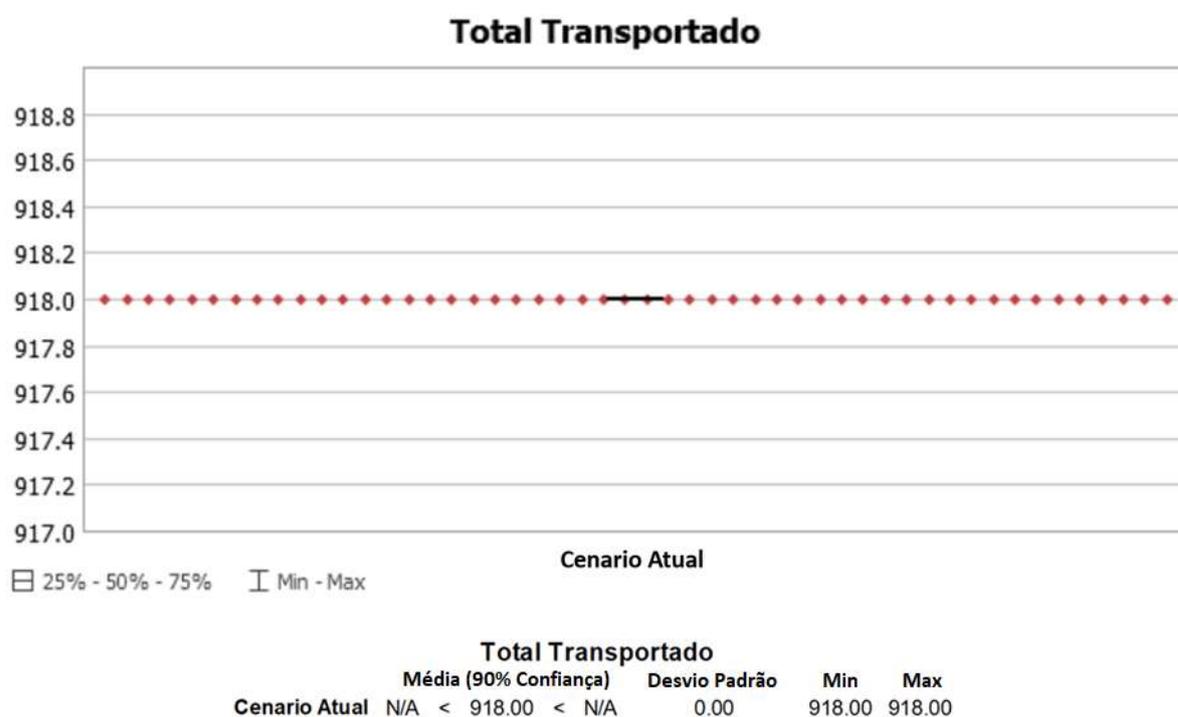


Figura 4.6 - Resultado de 50 replicações do modelo observando o total de itens transportados

Embora o modelo discreto apresentado não apresente variabilidade devido ao método de modelagem utilizado, a simulação de eventos discretos (SED) de forma geral adota essa abordagem pois mesmo utilizando variáveis médias (como no caso da velocidade, por exemplo) ou considerando dados estocásticos através de distribuições estatísticas, é possível simular de maneira razoável a interação entre os diferentes setores de um sistema.

Na Figura 4.7 nota-se que ao inserir uma curva de chegada de peças através de uma distribuição exponencial com média de 33 segundos, representando a variação na oferta de peças no setor anterior, o comportamento da fila de peças no ponto de carga varia consideravelmente, demonstrando que, embora a empilhadeira atenda a demanda, o número de entidades aguardando transporte chega a até 18 unidades, e devido aos baixos picos, a ociosidade da empilhadeira chega a até 5.7%, conforme pode ser visto na Figura 4.8.

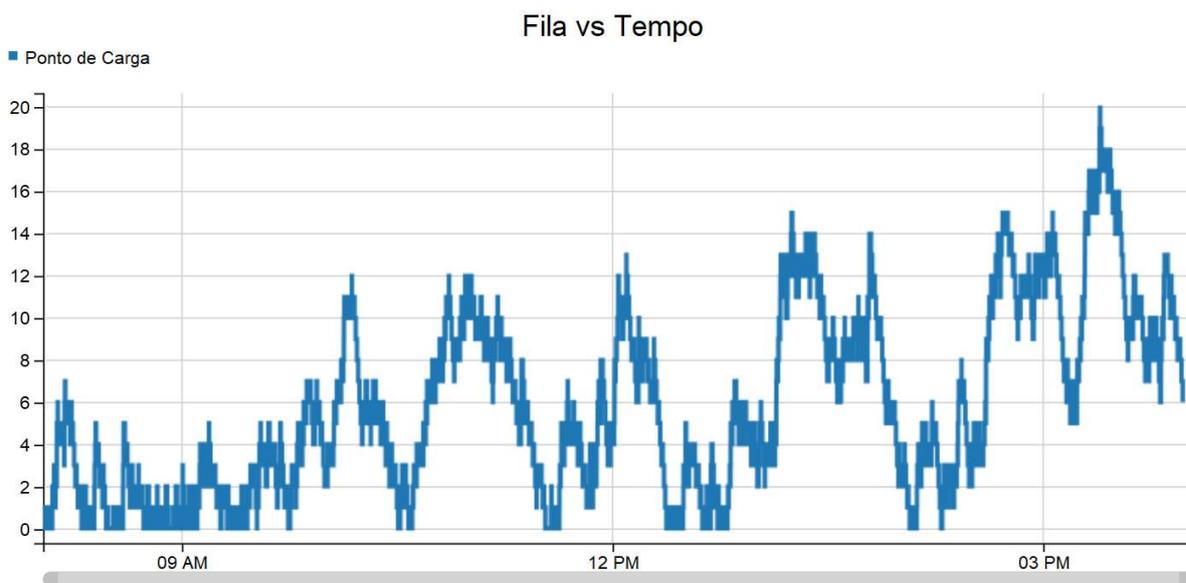


Figura 4.7 - Comportamento da fila de peças no Ponto de Carga com variabilidade na chegada

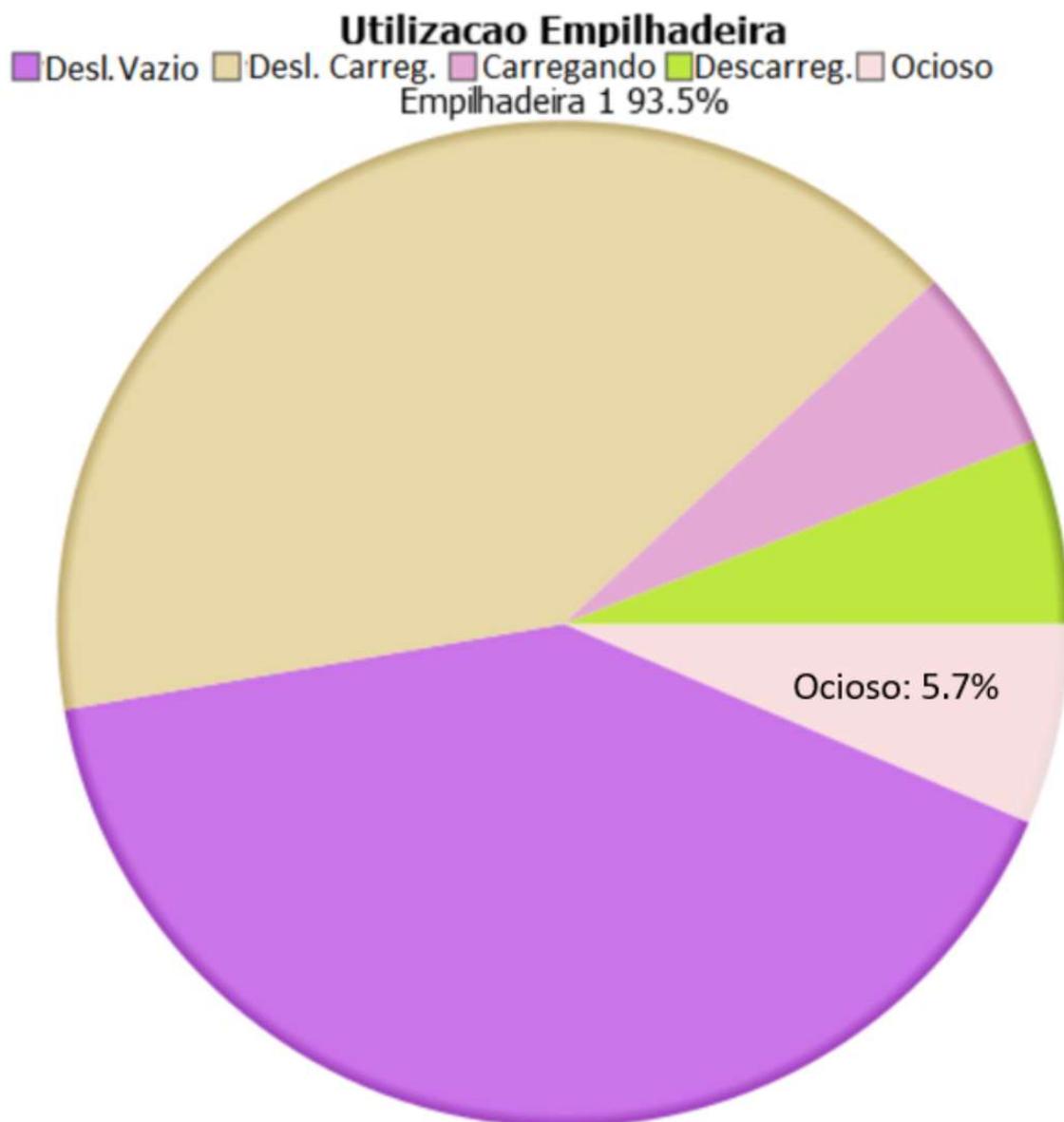


Figura 4.8 - Ociosidade da Empilhadeira com inserção da variabilidade do tempo de chegada de entidades

Diferente da previsibilidade do número de entidades produzidas demonstrada na Equação 4.27, a partir do momento que alguma variável determinística é modificada para uma variável estocástica, o modelo passa a se comportar de maneira estocástica, aumentando significativamente o nível de dificuldade de aplicação de uma equação matemática para “prever” o resultado de uma replicação do modelo, tornando assim a simulação de eventos discretos mais suscetível a erros na modelagem do transporte de materiais.

4.3. MODELO HÍBRIDO

O modelo híbrido proposto consiste em calcular analiticamente as equações de movimento da empilhadeira e determinar exatamente os instantes de tempo para alteração do estado do sistema, desta forma, o modelo tem a capacidade de representar a operação de um sistema de forma mais real, pois considera a alteração das variáveis de forma totalmente dinâmica, e não está fixa ou atrelada diretamente a uma distribuição estatística como no caso da simulação de eventos discretos.

Um fato evidente da diferença entre os dois modelos já é percebido através da própria utilização da empilhadeira, da qual, conforme Figura 4.9, observa-se que apresenta um aumento no tempo de deslocamento carregada, o que é totalmente compreensível, pois sabe-se que em uma operação real, quando carregada a empilhadeira tende a reduzir a sua aceleração e desaceleração devido à maior inércia.

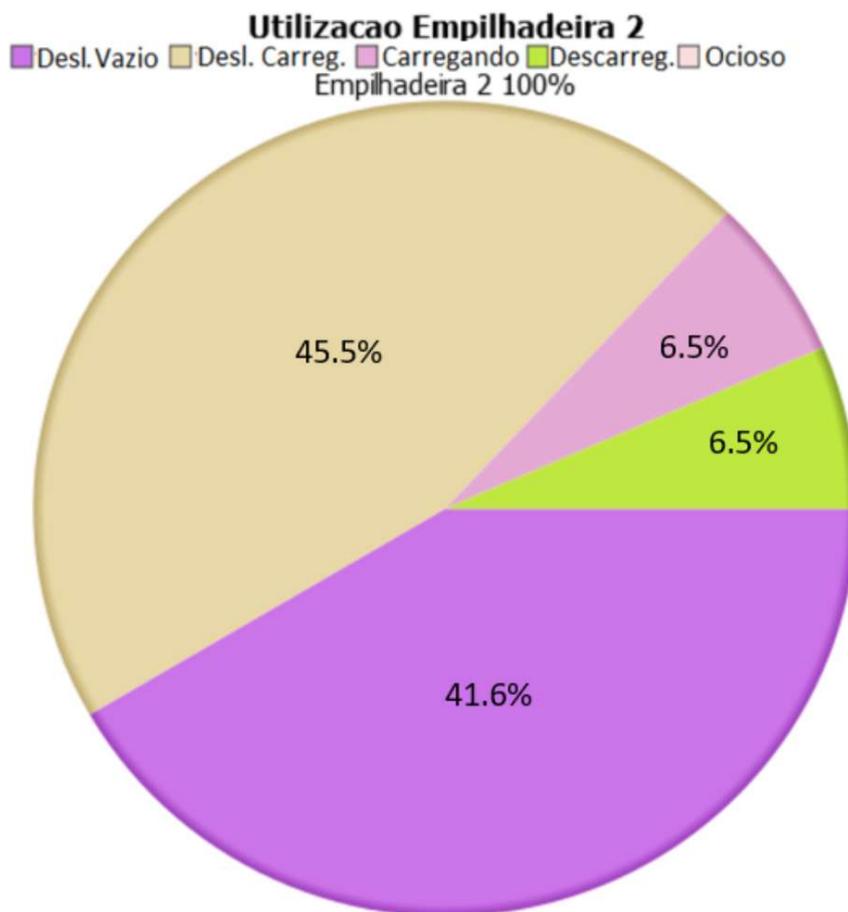


Figura 4.9 - Utilização da Empilhadeira Híbrida

Na Figura 4.9 a utilização inclui todas as fases do deslocamento (aceleração, velocidade constante e desaceleração). Porém, o modelo poderia fornecer detalhes em relação a cada uma destas fases, pois diferente do modelo anterior, este método permite que cada momento seja precisamente calculado como, por exemplo, o tempo em que a empilhadeira fica em aceleração, a qual dificilmente seria calculado na simulação por eventos discretos convencional. Na Figura 4.10 observam-se as variações da velocidade da empilhadeira ao longo do tempo.

