

Amanda Caetano Alvarenga

**Análise da eficiência logística no transporte de madeira
com pentatrens em uma fábrica de celulose com Simulação de
Eventos Discretos**

UBERLÂNDIA

2026

Amanda Caetano Alvarenga

Análise da eficiência logística no transporte de madeira com pentatrens em uma fábrica de celulose com Simulação de Eventos Discretos

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso da Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Uberlândia - UFU - Campus Santa Mônica, como requisito para a obtenção do título de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Universidade Federal de Uberlândia –UFU

Faculdade de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Renato Santos Carrijo

UBERLÂNDIA

2026

ALVARENGA, Amanda Caetano

Análise da eficiência logística no transporte de madeira com pentatrens em uma fábrica de celulose com Simulação de Eventos Discretos/ **Amanda Caetano Alvarenga. – UBERLÂNDIA, 2026-**
81 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Renato Santos Carrijo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica . **2026.**

1. Eventos Discretos 2. Logística 2. Simulação I. Prof Dr. Renato Santos Carrijo. II. Universidade Federal de Uberlândia. III. Faculdade de Engenharia Elétrica. IV. Engenharia de Controle e Automação. V. Análise da eficiência logística no transporte de madeira com pentatrens em uma fábrica de celulose com Simulação de Eventos Discretos

*Às minhas queridas irmãs
Gabriela (in memoriam) e Eduarda.*

Agradecimentos

Concluir a minha graduação em Engenharia de Controle e Automação foi um objetivo almejado há muito tempo e por muitas pessoas ao meu redor. Meus pais, Eduardo Alvarenga e Aline Caetano, não mediram esforços para me ajudar a alcançar o que eu desejei e, por isso, e tanto mais, devo a eles a minha gratidão eterna.

Ao meu pai, que sempre foi uma fonte de inspiração, modelo de dedicação e resiliência, agradeço profundamente por todo o suporte, por possibilitar que eu concluísse a graduação sem preocupações e por sempre me estimular a ser mais e a alçar voos cada vez mais distantes. À minha mãe, que sempre realizou os meus desejos, agradeço profundamente pelas abdições em prol do meu bem e ao apoio em todos os meus sonhos, independente de qual seja, sempre fazendo o que estava ao seu alcance para me ajudar.

À minha querida irmã, Eduarda, que sempre me disse “você consegue Amanda, você é tão inteligente”, obrigada por acalentar o meu coração e me dar forças para continuar por nós. Ao meu companheiro, Antônio, obrigada por me acompanhar nessa reta final, dando suporte e amparo nos momentos difíceis. Todos os momentos ao seu lado, me mostram uma prévia de como será fantástico compartilhar a vida com você.

Um dos maiores ensinamentos que tive durante o curso foi que não há a possibilidade de concluir a graduação sem a ajuda de outras pessoas e, por isso, àqueles que me ajudaram, tenho o prazer de chamá-los de amigos e digo, com certeza, que essa conquista não seria possível sem vocês. Agradeço, especialmente, ao meu amigo Igor, que me mostrou diariamente como “Caminhar com um amigo no escuro é melhor do que caminhar sozinho na luz”- Hellen Keller. Guardo com muito carinho, todos os momentos que tivemos durante a graduação, com a certeza que é apenas uma pequena fração da nossa amizade, que perdurará por muitos anos.

Menciono agora meus queridos amigos e colegas, Keslley, Luan, Luiz Felipe, Kelly e Samária, que de alguma forma me ajudaram a não desistir e tornaram a minha jornada mais suportável. Deixo o meu agradecimento profundo pelos momentos compartilhados e pelas memórias que ficarão em meu coração.

À todos os meus familiares que me apoiaram durante essa jornada, agradeço especialmente à Ana Cecília, Liliane, Lívia, Lilian, Gabriel, Vera Dias, Maria do Rosário e Maria Aparecida (*in memoriam*), que sempre torceram e torcem pelo meu melhor. Por fim, agradeço aos meus professores que foram essenciais para a minha formação e em especial, à professora Gabriela, que, mesmo sem saber, me incentivou a permanecer no curso e persistir na busca pelo meu diploma.

“A persistência é o caminho do êxito”.
(Charles Chaplin)

Resumo

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo estudar, analisar e implementar melhorias em um processo logístico de uma fábrica de celulose não solúvel, utilizando os conceitos de Simulação de Eventos Discretos. O intuito desse estudo é compreender cada etapa do processo e analisá-lo tanto individualmente, como em conjunto, a fim de verificar os possíveis gargalos e pontos de otimização que podem estar impedindo que o desempenho esteja em sua capacidade total.

Para melhor entendimento, serão explicitados alguns conceitos logísticos, de modelagem de Eventos Discretos e dos aparatos que podem ser utilizados para simular os sistemas. Com a finalidade de metrificar alguns parâmetros essenciais para a realização da análise, o tempo de deslocamento, capacidade de carga, distância média percorrida, número de viagens diárias e outros fatores serão monitorados e medidos. Neste contexto, esse estudo visa mostrar as aplicabilidades da simulação de Eventos Discretos no cotidiano, por meio da resolução de um caso real presente na indústria, evidenciando a importância dessa área de estudo e sua correlação com a Engenharia.

Palavras-chave: Eventos Discretos, logística, simulação, Engenharia, Arena.

Abstract

This course conclusion work aims to study, analyze, and implement improvements in the logistics process of a dry wood pulp factory, using the concepts of Discrete Event Simulation. The purpose of this study is to understand each stage of the process and analyze it both individually and as a whole, in order to identify possible bottlenecks and optimization points that may be preventing the process from reaching its full performance capacity.

To ensure better understanding, some logistics concepts, Discrete Event Modeling, and the tools that can be used to simulate systems will be explained. In order to measure essential parameters for the analysis, factors such as travel time, cargo capacity, average distance traveled, number of daily trips, and others will be monitored and measured. In this context, the study aims to demonstrate the applicability of Discrete Event Simulation in everyday scenarios, through the resolution of a real case from the job market, highlighting the importance of this field of study and its correlation with Engineering.

Keywords: Discrete Events, logistics, simulation, Engineering, Arena.

Lista de ilustrações

Figura 1 -Tela do Arena.....	22
Figura 2 – Tela do Flexsim	23
Figura 3 – Tritrem.....	26
Figura 4 – Pentatrem	27
Figura 5 – Megatrem	28
Figura 6 – FellerBuncher Tigercat.....	28
Figura 7 – Skidder Tigercat	29
Figura 8 – Garra Seccionadora Komatsu.....	29
Figura 9 – Grua Sany	30
Figura 10 – Esboço do Processo (AS IS)	31
Figura 11 – Esboço do Processo (TO BE).....	32
Figura 12 – Gráfico Boxplot Deslocamento até o Talhão (Pentatrem)	34
Figura 13 – Gráfico Boxplot Deslocamento até o Talhao (Megatrem)	34
Figura 14 – Gráfico Boxplot Carregamento na Floresta (Pentatrem).....	35
Figura 15 – Gráfico Boxplot Carregamento na Floresta (Megatrem)	35
Figura 16 – Gráfico Boxplot Deslocamento até a Fábrica (Pentatrem).....	36
Figura 17 – Gráfico Boxplot Deslocamento até a Fábrica (Megatrem).....	36
Figura 18 – Gráfico Boxplot Tempo na Balança (Pentatrem)	37
Figura 19 – Gráfico Boxplot Tempo na Balança (Megatrem).....	37
Figura 20 – Gráfico Boxplot Tempo de Descarregamento (Pentatrem)).....	38
Figura 21 – Gráfico Boxplot Tempo de Descarregamento (Megatrem).....	38
Figura 22 – Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Pentatrem).....	40
Figura 23 – Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Pentatrem)....	41
Figura 24 – Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Megatrem)	41
Figura 25 – Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Megatrem) ...	42
Figura 26 – Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Pentatrem)	42
Figura 27 – Legenda da Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Pentatrem)	43
Figura 28 – Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Megatrem)	43
Figura 29 – Legenda da Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Megatrem).....	44
Figura 30 – Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Pentatrem)	44
Figura 31 – Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Pentatrem) ...	45
Figura 32 – Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Megatrem)	45
Figura 33 – Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Megatrem) ...	46
Figura 34 – Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Pentatrem).....	46
Figura 35 – Legenda da Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Pentatrem)	47
Figura 36 – Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Megatrem)	47
Figura 37 – Legenda da Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Megatrem)	48