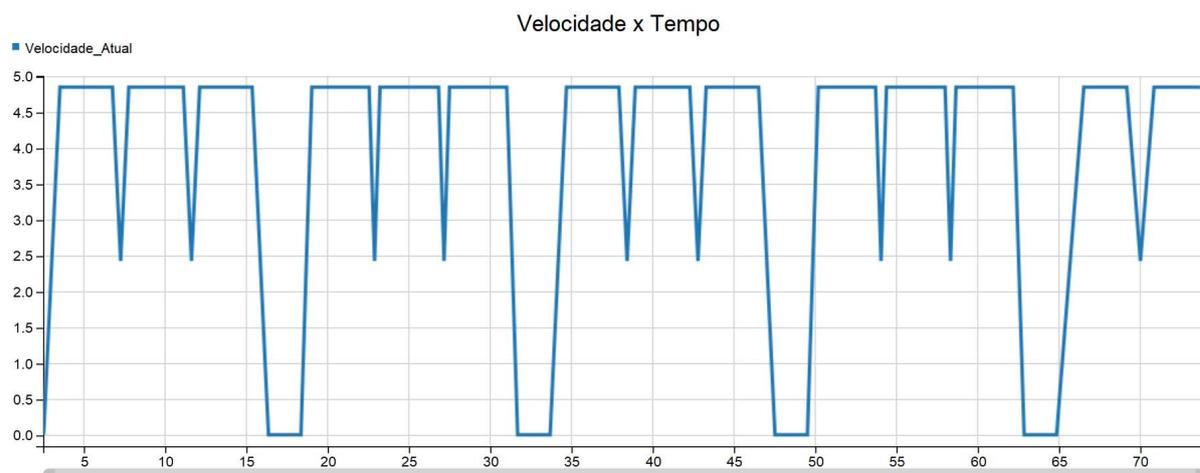


Figura 4.10 - Variação da velocidade da empilhadeira ao longo do tempo

Através de uma análise mais detalhada da variação da velocidade da empilhadeira ao longo do tempo é possível identificar exatamente os períodos em que a empilhadeira permanece em cada ciclo de trabalho, juntamente com os períodos de tempo de carga/descarga e também os momentos de aceleração e desaceleração para passagem pelos cruzamentos.



Figura 4.11 - Detalhamento dos motivos das reduções de velocidade da empilhadeira ao longo do tempo

É ainda possível observar através da Tabela 4.3 que devido as equações dinâmicas de movimento alterarem frequentemente fatores como o tempo de deslocamento, aceleração e desaceleração da empilhadeira levando em consideração fatores como a potência da empilhadeira, massa transportada (zero no caso da empilhadeira estar vazia), dentre outras, a duração dos períodos em deslocamento quando a empilhadeira está vazia ou carregada com diferentes cargas é diferente, pois o comportamento físico do equipamento é totalmente dependente de tais fatores.

Tabela 4.3 - Tempo de permanência da empilhadeira em cada período de deslocamento

Período de Deslocamento	Tempo no Período (seg.)
1	16,35
2	15,35
3	15,86
4	15,35
5	16,86
6	15,35
7	15,85
8	15,35
9	16,87
10	15,35
11	15,85
12	15,35
13	15,85

Dado que a empilhadeira carrega dois tipos diferentes de carga, é possível observar que o menor valor entre os apresentados Tabela 4.3 é o de 15,35 segundos (presente nos períodos 2, 4, 6, 8, 10 e 12), pois representa as viagens que a empilhadeira estava descarregada, e portanto, se repete de forma intercalada, já os outros valores (15.35 e 16.86) se alternam, pois variam de acordo com o tipo de carga que está sendo transportada.

Devido a empilhadeira do modelo híbrido se ajustar à carga transportada e o modelo gerar dois diferentes tipos de estrados (entidades), em cada replicação simulada o número de estrados gerados de cada tipo varia de acordo com uma distribuição uniforme, tornando assim o modelo estocástico, e não apenas determinístico como o modelo anterior. Através da Figura 4.12 observa-se que em 50 replicações foi apresentada uma pequena variabilidade entre o número de estrados

transportados, já que em alguns casos o número de estrados mais leves gerados foi maior que o número de estrados mais pesados.

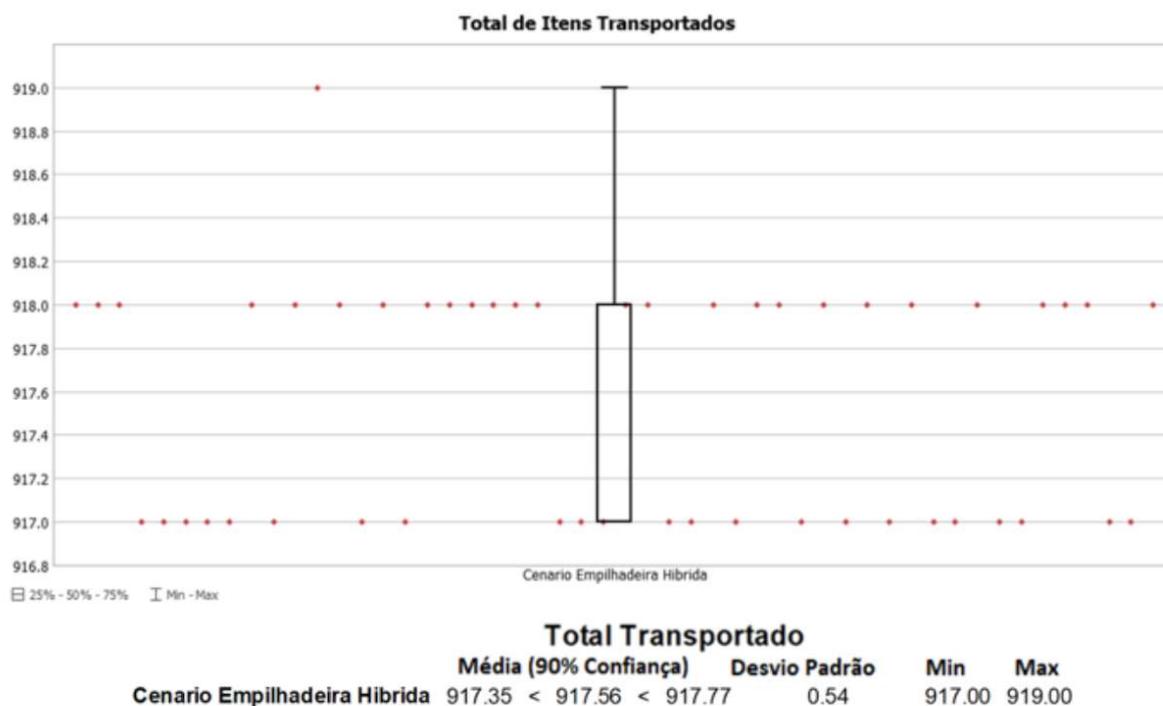


Figura 4.12- Resultado de 50 replicações do modelo observando o total de itens transportados pela empilhadeira híbrida

A possibilidade de detalhar os momentos exatos dos estados assumidos pelo equipamento através das equações dinâmicas de movimento, gera também o acesso a uma gama de indicadores presentes nos equipamentos que não poderiam ser calculados de forma confiável, pois se baseavam apenas em indicadores de médias ou estimativas.

Um exemplo típico de interesse da indústria logística é o consumo de combustível dos equipamentos, que é um componente presente e significativo na maioria das empresas deste ramo. Embora seja possível analisar de forma muito mais detalhada o consumo de combustível de um equipamento através da inserção de equações que levem em consideração variáveis como o modelo do motor da empilhadeira, qualidade do combustível utilizado, desgaste de componentes mecânicos da empilhadeira, qualidade do piso, características dos pneus, dentre

diversas outras variáveis possíveis, já se consegue obter uma previsão do consumo de combustível relacionado ao período em que a empilhadeira permanece acelerando, desacelerando ou em uma velocidade máxima.

A Figura 4.13 demonstra um ciclo de transporte, e explicita os momentos em que a empilhadeira está acelerando até atingir a velocidade máxima, os momentos em que a mesma permanece na velocidade máxima permitida e logo em seguida o momento em que se inicia a desaceleração até chegar ao repouso, possibilitando assim a assimilação de padrões de consumo de combustível a cada período demonstrado.

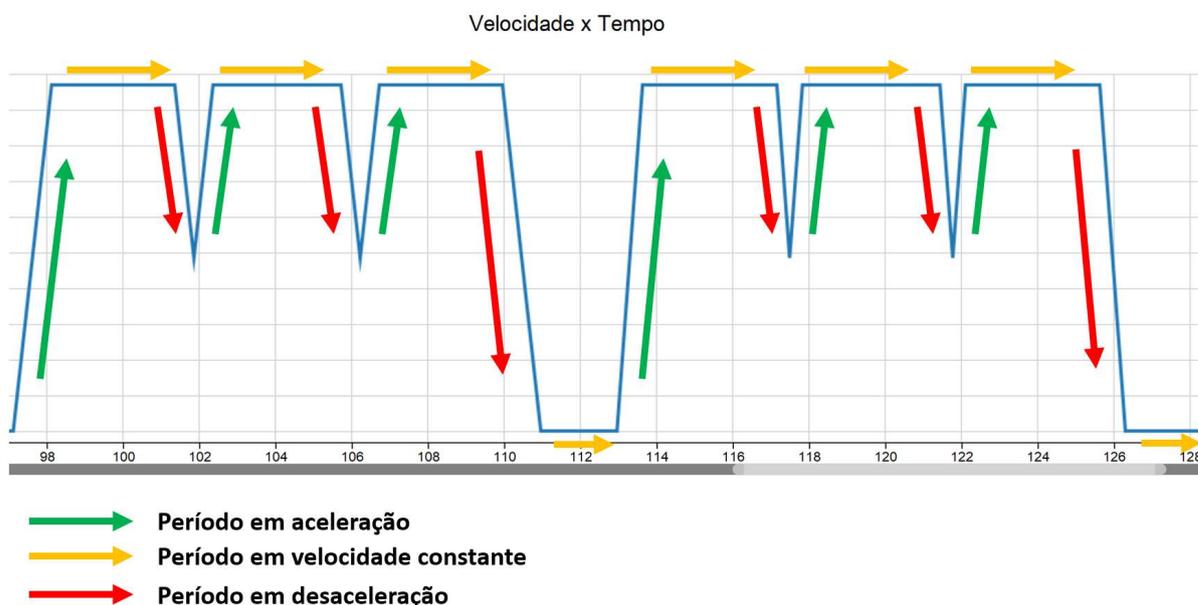


Figura 4.13 - Explicitação dos períodos em cada estado

Como o consumo de combustível é dependente do período de aceleração da empilhadeira, do qual por sua vez é dependente do modelo da empilhadeira e da carga transportada, é possível também verificar o consumo em relação a estas variáveis ao longo do período simulado.

4.4. COMPARAÇÃO DO MODELO DISCRETO COM O MODELO HÍBRIDO

Com o objetivo de comparar os diferentes métodos de modelagem descritos anteriormente, ambos serão testados em diferentes ambientes de simulação, verificando sempre o comportamento dos indicadores do modelo com seus devidos intervalos de confiança.

Como o primeiro cenário de comparação, abaixo encontra-se as situações já demonstradas nas sessões 4.2 e 4.3, onde ambas representam um ambiente com oferta infinita de entidades a serem transportadas. Porém, o primeiro modelo com uma empilhadeira com tempo de transporte constante e o segundo modelo com o tempo sendo calculado com base nas equações dinâmicas de movimento aplicadas em uma empilhadeira com características apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características empilhadeira (fonte: www.toyotaforklift.com)

Características	Descrição
Marca	Toyota
Modelo	8FGCU18
Capacidade de Carga (Kg)	1600
Velocidade Máxima (Km/h)	17.5
Barra de Tração (Kg)	1700
Peso Total (Kg)	2910
Torque Calculado (Nm) x 2100 RPM	160

Ambos apresentam resultados semelhantes, conforme demonstrado na Figura 4.14.