Figura 38 – Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Pentatrem)	48
Figura 39 – Legenda da Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Pentatrem) .	49
Figura 40 – Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Megatrem)	49
Figura 41 – Legenda da Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Megatrem) ..	50
Figura 42 – Fluxograma do modelo AS IS/ TO BE no software Arena	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela Comparativa do Pentatrem e do Megatrem.....	31
Tabela 2 – Resumo dos resultados cenário AS IS.	60
Tabela 3 – Resumo dos resultados cenário TO BE- 1.	62
Tabela 4 – Resumo dos resultados cenário TO BE- 2.	63
Tabela 5 – Resumo dos resultados dos demais cenários.	64
Tabela 6 – Custo total a cada 10.000 toneladas	66
Tabela 7 – Projeção de custos em 1, 5 e 10 anos	66

Lista de abreviaturas e siglas

TCC	<i>Trabalho de Conclusão de Curso</i>
SED	<i>Simulação de Eventos Discretos</i>
AS IS	<i>Cenário Atual</i>
TO BE	<i>Cenário Proposto</i>
Outlier	<i>Ponto fora da curva</i>
WIP	<i>Trabalho em Processamento</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1 Objetivo.....	17
2. Referencial Teórico.....	18
2.1 Simulação.....	18
2.2. Simulação de Eventos Discretos.....	19
2.3 Ferramentas para Simulação de Eventos Discretos.....	21
2.3.1 Arena.....	21
2.3.2 Flexsim.....	22
2.3.3 Simul8.....	23
2.3.4 Simpy.....	24
2.4 Logística.....	24
3. Metodologia.....	26
3.1 Esboço do Processo e Modelagem Conceitual.....	28
3.2 Coleta de Dados.....	32
3.3 Tratamento de Dados com o Software Past.....	32
3.4 Distribuição de Dados com Input Analyzer.....	39
3.5 Modelagem e Simulação com o Software Arena.....	50
4. Resultados e Discussões.....	56
4.1 Resultados da modelagem do Cenário AS IS.....	56
4.2 Resultados da modelagem do Cenário TO BE- 1.....	57
4.3 Resultados da modelagem do Cenário TO BE- 2.....	58
4.4 Discussões.....	59
5. Conclusão.....	68
6. Referências Bibliográficas.....	69
Apêndices.....	71
Apêndice A.....	72
Apêndice B.....	73
Apêndice C.....	74

Apêndice D.....	75
Apêndice E.....	76
Apêndice F.....	77
Apêndice G.....	78
Apêndice H.....	79
Apêndice I.....	80
Apêndice J.....	81

1 Introdução

A logística desempenha papel fundamental no crescimento econômico mundial, movimentando bens materiais, informações e serviços de maneira constante. Um bom processo logístico acarreta inúmeros benefícios que impactam diretamente no faturamento, na produção e na satisfação do cliente final. Nesse sentido, entende-se que as aplicabilidades dos conceitos logísticos se fazem presentes desde o suprimento de matéria-prima, para um determinado produto, até a chegada do bem acabado ao consumidor final (COTO-MILLÁN, 2014).

Uma ótima ferramenta auxiliar para essa área é a Simulação de Eventos Discretos, que se trata de uma metodologia robusta empregada para modelar e analisar diferentes tipos de sistemas, nos quais as alterações ocorrem em determinados pontos do tempo, caracterizando um modelo discreto. Essa técnica extremamente relevante compreende uma importante área da Engenharia de Controle e Automação, já que permite a avaliação de cenários operacionais sem a necessidade de intervenções diretas no sistema real, apenas com a representação de um processo dinâmico por uma série de eventos sequenciais que modificam o estado do sistema instantaneamente.

Dentre as inúmeras aplicabilidades da Simulação de Eventos Discretos, é notória a sua importância na modelagem, análise e otimização de processos, uma vez que, com essa metodologia, é possível identificar os gargalos do sistema, que podem gerar diversos tipos de problemas. Baixa eficiência, tempo de espera prolongado, desperdício, custos altos e baixa sustentabilidade são empecilhos que afetam diretamente o desempenho de um processo logístico e que podem ser evitados com o desenvolvimento e a utilização de uma Simulação de Eventos Discretos do cenário a ser analisado.

Para implementar e executar esse tipo de análise, é necessário coletar amostras e considerar diversos parâmetros, como o tempo de execução de cada etapa e a quantidade e o rendimento de cada equipamento, para que seja possível melhorar o uso dos recursos e compreender os gargalos do sistema de forma automatizada. Vale ressaltar que a Simulação de Eventos Discretos também pode ser utilizada para certificar-se antes de tomar uma decisão que mudará o processo, já que é possível modelar o sistema como é e executar ensaios com diferentes cenários (ERIKSSON, 2021).

É notório que a utilização de simulações tem ganhado cada vez mais espaço no âmbito da Engenharia de Controle e Automação, uma vez que as indústrias de manufatura têm utilizado extensivamente essa metodologia para melhora do planejamento de produção, verificação das

possibilidades de automação e efetividade geral do processo (KAMPA, 2017). Outra área promissora relacionada à Simulação de Eventos Discretos é a de sustentabilidade, em que é possível aprimorar questões como a emissões de gases, o descarte de resíduos e a economia de energia elétrica, situação que evidencia que a área de simulações é de suma importância para o âmbito da Engenharia, devido às suas inúmeras aplicabilidades e boa eficácia.

1.1 Objetivo

O objetivo principal deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é modelar e aplicar uma Simulação de Eventos Discretos (SED) para verificar possibilidades de melhoria do processo logístico de transporte de madeira para uma fábrica de celulose não-solúvel, que é integrada à floresta de eucalipto. Apesar da grande vantagem de a indústria ser localizada dentro de uma plantação de 40 mil hectares, a grande extensão da área faz com que haja a necessidade de um planejamento logístico robusto para atender as demandas de produção.

Dessa forma, será analisado o processo de carga e descarga de eucaliptos, considerando a grande extensão da fazenda, a quantidade de fretes diários, o processo de carregamento dos caminhões e a emissão de gases dos pentatrens, com o intuito de identificar os gargalos desse processo e propor medidas que possam melhorar o fluxo logístico do transporte de matéria-prima.

Nesse contexto, com a SED espera-se encontrar alternativas que irão reduzir a quantidade de viagens diárias dos pentatrens, o tempo de espera para carga/descarga ou a emissão de gases no processo, visando não só a redução de custos desse ciclo, como também oportunidades de melhorar a sustentabilidade dessa parte da cadeia de produção.

2 Referencial Teórico

Neste tópico serão embasadas algumas teorias envolvendo simulação, Eventos Discretos, conceitos logísticos, programação para teste de modelos, e aplicações de simulação com eventos discretos, com o intuito de aprimorar e otimizar alguns processos logísticos.

2.1 Simulação

Com a crescente necessidade de agilizar as tomadas de decisão e evitar mudanças desnecessárias, o uso da simulação se faz cada vez mais presente nos diferentes nichos do mercado mundial. Pela definição, a simulação é caracterizada como uma ferramenta que reproduz características da vida real para fins de aprendizado, oferecendo prática eficaz para situações de todos os domínios. (CHERNIKOVA, 2020)

Nesse sentido, por tratar-se de uma ferramenta robusta, que oferece a possibilidade de analisar cenários, avaliar estratégias e desenvolver soluções para problemas, a simulação é utilizada em setores como a área da saúde, administrativo e, principalmente, o setor industrial. Como trata-se de uma metodologia consistente, há diversos métodos de simulação, que permitem que o usuário tenha maior assertividade ao desenvolver soluções, como a Simulação de Eventos Discretos, a Simulação de Sistemas Dinâmicos e a Simulação Baseada em Agentes. (VOLODYMYR HRIDIN et al, 2024)

É importante ressaltar que para utilizar a técnica de simulação é necessário certa organização prévia para que os resultados sejam o mais fidedignos possível. Dessa forma, ao escolher essa metodologia para realizar testes, deve-se, além de definir o problema e os objetivos, coletar os dados que serão computados durante a simulação. Por isso, ao traçar o propósito da simulação, é importante estabelecer quais serão os parâmetros analisados e, posteriormente, considerados nas análises dos resultados.

É perceptível que a utilização de simulações representa uma ótima ferramenta operacional, já que permite a modelagem e a realização de testes de uma forma rápida, de baixo custo e eficiente. Além disso, ao possibilitar a análise de múltiplos cenários sem a necessidade de intervenções diretas no ambiente real, a simulação contribui significativamente para a redução de riscos, otimização de recursos e embasamento de decisões estratégicas. Dessa forma, torna-se um recurso essencial para

organizações que buscam inovação, precisão e agilidade em seus processos de tomada de decisão.