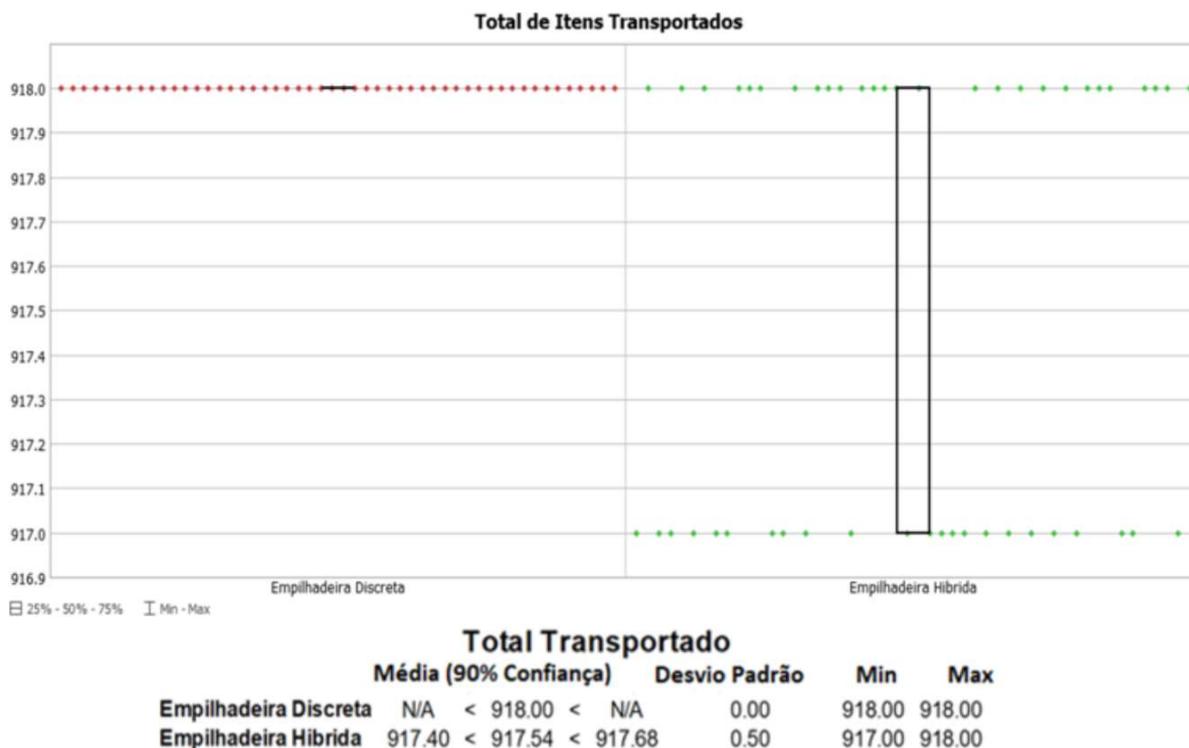


Figura 4.14 - Comparação entre Empilhadeira Discreta e Híbrida

Percebe-se que, mesmo com uma variabilidade pequena devido ao percurso ser relativamente longo, o que faz com que a empilhadeira ande na velocidade máxima permitida por um tempo muito maior que os períodos de aceleração e desaceleração.

4.4.1. COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DISCRETO E MODELO HÍBRIDO EM UMA SITUAÇÃO DE DEMANDA BALANCEADA

Neste cenário simulado, foi inserido no modelo de simulação uma curva de chegada exponencial com média 5% maior que o tempo de ciclo calculado da empilhadeira discreta e apresentado no tópico 4.2 (Eq. 4.24). O objetivo de análise está relacionado a como cada modelo se comporta diante de uma variação natural na demanda de peças transportadas em um ambiente balanceado, ou seja, onde o número de empilhadeiras foi calculado através de uma análise determinística do intervalo médio entre as chegadas, e desta forma identificar se existe alguma vantagem ou desvantagem em utilizar cada método de modelagem.

Observa-se através da Figura 4.15 e Figura 4.16 que o comportamento do número de entidades aguardando para serem transportadas no buffer ao longo de

uma replicação é semelhante entre os modelos de empilhadeira discreta e híbrida, variando apenas em alguns momentos em até duas entidades.

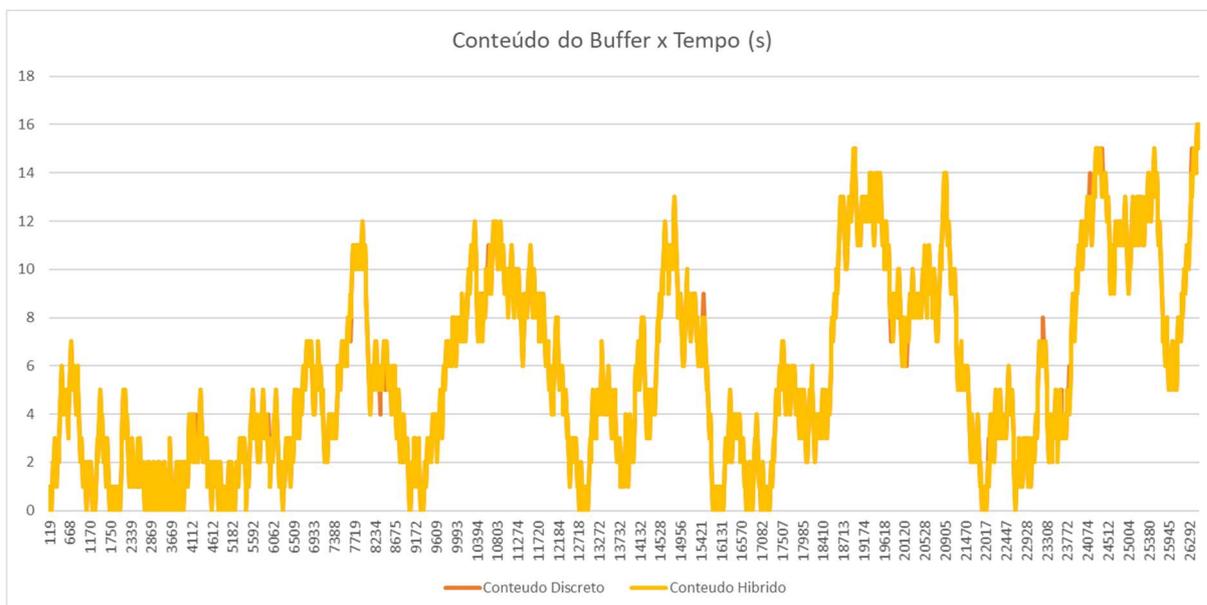


Figura 4.15 - Conteúdo do Buffer em um cenário com demanda balanceada

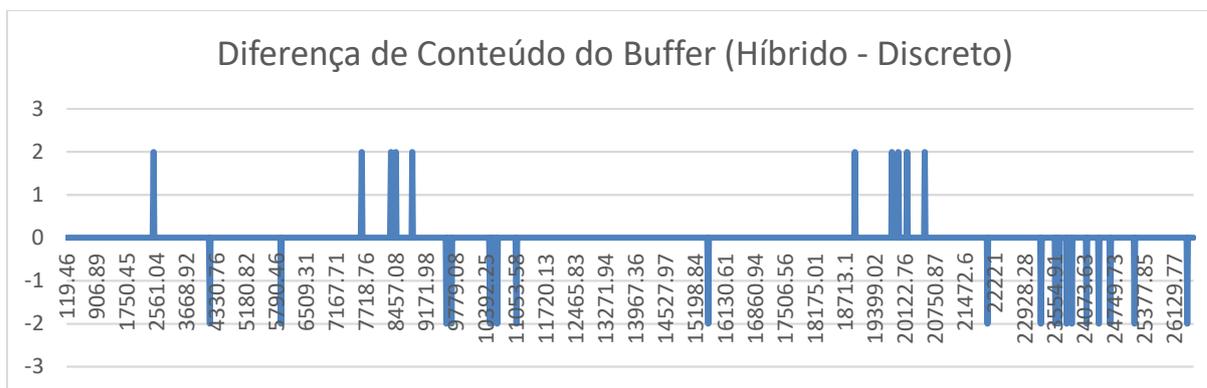


Figura 4.16 - Diferença do conteúdo do Buffer (Modelo Híbrido - Modelo Discreto) em um cenário com demanda balanceada

A variabilidade apresentada na Figura 4.16 apresenta um desvio pequeno quando comparado com a quantidade total de itens transportados (cerca de 0.2%) e tal diferença não oferece impacto significativo em um âmbito geral, pois confirma-se através da Figura 4.17 que, em um intervalo de confiança de 99%, os cenários comparados não apresentam diferenças no total de peças transportadas.

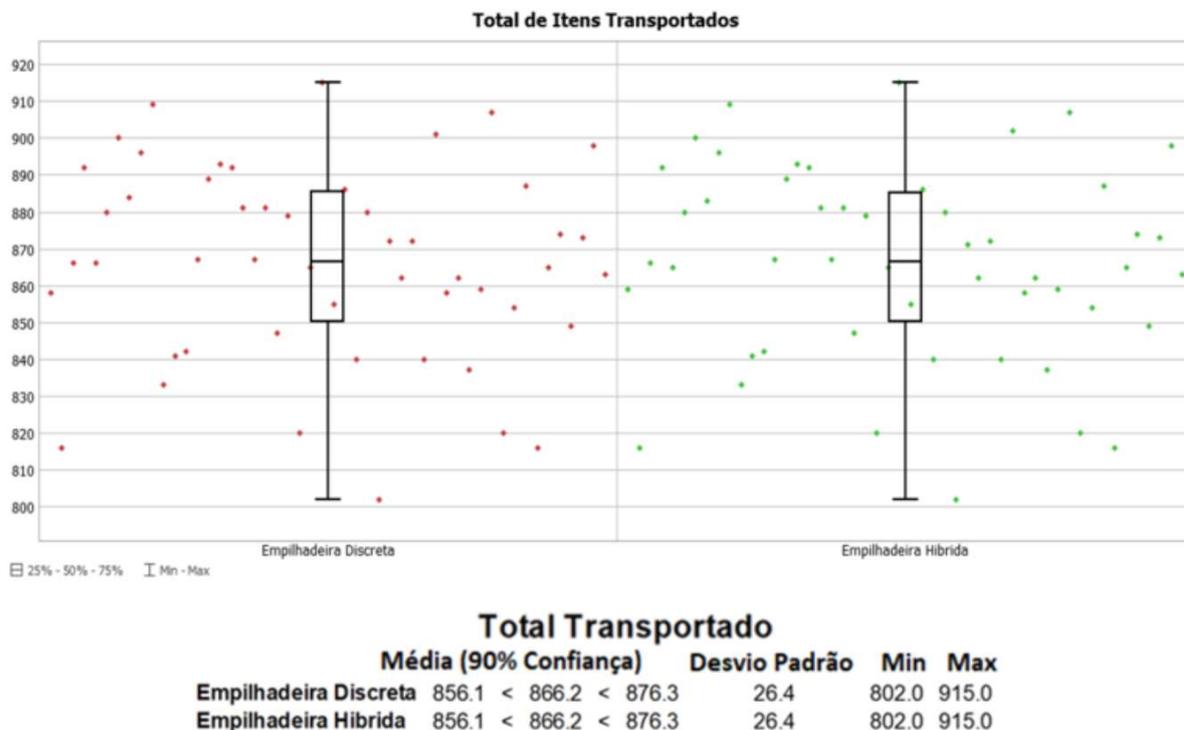


Figura 4.17 - Comparação do total transportado em um cenário balanceado

Observa-se também através da Figura 4.18 que a utilização dos equipamentos é semelhante em uma replicação de cada modelo de empilhadeira.

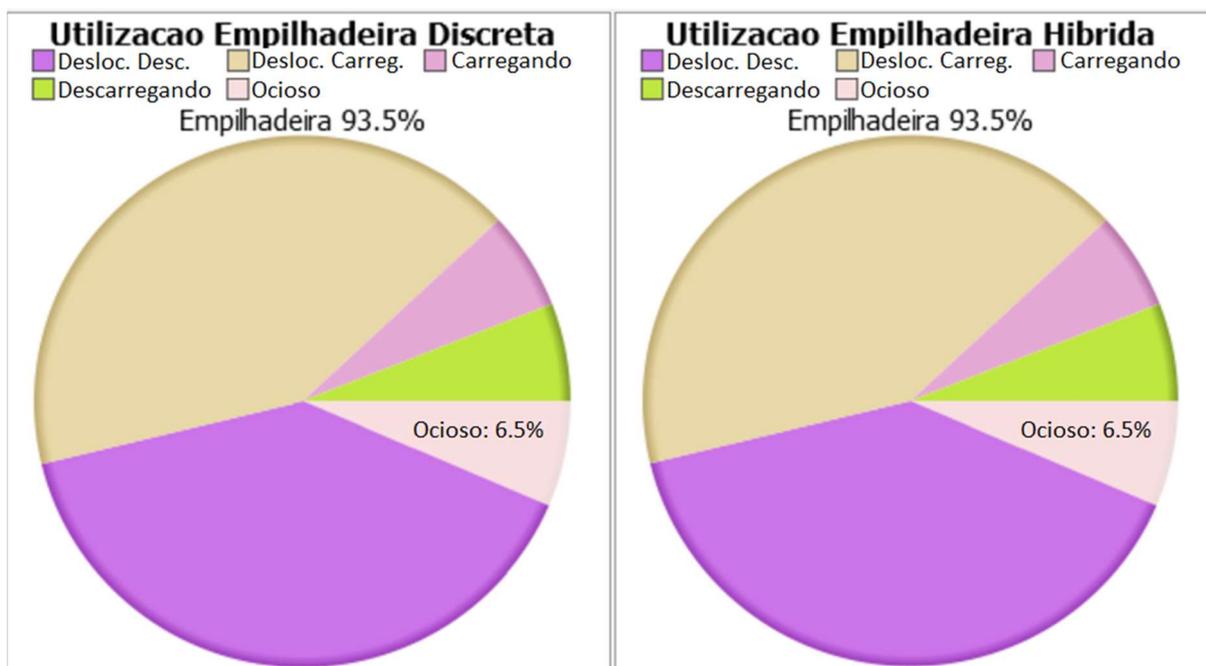


Figura 4.18 - Comparação da utilização das empilhadeiras em uma replicação de um cenário balanceado

4.4.2. COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DISCRETO E MODELO HÍBRIDO EM UMA SITUAÇÃO DE BAIXA DEMANDA

No cenário atual, o intervalo entre a chegada de itens foi aumentado, com o objetivo de identificar o comportamento de ambas empilhadeiras diante de um perfil de baixa demanda de transporte e, conforme esperado, observa-se através da Figura 4.19 que o número de peças transportadas foi exatamente igual, pois a ociosidade oculta as diferenças entre os modelos.

Total de Itens Transportados						
	Média (90% Confiança)			Desvio Padrão	Min	Max
Empilhadeira Discreta	712.4	< 719.0	< 725.7	27.9	653.0	794.0
Empilhadeira Híbrida	712.4	< 719.1	< 725.7	27.9	653.0	794.0

Utilização Empilhadeira - Empilhadeira						
	Média (90% Confiança)			Desvio Padrão	Min	Max
Empilhadeira Discreta	77.62	< 78.34	< 79.07	3.04	71.09	86.52
Empilhadeira Híbrida	77.63	< 78.35	< 79.08	3.04	71.10	86.54

Figura 4.19 - Comparação entre Total de Itens Transportados e Utilização das Empilhadeiras em um cenário de baixa demanda

Analogamente, a Figura 4.19 demonstra também que a utilização das empilhadeiras, embora tenham uma pequena variação entre elas, não se pode afirmar que sejam diferentes devido ao intervalo de confiança estarem muito próximos.

Pode-se então afirmar que, devido a diferença do tempo de ciclo entre as empilhadeiras ser bastante sutil, em um cenário com baixa demanda as diferenças são totalmente compensadas nos períodos em que as empilhadeiras ficam ociosas, pois a empilhadeira mais veloz executa a tarefa de forma mais rápida, chegando ao seu destino antes da segunda, porém, o tempo de espera pela chegada de uma nova entidade permite que a segunda empilhadeira também chegue ao destino e permaneça aguardando, gerando um impacto leve apenas na utilização de ambas, mas nulo para o total de itens transportados.

4.4.3. COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DISCRETO E MODELO HÍBRIDO ALTERANDO O PERFIL DE PEÇAS TRANSPORTADAS COM DEMANDA INFINITA

Neste cenário será medido a variação existente nos indicadores do modelo em uma situação onde a curva de demanda de peças a serem transportadas é alterada, simulando a realidade de empresas que sofrem, por exemplo, com a sazonalidade de pedidos de seus clientes ao longo de um período, o que pode gerar altos impactos no dimensionamento de recursos ou análises diversas.

Um exemplo clássico desta situação é uma empresa dedicada à produção de chocolate, que no final do ano possui a necessidade de produzir panetones para o Natal, tendo assim uma mudança drástica na densidade das cargas transportadas pelos recursos tanto dentro da planta, quanto nos caminhões de entregas da sua própria frota (que por sua vez também sofrem com os impactos da mudança de perfil).

No cenário atual, conforme mencionado na descrição do modelo e apresentado novamente abaixo na Tabela 4.5, o perfil da carga transportada do ponto de início até o ponto final do modelo de simulação passará do perfil 2 para o perfil 1, onde 80% das entidades transportadas possuem massa igual a 1500 Kg e o restante igual a 500 Kg, diferente do cenário com perfil 2, onde este percentual é invertido.

Tabela 4.5 - Tabela de perfis de cargas transportadas

	Perfil 1 (%)	Perfil 2 (%)	Massa (Kg)
Carga Tipo 1	20	80	500
Carga Tipo 2	80	20	1500

Conforme esperado, diante da inflexibilidade da empilhadeira discreta em se adaptar ao ambiente, observa-se através da Figura 4.20 que o número de entidades transportadas se manteve estável, conforme apresentado no tópico 4.2, já a empilhadeira de modelo híbrido apresentou uma queda de aproximadamente 2% neste mesmo indicador devido ao fato de a mesma se adequar ao meio onde se

encontra, ou seja, levando em consideração a potência, massa da entidade, torque do motor, atrito dos pneus, dentre outros fatores, o modelo híbrido da empilhadeira teve uma curva de aceleração/desaceleração diferente do caso anterior, onde 80% das entidades eram mais leves e permitiam o atingimento da velocidade máxima de forma mais rápida.

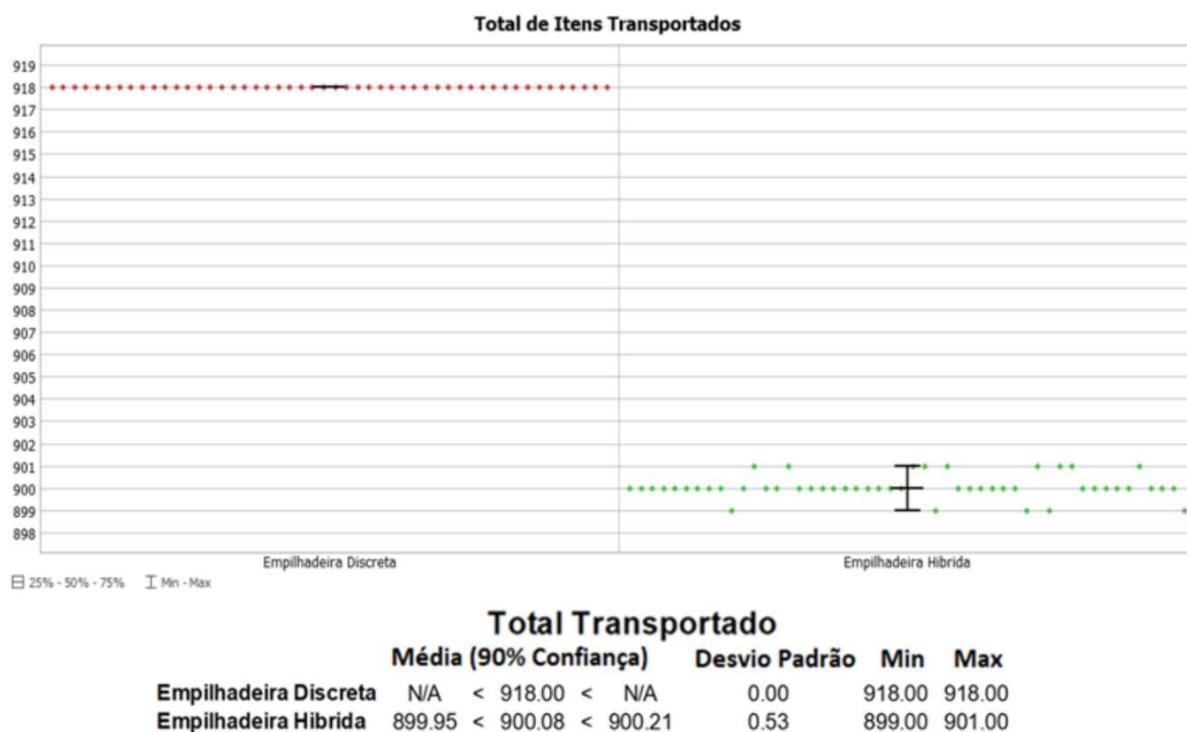


Figura 4.20 - Comparação do total transportado em um cenário com diferentes perfis de demanda

Na atual situação, devido a oferta infinita de entidades, ambas empilhadeiras obtiveram 100% de utilização, já que sempre que completavam um ciclo, uma nova entidade já estava disponível para ser transportada.

4.4.4. COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DISCRETO E MODELO HÍBRIDO ALTERANDO O PERFIL DE PEÇAS TRANSPORTADAS COM DEMANDA BALANCEADA

Da mesma forma que o cenário demonstrado no tópico 4.4.1, onde o objetivo da alteração das variáveis foi verificar se a mudança da empilhadeira gera

impacto significativo nos indicadores do modelo, esta etapa consiste em verificar se a “pequena” ociosidade apresentada no cenário 4.4.1 (Figura 4.18) é mantida e se a mesma é suficiente para absorver a variação de 2% no total de itens transportados, conforme afirmado no tópico 4.4.3, já que neste cenário também foi feita a alteração na demanda de peças, passando do perfil 2 para o perfil 1 (Tabela 4.5 - Tabela de perfis de cargas transportadas).

Nota-se através da Figura 4.21 que, diferente do cenário apresentado no tópico 4.4.1, onde o perfil de peças foi mantido, alterando apenas a curva de chegada de peças a serem transportadas para comparação entre as duas empilhadeiras e ambas tiveram resultados semelhantes, neste caso, os resultados apresentaram uma diferença razoável, o que não torna tão óbvio a afirmação da igualdade dos cenários.

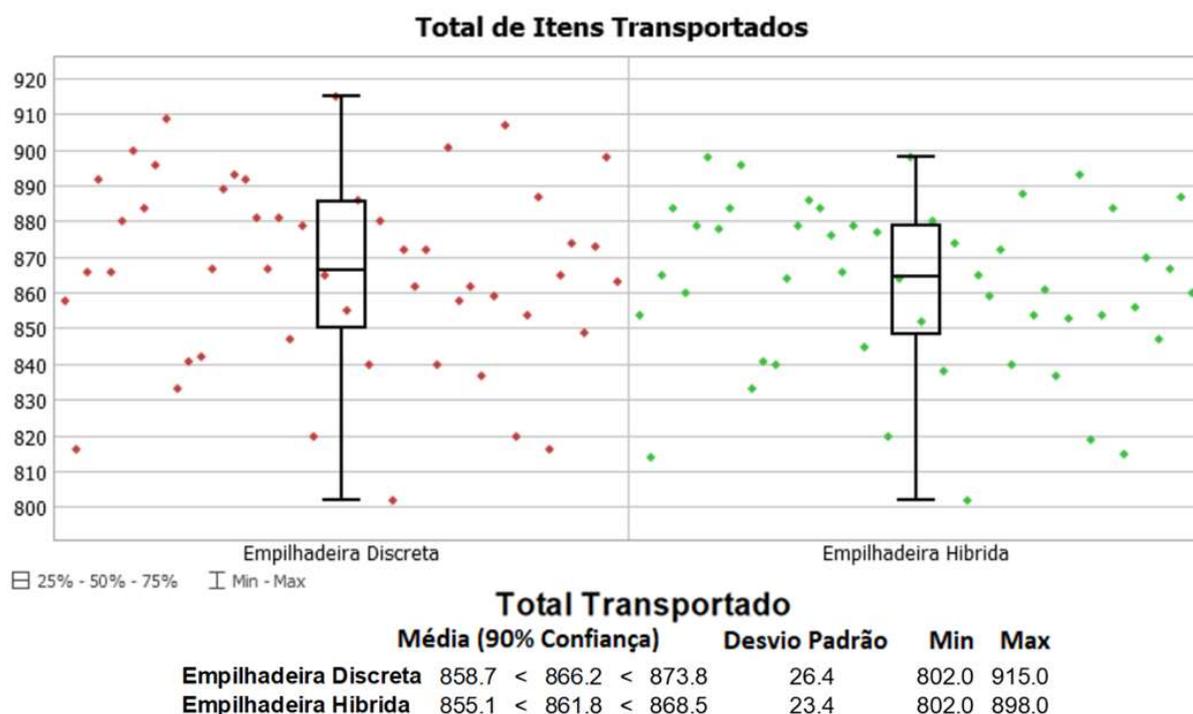


Figura 4.21 - Comparação do total transportado em um cenário com diferentes perfis de demanda com chegada balanceada

Para comparação entre os dois cenários, os dados resultantes de cada replicação do modelo simulado (apresentados na Tabela 4.6) foram coletados e inseridos no programa Minitab, onde a comparação entre os dados foi feita utilizando o teste T de duas amostras para identificação das diferenças reais entre os modelos.

Tabela 4.6 - Total de peças transportadas referentes a dois cenários de diferentes Perfis de demanda e tipos de empilhadeiras

Empilhadeira discreta					Empilhadeira híbrida				
858	833	847	872	820	854	833	845	865	819
816	841	879	862	854	814	841	877	859	854
866	842	820	872	887	865	840	820	872	884
892	867	865	840	816	884	864	864	840	815
866	889	915	901	865	860	879	898	888	856
880	893	855	858	874	879	886	852	854	870
900	892	886	862	849	898	884	880	861	847
884	881	840	837	873	878	876	838	837	867
896	867	880	859	898	884	866	874	853	887
909	881	802	907	863	896	879	802	893	860

Sabe-se que para utilização do teste T de duas amostras os seguintes tópicos:

- As duas amostras devem ter distribuição normal;
- As duas amostras devem ter a mesma variância;
- As duas amostras devem ser independentes.

Ambos cenários simulados foram aceitos no primeiro item (“As duas amostras devem ter distribuição normal”) através da utilização do teste de normalidade utilizando o método Anderson-Darling com P-values respectivos de 0.51 e 0.11 para os cenários com empilhadeira Discreta e Híbrida, conforme demonstrado na Figura 4.22.

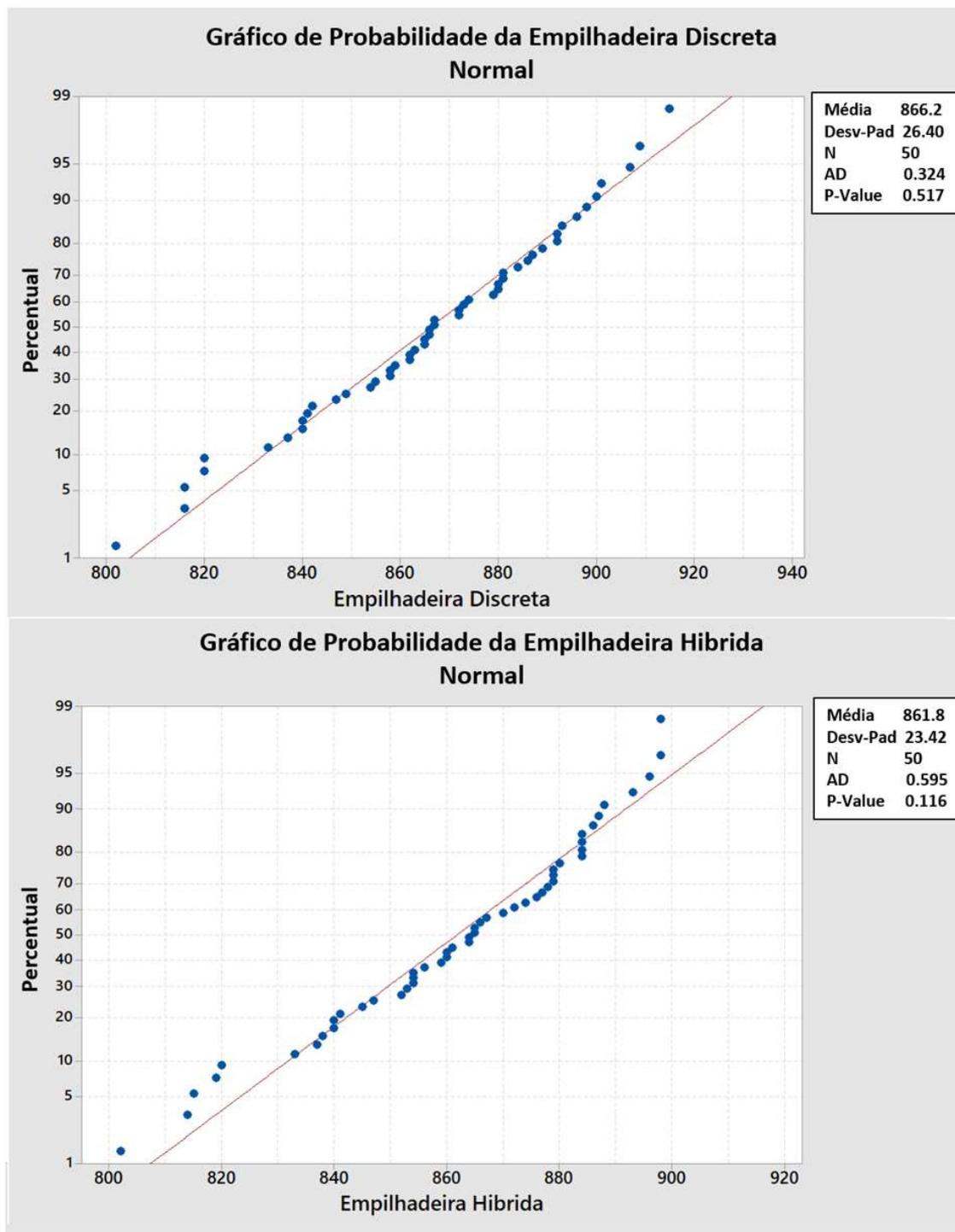


Figura 4.22 - Teste de Normalidade para os cenários com Perfis de chegada diferentes (Software Minitab)

Já para o segundo item (“As duas amostras devem ter a mesma variância”), foi utilizado o método conhecido como ANOVA, do qual tem exatamente o objetivo de analisar diferentes amostra comparando suas variâncias, e conforme demonstrado na

Figura 4.23, com intervalo de confiança de 95% as variâncias são iguais, pois com P-value de 0.388 a hipótese nula de que ambas amostras são igual é aceita.

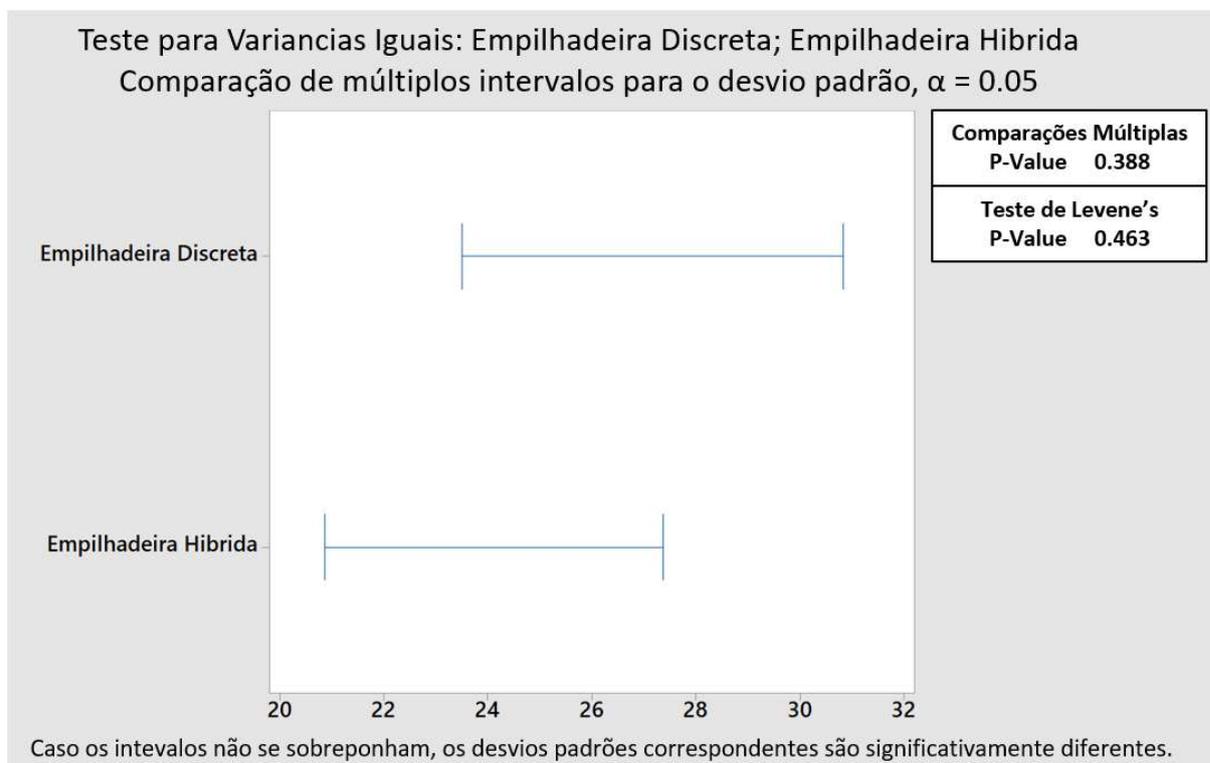


Figura 4.23 - Teste de variância entre os cenários com Perfis de chegada diferentes e demanda balanceada

Já o terceiro item (“As duas amostras devem ser independentes”), se confirma pela própria natureza de criação do modelo, já que os cenários simulados foram criados de forma a não permitir dependências entre ambos.

Através da utilização do teste T de duas amostras, pode-se dizer que os resultados dos cenários simulados, apresentados na Figura 4.24, para um cenário com 50 replicações apresenta um P-value de 0.38, aceitando assim a hipótese nula que diz que ambas amostras são iguais.

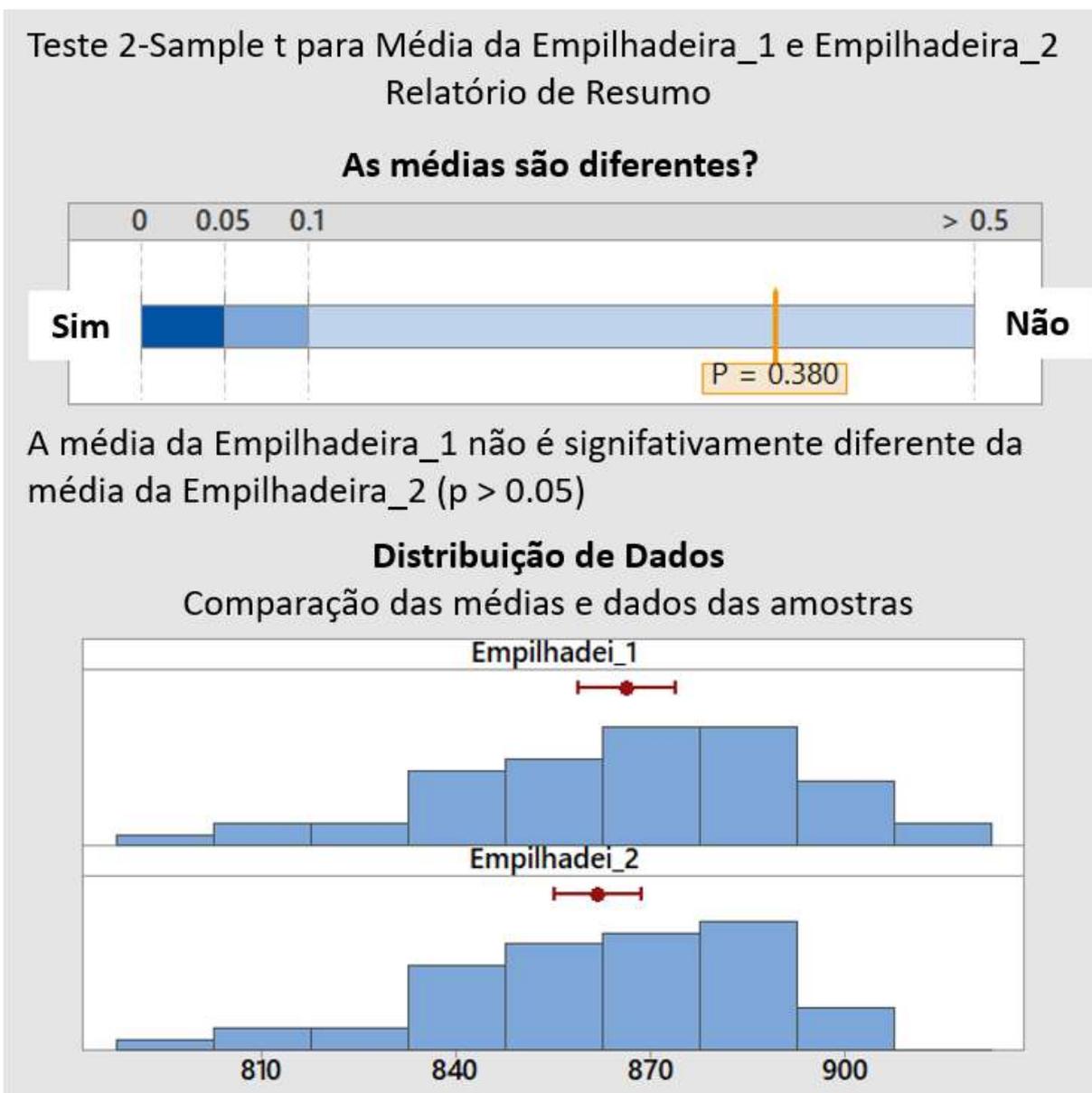


Figura 4.24 - Resultado teste de hipóteses 2 Sample t para diferentes Perfis de demandas com chegada balanceada

Desta forma, conforme mencionado no tópico 4.4.2, a ociosidade existente em momentos eventuais no ciclo de trabalho de cada empilhadeira é a mais provável causa da redução no volume médio de peças transportadas em cada cenário, pois os períodos de ociosidade existentes entre os ciclos permitem a redução da vantagem da empilhadeira mais rápida no transporte dos itens.

4.4.5. ANÁLISE DO MODELO DISCRETO E HÍBRIDO CORRELACIONANDO A OCIOSIDADE COM O TOTAL DE PEÇAS TRANSPORTADAS

Com o objetivo de analisar e eventualmente comprovar as afirmações feitas nos tópicos 4.4.1 e 4.4.2 de que a ociosidade das empilhadeiras em cada perfil de demanda (demanda infinita e balanceada) é a mais provável causa da redução da diferença do total de peças transportadas, este tópico tem como objetivo variar gradativamente o perfil de demanda e desta forma correlacionar o aumento da ociosidade através da redução gradual da frequência de chegada de itens com o total de peças transportadas, visando assim identificar se realmente a ociosidade gera o impacto afirmado.

Para melhor observar a variação da ociosidade e diferença do total de peças transportadas, a seguinte sequência de médias de intervalos entre chegadas de peças foi utilizada em uma distribuição exponencial: 25, 27, 29, 30, 30.5, 31, 31.5, 32, 32.5, 33, 33.5, 34, 35, 36, 37 e 38.

Conforme esperado, quanto maior o intervalo entre as chegadas, menor o número de itens transportados e maior a ociosidade das empilhadeiras, conforme demonstrado respectivamente na Figura 4.25 e Figura 4.26, onde cada ponto colorido representa o resultado (em número de itens transportados) de cada replicação dos cenários citados acima, formando assim os respectivos *box-plots* que representam os quartis e média dos mesmos que seguem de forma decrescente conforme o intervalo médio entre as chegadas dos itens a serem transportados aumentam de 25 até 38 segundos.

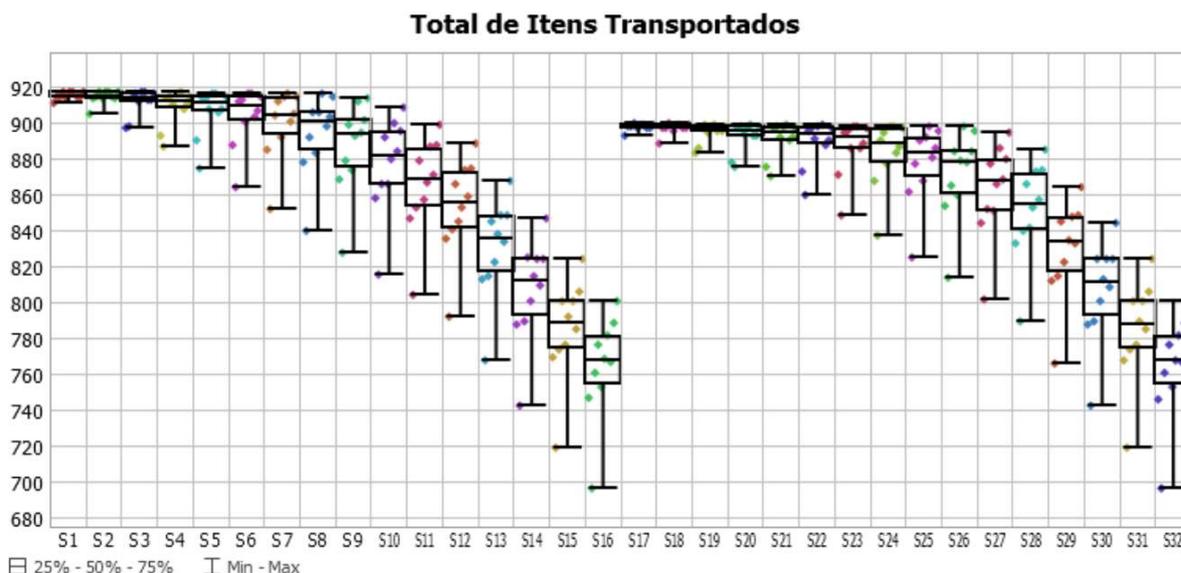


Figura 4.25 - Total de Itens Transportados por cada tipo de Empilhadeira

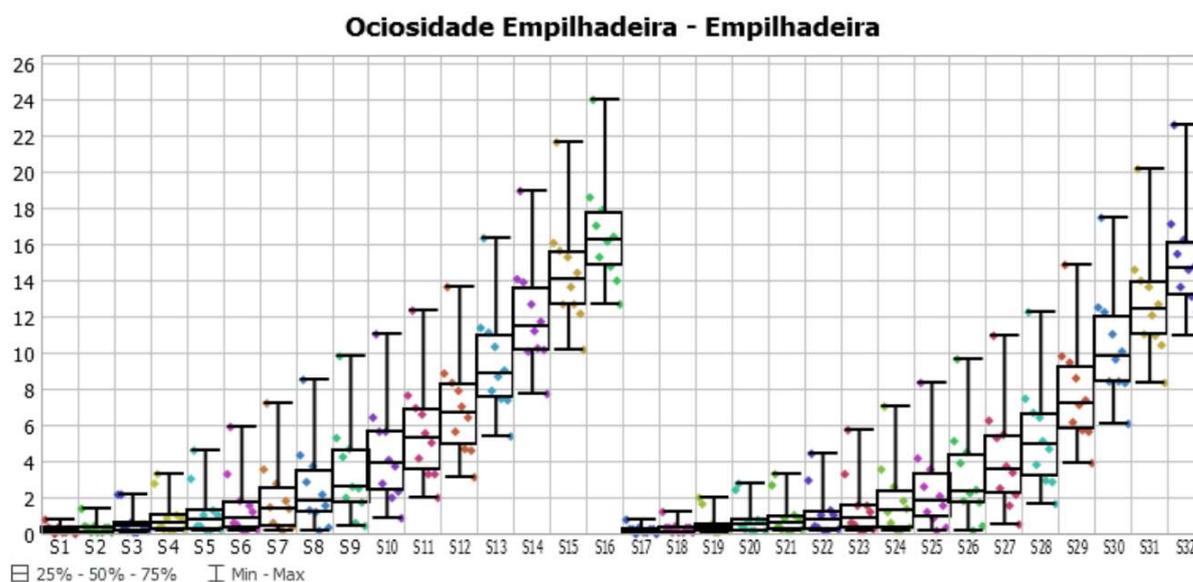


Figura 4.26 - Ociosidade em cada tipo de Empilhadeira

Percebe-se que ambos os gráficos (Fig. 31 e 32) são respectivamente crescentes e decrescentes, e caso seja feito o cálculo da diferença de peças transportadas em relação ao crescimento da ociosidade em cada cenário, tem-se que quanto maior a ociosidade, menor a diferença entre o total de peças transportadas, comprovando a afirmação dos tópicos 4.4.1 e 4.4.2 (dos quais apresentaram resultados pouco diferentes devido ao aumento da ociosidade das empilhadeiras) através da Figura 4.27.

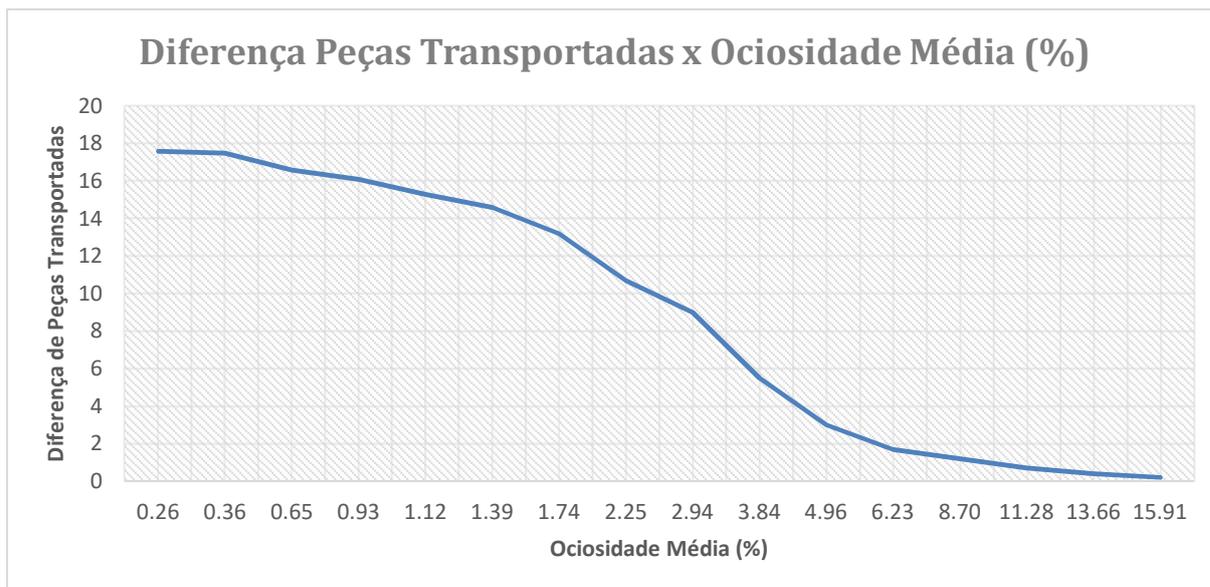


Figura 4.27 - Relação entre Número de Peças Transportadas e Ociosidade Médias das Empilhadeiras

Assim, a ociosidade é um fator que permite a redução da diferença do total de itens transportados, ocultando a diferença na utilização dos dois diferentes tipos de empilhadeiras apresentadas neste trabalho, a partir deste tópico será utilizado para análise dos cenários uma demanda infinita de peças a serem transportadas.

4.4.6. COMPARAÇÃO ENTRE MODELO DISCRETO E MODELO HÍBRIDO EM UM LAYOUT COMPACTADO

Neste cenário o layout da planta foi alterado e o trajeto de deslocamento da empilhadeira foi reduzido. Tal prática é bastante comum e normalmente muito eficiente em projetos de análise de capacidade e otimização da movimentação, objetivando a redução do gargalo através da minimização da distância percorrida. Normalmente se parte de um modelo previamente criado e validado através de dados coletados em uma operação ativa, e a análise no simulador é feita a partir apenas da alteração do layout da planta. Um exemplo desta aplicação pode ser a otimização da área de descarga de um caminhão, cujo objetivo é a redução do Tempo Médio de Permanência (TMP) do caminhão que está sendo descarregado.

Neste novo layout a empilhadeira se deslocará em uma distância de 16 metros com um ponto de redução de velocidade, conforme Figura 4.28, visando executar a “descarga do caminhão” de forma mais rápida.

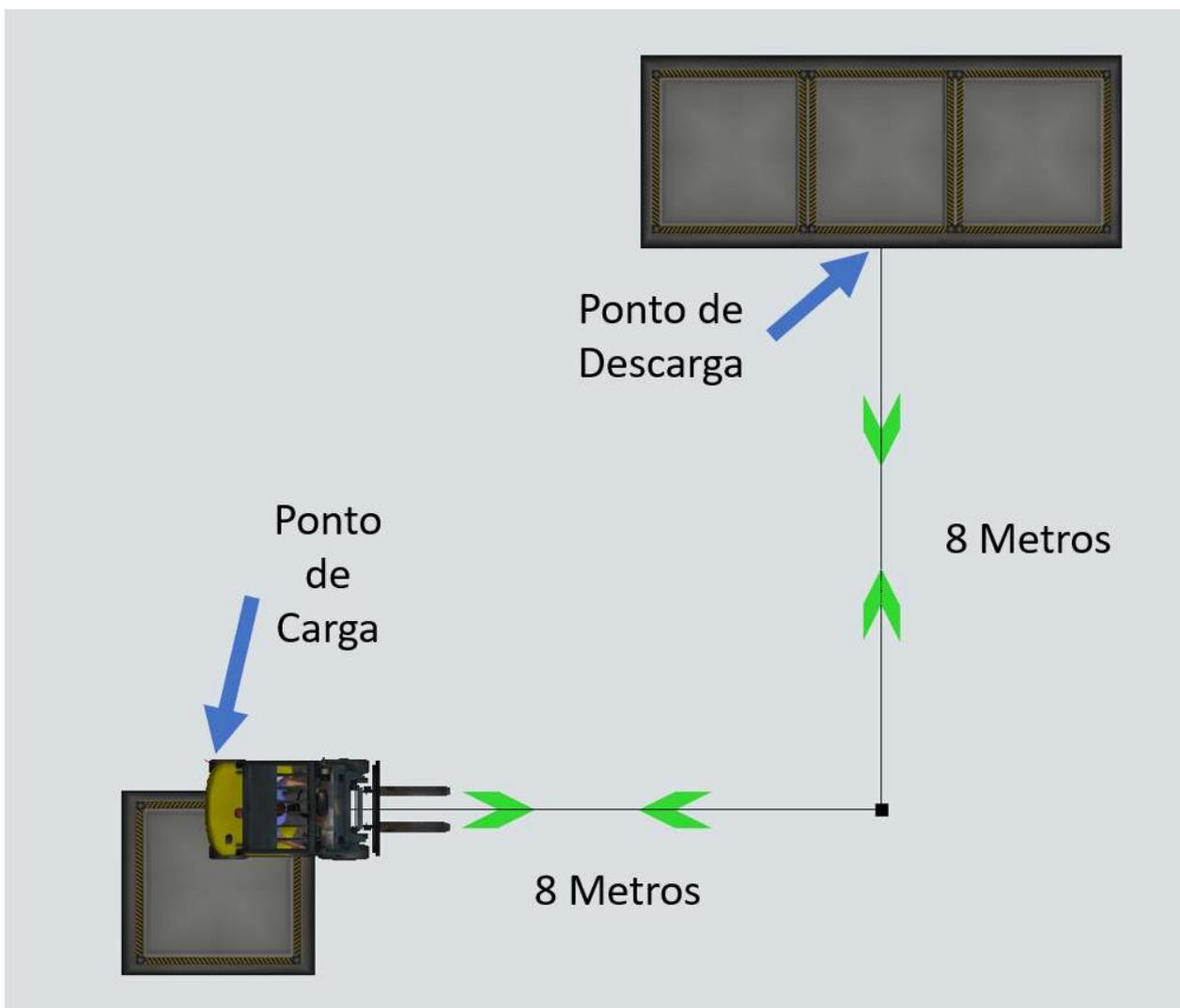


Figura 4.28 - Layout com distâncias reduzidas

Conforme citado anteriormente, foram simulados dois cenários com o mesmo perfil de carga (perfil 1, conforme Tabela 4.5) e demanda infinita, alterando apenas o modelo da empilhadeira de discreta para híbrida. Os resultados obtidos através de 50 replicações de cada cenário estão presentes na Figura 4.29, onde percebe-se com um intervalo de confiança de 95% que a empilhadeira híbrida transporta cerca de 2157 entidades, enquanto a empilhadeira discreta transporta um

total de 2548, ou seja, uma diferença de aproximadamente 15% em um modelo simples, composto apenas por uma empilhadeira, um ponto de carga e um de descarga.

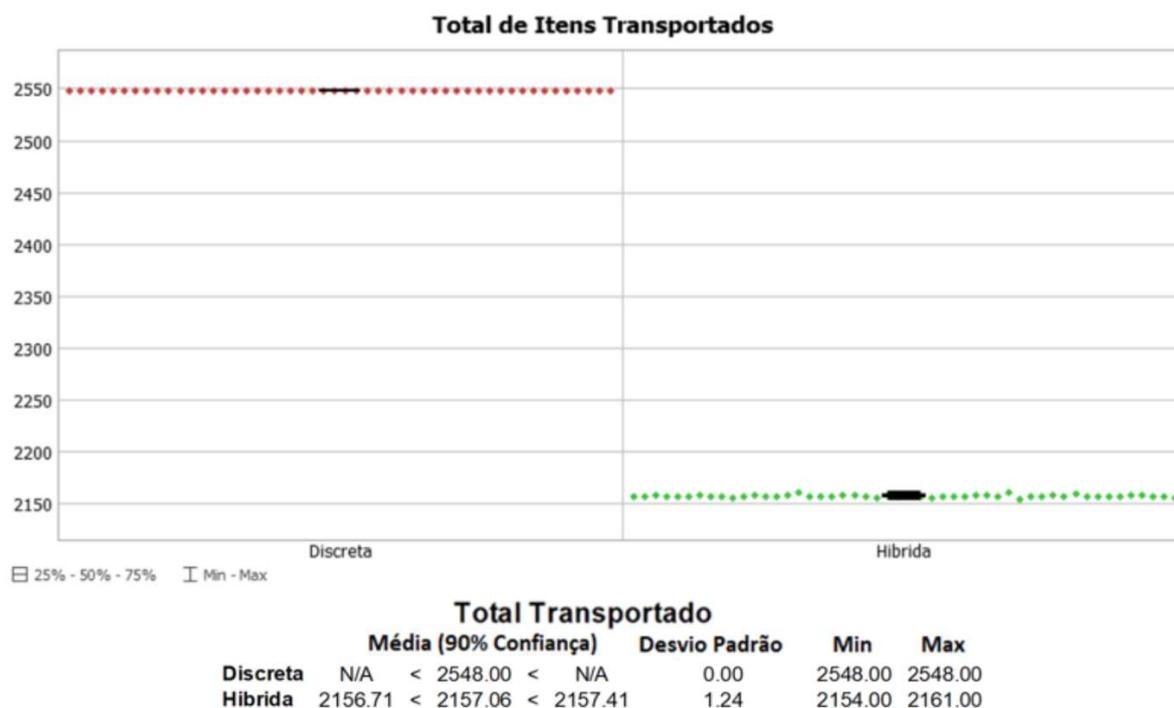


Figura 4.29 - Comparação do total transportado entre empilhadeiras em um cenário com distâncias reduzidas

Tal diferença se deve principalmente à constante necessidade de redução e aceleração da empilhadeira devido à proximidade dos pontos de curva ou corredor presentes no layout de operação, deixando a empilhadeira com menos tempo em sua velocidade máxima, conforme observado na Figura 4.30, onde a empilhadeira no layout antigo (distância de 20 metros entre os pontos de desaceleração) permanece 68% do seu tempo na velocidade máxima definida, enquanto no novo layout (distância de 8 metros entre pontos de desaceleração) a empilhadeira permanece apenas 29%, ou seja, fica o restante do tempo acelerando e desacelerando.

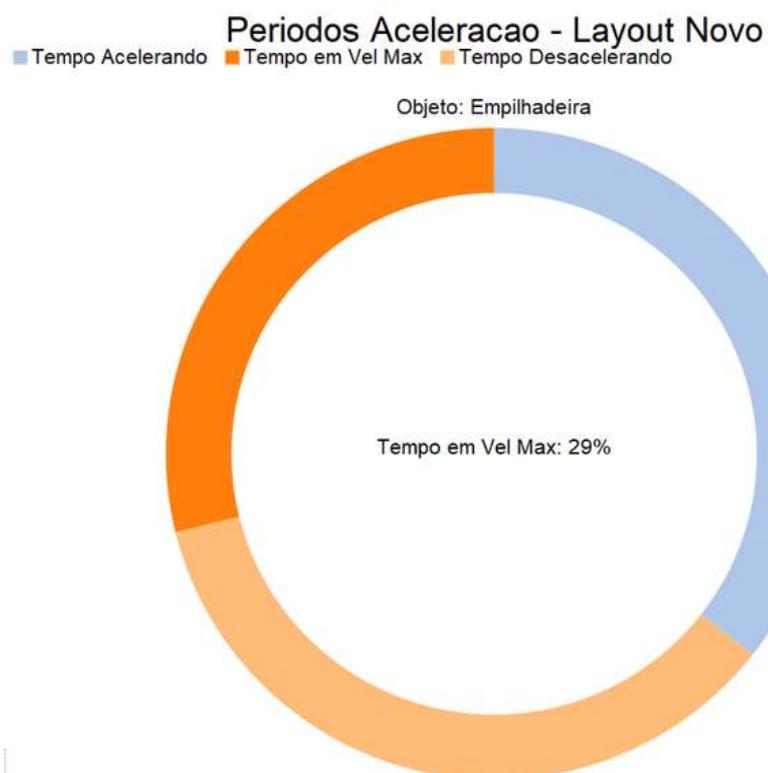
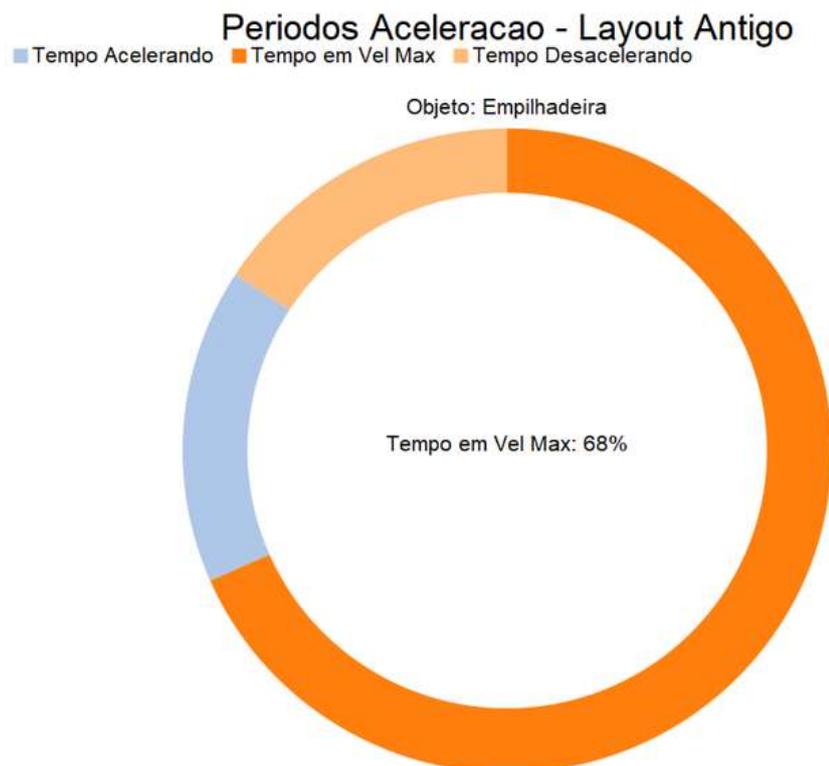


Figura 4.30 - Comparação entre períodos de aceleração da empilhadeira em diferentes layouts

Com o objetivo de verificar a correlação entre a diferença no total de peças transportadas pelas empilhadeiras e a distância percorrida pelas mesmas, foi elaborado um modelo de simulação do qual aumenta gradativamente a distância do trajeto da empilhadeira em 1 metro por cenário, até chegar aos 20 metros apresentados no layout original apresentado. O resultado é observado através da Figura 4.31, da qual demonstra uma diferença no total de itens transportados de até 16% com a alteração da distância percorrida entre os pontos de redução de velocidade por cada empilhadeira.

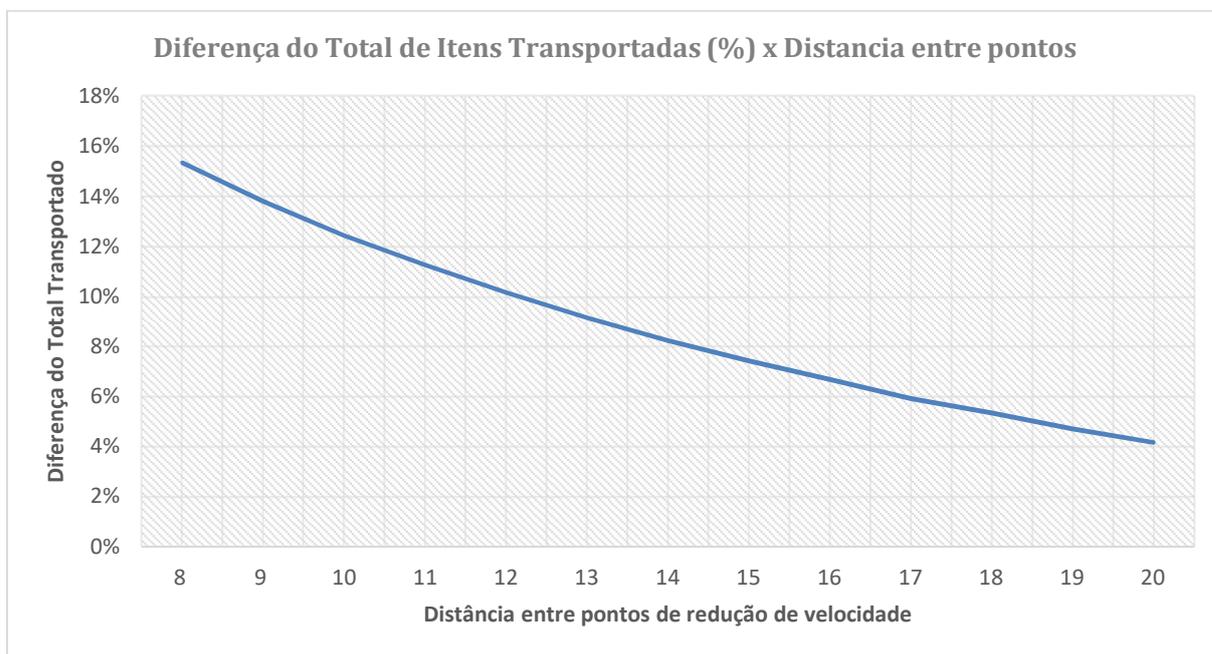


Figura 4.31 - Diferença peças transportadas x Distância entre pontos

4.4.7. SUMÁRIO DOS CENÁRIOS SIMULADOS

Baseado nos resultados apresentados neste capítulo, conclui-se que um dos principais fatores que impactam na diferenciação da capacidade de transporte entre a empilhadeira híbrida e discreta é a distância percorrida entre os pontos de aceleração e desaceleração do cenário simulado, tal diferença se deve exatamente a metodologia de cálculo utilizada para definição do tempo em que a empilhadeira permanece acelerando, desacelerando e em velocidade constante, já que o caso da empilhadeira discreta estes valores se mantêm estabilizados independente do cenário, já com a empilhadeira híbrida os valores se alteram de forma dinâmica, reduzindo assim a capacidade de transporte da empilhadeira em um ambiente com diversos pontos de redução de velocidade.

Além da distância entre os pontos de carga/descarga, outro fator que impactou na diferença de resultado entre as empilhadeiras é a alteração no perfil de carga transportada, já que no caso da empilhadeira discreta essa diferenciação não existe devido ao fato da empilhadeira não considerar estes fatores no momento do cálculo, diferente da empilhadeira híbrida que considera um número maior de variáveis relacionadas ao ambiente simulado, dentre elas a massa da carga transportada. Por outro lado, se tratando apenas do indicador de número de itens transportados, em todos os cenários que a demanda por transporte foi reduzida, este indicador se estabilizou entre as empilhadeiras utilizadas, não apresentando diferença em relação a utilização de uma ou outra, sendo a explicação para isso exatamente a sobre capacidade dos recursos de transporte do qual permite que a janela de ociosidade absorva a vantagem/desvantagem de cada modelo de empilhadeira testado.

5. CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo identificar o impacto e viabilidade do uso de um modelo de simulação mais detalhado através da inclusão de equações dinâmicas em momentos discretos ao invés da utilização de valores médios ou curvas estatísticas, observando assim em quais cenários aplicáveis ao modelo simulado o esforço de desenvolvimento se mostra válido.

A atual necessidade foi observada em modelos discretos de alta complexidade onde os cenários futuros gerados a partir de um modelo de simulação base apresentavam resultados questionáveis do ponto de vista operacional, principalmente pelo fato de variáveis chaves de entrada do modelo computacional terem seu estado alterado devido às modificações feitas nos cenários futuros, pois independente das mesmas serem um valor determinístico ou estocástico, elas não possuem a capacidade de se adequar a alterações do ambiente, exigindo assim a necessidade de uma nova coleta/análise dos dados, o que muitas vezes sequer é possível devido a inexistência ou inviabilidade de geração do cenário futuro.

Para tal análise, foi desenvolvido um modelo simplificado e com número de variáveis reduzido em relação a um sistema real, pois desta forma foi possível isolar as variáveis de interesse para medir o seu impacto nos indicadores finais de forma mais precisa. Com apenas um ponto de carga, um de descarga e uma empilhadeira, além do conceito de empilhadeira híbrida aplicado em uma empilhadeira discreta, as únicas variáveis alteradas foram: o perfil da carga transportada, a distância percorrida pela empilhadeira, o número de pontos de frenagem no trajeto devido ao layout da planta e o tempo entre chegadas das entidades transportadas. Devido a simplificação do modelo construído, a validação do mesmo se apresenta de forma conceitual a partir das equações desenvolvidas de forma estática, e da mesma forma, os impactos nos indicadores finais provenientes da alteração do ambiente se apresentaram coerentes com o esperado, fazendo do modelo simplificado uma base sólida para o desenvolvimento de ambientes mais complexos.

A partir dos cenários simulados, concluiu-se que a utilização da empilhadeira híbrida apresenta resultados significativamente diferentes principalmente nos cenários onde o trajeto percorrido pela mesma gera a necessidade de paradas ou redução de velocidade frequentes, pois neste caso o período em aceleração e desaceleração aumenta devido a maior dependência da carga

transportada e potência da empilhadeira, apresentando diferença de até 15% no total de entidades transportadas por hora. Por outro lado, de acordo com os resultados obtidos a partir dos cenários simulados, nem sempre o esforço da modelagem de uma empilhadeira híbrida se faz necessário, pois onde a empilhadeira precisa percorrer um trajeto longo sem precisar reduzir a velocidade ou que tenha um período de ociosidade considerável, a diferença entre os indicadores analisados não foi significativa, pois no cenário que a empilhadeira permaneceu por um longo período na velocidade média ajustada a partir do modelo base, os períodos em aceleração e desaceleração foram curtos quando comparados com o período trabalhado, e os mesmos são os mais impactados com a mudança de cenário, e no caso com alta ociosidade, foi identificado que o período em que a empilhadeira se encontra parada em seu destino é suficiente para absorver o ganho/perda obtido por cada modelo de empilhadeira, fazendo assim com que o número de entidades transportadas seja igual, alterando apenas as variáveis de utilização do recurso empilhadeira.

Embora o modelo utilizado seja relativamente simples quando comparado com um sistema real, mesmo assim o mesmo apresentou uma diferença bastante significativa, podendo gerar um impacto alto do ponto de vista financeiro e operacional em uma empresa. Quando aplicado em maiores proporções o impacto possivelmente será mais alto, sendo impactado em função de outras variáveis que não foram consideradas nos cenários simulados, tais como desníveis do piso, variabilidade maior de cargas transportadas, diferentes modelos de equipamentos, número maior de empilhadeiras, layouts complexos e dinâmicos, dentre diversas outras variáveis que normalmente fazem parte de um modelo de simulação utilizado.

Desta forma, a principal contribuição deste trabalho para a literatura se deve à utilização da Simulação de Eventos Contínuos com o objetivo de aumentar o nível de precisão e adaptabilidade da Simulação de Eventos Discretos (SED), um método já consagrado na literatura atual e em crescente utilização, porém, com capacidade restrita de se adaptar ao ambiente quando construído pela metodologia convencional. Permitindo que o modelo resultante contenha a capacidade de interação entre os diversos eventos aleatórios e conjunto de objetos pertencentes a um modelo discreto de alta complexidade, e o detalhamento e capacidade de adaptação de um modelo dinâmico pertencente a capacidade individual de cada objeto.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

A partir da aplicação da simulação híbrida em um ambiente logístico simplificado, a primeira possibilidade de desenvolvimento futuro está relacionada ao detalhamento do modelo em um ambiente real considerando variáveis de maior complexibilidade, além da viabilidade de trabalhar com equações dinâmicas referentes a outros ambientes.

Em relação ao detalhamento do modelo em um ambiente real, nota-se que o sistema demonstrado no presente trabalho tem o objetivo principal de identificar os cenários onde a simulação híbrida se torna viável, porém, desconsidera variáveis como alteração frequente de demanda, dinamismo na alocação de posições de armazenagem, interação com outras empilhadeiras ou recursos que provocam a interrupção do transporte e até mesmo o consumo de combustível dos equipamentos em determinadas situações considerando o tipo de combustível, perfil do operador e carga transportada.

A utilização de equações dinâmicas relacionadas a outros ambientes se referem principalmente ao detalhamento de equipamentos levando em consideração o funcionamento físico do mesmo com ênfase na variável a ser analisada, como por exemplo, o consumo de energia elétrica de um transelevador ao fazer a armazenagem de pallets em diferentes velocidades, do desgaste das peças de um robô em um ambiente de altas temperaturas para identificação do momento de falha em função da agressividade do ambiente, da geração de energia elétrica do freio de correias transportadoras de elevadas cargas em ambientes com altos desníveis ou até mesmo da queda de produtividade de operadores devido a fadiga de tarefas repetitivas.

6. REFERÊNCIAS

- ABDUAZIZ, O., CHENG, J.K., TAHAR, R.M., VARMA, R., A hybrid Simulation model for Green Logistics Assessment in Automotive Industry, 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2014.
- AL-SHAEBI, A., KHADER, N., DAOUD, H., WEISS, J., YOON, S. W., The effect of forklift driver behavior on energy consumption and productivity, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, 2017.
- AMARAL, R.M., Dimensionamento Mecânico de uma Empilhadeira com Mecanismo de Nivelamento, Rio de Janeiro, 2016.
- BANKS, J., Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice, 1998.
- BARROS, J. P. S., BALDAM, R. L., JUNIOR, T. P. C., LEAL, E. A. S., SOUZA, M. A. V. F., Simulação Baseada em Agentes, ENEGEP, 2011.
- BECKER T., ILLIGEN C., MCKELVEY B., HULSMANN M., WINDT K., Using an agent-based neural-network computational model to improve product routing in a logistics facility, Int. J. Production Economics, 2016.
- BEEK, D.A., GORDIJN, S.H.F., ROODA, J.E., Integrating Continuous-Time and Discrete-Event Concepts in Modelling and Simulation of Manufacturing Machines, vol. 5, 1997.
- BORSHCHEV, A., FILIPPOV, A., From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools, The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, Oxford, England, 2004.
- BRITO, T. B., Aplicabilidade da Simulação Híbrida em Sistema Logísticos, São Paulo, 2011.
- CAO, X., Perturbation analysis of discrete event systems: Concepts, algorithms, and applications, European Journal of Operational Research 91, 1996.
- CHWIF, L., MEDINA, A. C., Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações, 2nd Edition, São Paulo, 2007.
- COELHO, H. Modelação Computacional Baseada em Agentes: Enfrentar a Complexidade. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2007.
- COYLE, R. G., Representing Discrete Events in System Dynamics Models: A Theoretical Application to Modelling Coal Production, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 36, No. 4, pp. 307-318, 1985.

- DEMIRE, T., BERTELLE, C., DUTOT, A., LÉVÊQUE, L., Modeling logistic systems with an agent-based model and dynamic graphs, *Journal of Transport Geography*, 2017.
- DEMIRTAS, M., TUZKAYA, U., Strategic planning of layout of the distribution center: an approach for fruits and vegetables hall, 8th International Strategic Management Conference, 2012.
- DINDARLOO, S.R., SIAMO-IRDEMOOSA, E., Determinants of fuel consumption in mining trucks, *Energy*, 2016.
- DREWS, T., MOLEND, P., Oechsle, O., Steinhilper, R., Value-focused design of lean production systems based on a system dynamics approach, *Procedia CIRP* 50, 478 – 483, 2016.
- DUBEY, V.K., VEERAMANI, D., A framework for sizing an automated distribution center in a retail supply chain, Department of Industrial & Systems Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2017.
- ECKERT, J. J., Desenvolvimento de Bancada Dinamométrica para Validação da Influência de Estratégias de Troca de Marchas na Dinâmica Veicular Longitudinal, Campinas, 2017.
- FATMA, E., Development of sustainable tuna processing industry using system dynamics simulation, *Industrial Engineering and Service Science 2015*, IESS, 2015.
- FISCHER, M. L., ITTNER, C. D., The Impact of Product Variety on Automobile Assembly Operations: Empirical Evidence and Simulation Analysis, Institute for Operations Research and the Management Sciences, 1999.
- GIAMBIASI, N., CARMONA, J. C., Generalized discrete event abstraction of continuous systems: GDEVS formalism, *Simulation Modelling Practice and Theory* 14, 47–70, 2006.
- GILLESPIE, T. D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale, EUA. 1992.
- GORDON, G., *A General Purpose System Simulation Program*, 1961.
- HARTWIG, J., *Discrete Events in a Continuous System*, Faculty of Social Sciences Universitetet i Bergen, 2011.
- HELAL, M., RABELO, L., An Enterprise Simulation Approach to the Development of a Dynamic Balanced Scorecard, 2004.
- HOLZAPFEL, A., KUHN, H., STERNBECK, M., Product allocation to different types of distribution center in retail logistics networks, *European Journal of Operational Research*, 2018.

- IANNONI, A. P., MORABITO, R., A discrete simulation analysis of a logistics supply system, UFSCar, 2006.
- LAURINDO, Q. M. G., PEIXOTO, T. A., RANGEL, J. J. A., Communication Mechanism of the Discrete Event Simulation and the Mechanical Project Softwares for Manufacturing Systems, Journal of Computational Design and Engineering, 2017.
- LAW, A. M., KELTON, W. D., Simulation Modeling and Analysis, Second Edition, 1991.
- LEE, K., LEE, J., DASS, S. C., Inference for differential equation models using relaxation via dynamical systems, Computational Statistics and Data Analysis, 2018.
- LI, C., REN, J., WANG, H., A system dynamics simulation model of chemical supply chain transportation risk management systems, Computers and Chemical Engineering, 2016.
- LIMA, T. F. M., FARIA, S. D., FILHO, B. S. S., CARNEIRO, T. G. S., Modelagem de sistemas baseada em agentes: alguns conceitos e ferramentas, XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009.
- LOURENÇO JUNIOR, J., A Produção Enxuta em um Sistema de Fabricação Contínuo: Aplicação da Simulação Discreta Estocástica na Indústria de Condutores Elétricos, UNESP, 2012.
- MENG Q., LI Z., LIU Z., CHEN J., Agent-based simulation of competitive performance for supply chains based on combined contracts, International Journal of Production Economics, 2017.
- MONTEVECHI, J. A. B., LEAL, F., PINHO, A. F., OLIVEIRA, M. L. M., SILVA, A. L. F., Conceptual Modeling in Simulation Projects by Mean Adapted IDEF: An Application in a Brazilian Tech Company, Winter Simulation Conference, 2010.
- MORGAN, J. S., HOWICK, S., BELTON, V., A toolkit of designs for mixing Discrete Event Simulation and System Dynamics, European Journal of Operational Research, 2014.
- PISSINELLI, G., RISSO, L. A., PICANCO, A. R. S., IGNACIO, P. S. A., SILVA, A. L., Modelo de Simulação de Eventos Discretos para Análise de Fluxo de Veículos, XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2015.
- REILLY, J. J., Introduction to Slam II and Slamsystem, Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, 1995.
- RENQUIST, J. V., DICKMAN, B., BRADLEY, T. H., Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts, International Journal of Hydrogen Energy, 2012.

- SARGENT, R. G., Verification and Validation of Simulation Models, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 2009.
- ROBINSON, S., Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next? *Journal of the Operational Research Society*, 56 (6), pp. 619 – 629, 2005.
- SANTOS, D. B. P., BARBOSA, E. E. F., Manufatura Digital no Planejamento da Automação da Usinagem de Componentes Powertrain, XXIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva, 2015.
- SCHAPPO, A.J., Um Método Utilizando Simulação Discreta e Projeto Experimental para Avaliar o Fluxo na Manufatura Enxuta, Florianópolis, 2006.
- SCHRIBER, T. J., Perspectives on Simulation Using GPSS, Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference, 1989.
- SHOUPPING, G., QIANG, Z., LIFANG, L., Area Logistics System Based on System Dynamics Model, *Tsinghua Science and Technology*, 2005.
- SCHULTZ, M., HATCH, M. J., Living with Multiple Paradigms: The Case of Paradigm Interplay in Organizational Culture Studies, *The Academy of Management Review*, Vol. 21, No. 2 (Apr., 1996), pp. 529-557, 1996.
- SOOFASTAEI, A., AMINOSSADATI, S.M., KIZIL, M.S., KNIGHTS, P., A discrete-event model to simulate the effect of truck bunching due to payload variance on cycle time, hauled mine materials and fuel consumption, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016.
- STORLI, P. J., NIELSEN, T. K., Simulation and Discussion of Models for Hydraulic Francis Turbine, *IFAC PapersOnLine* 51-2, 109–114, 2018.
- SZIMANSKI, F., Melhoria de Modelos de Processo de Negócio com Mineração de Processos e Simulação Baseada em Agentes, Universidade de Brasília, 2013.
- TAKO, A. A., ROBINSON, S., The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context, *Decision Support Systems* 52, 802–815, 2012.
- THOMAS, P., *Simulation of Industrial Processes for Control Engineers*, 1999.
- TRIVIÑOS, A. N. S., *Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação*. São Paulo: Atlas, 1987.
- UNGUREANU, D., SISAK, F., KRISTALY, D. M., MORARU, S., *Simulation Modeling. Input Data Collection and Analysis*, Electronics, 2005.

ZEIGLER, B. P., PRAEHOFER, H., KIM, T.G., Theory of Modeling and Simulation – Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems, 2nd Edition, 1976.

ZHUGE, D., YU, S., ZHEN, L., WANG, W., Multi-period distribution center location and scale decision in supply chain network, Computers & Industrial Engineering, 2016.