2.2 Simulação de Eventos Discretos

De acordo com Jonathan Karnon et al, a Simulação de Eventos Discretos (SED) é uma forma de modelagem em computador que provê uma maneira intuitiva e flexível de representar sistemas complexos. Para isso, a simulação avança no tempo passando por cada um dos eventos do processo, ao invés de avançar com o uso de incrementos fixos, fazendo com que seja ideal para sistemas não contínuos.

A SED funciona principalmente baseada em cálculos, conceitos matemáticos e aparato computacional, utilizando um processo estocásticos que, por meio de distribuições probabilísticas, governam o tempo e a sequência de eventos da simulação (KONS et al, 2020). Para maior semelhança com os eventos que acontecem no cotidiano, a simulação depende da geração de números aleatórios para a utilização nas distribuições probabilísticas, o que possibilita a imitação da aleatoriedade dos eventos reais (BANKS, 1995).

Com o intuito de estruturar a metodologia, diversos autores abordaram sobre o processo de criação de uma SED fidedigna e eficaz com condições e resultados realísticos. De acordo com a definição proposta por Antuela A. Tako (2015), podemos estabelecer 7 passos essenciais para a criação de um SED de qualidade:

- **Definição do Problema:** definir claramente o objetivo, o escopo e os limites do sistema a ser modelado, além de fazer o levantamento de quais as questões a simulação deve responder;
- **Modelagem Conceitual:** desenvolvimento de um esquemático de como o modelo do sistema irá funcionar, abordando quais são as entidades, os recursos, os eventos e o relógio de simulação;
- **Coleta de Dados:** levantamento e coleta de dados substanciais com boa qualidade e quantidade considerável;
- **Implementação do Modelo:** transformação da modelagem conceitual em um programa computacional, que pode ser desenvolvido em diversos softwares da área de SED;

- **Verificação e Validação:** certificação por meio de testes de que o modelo projetado está de acordo com o cenário real;
- **Experimentação e Análise:** execução de simulações com diferentes cenários, possibilidades e configurações para avaliar a melhor abordagem;
- **Documentação e reporte:** documentação dos resultados obtidos, bem como os modelos e hipóteses utilizados.

Nesse contexto, por tratar-se de uma metodologia robusta e bastante utilizada, fez-se necessário estabelecer o que de fato caracteriza uma SED. Esse tema foi discutido por diversos autores e foi abordado com profundidade o que são os componentes de um modelo de simulação de eventos discretos:

- **Entidades:** são os objetos que passam pelo sistema (ex.: pacientes de um hospital, clientes de um estabelecimento, máquinas);
- **Recursos:** são elementos diretamente ligados às entidades e que devem ser controlados ou gerenciados (ex.: máquina, robô, caminhão);
- **Eventos:** são mudanças que ocorrem no sistema em pontos específicos no tempo (ex.: chegada de pedido, início de atendimento);
- **Relógio de Simulação:** é o que controla o tempo dentro da simulação e avança para o momento do próximo evento.

Ao levar em consideração os componentes que caracterizam uma SED, é perceptível que as possibilidades de aplicação são abrangentes, possibilitando encontrar diversos estudos e projetos que implementaram a Simulação de Eventos Discretos em hospitais, processos logísticos e na indústria. Para as modelagens na área de saúde, os objetivos traçados podem incluir reduzir o tempo de espera, otimizar o uso de recursos e melhorar o fluxo de pacientes na unidade de atendimento ao cidadão (VÁZQUEZ-SERRANO et al, 2021).

Já nas indústrias, a funcionalidade de uma SED também pode variar bastante de acordo com o que se espera analisar ou desenvolver. A modelagem pode servir para melhorar a alocação de recursos, compreender os gargalos e otimizar o processo, auxiliar na transformação digital e Indústria 4.0 ou apenas suportar alguma decisão, por meio de análises e execução de cenários. Com isso, percebe-se que, diante das inúmeras aplicabilidades da SED, é também possível utilizá-la para

confirmar que o processo da forma atual é a melhor forma de executá-lo no momento, impedindo mudanças e gastos desnecessários no sistema.

2.3 Ferramentas para Simulação de Eventos Discretos

Com o avanço tecnológico, a disponibilidade de softwares e aplicações para os mais variados objetivos ampliou e o acesso tornou-se ainda mais facilitado para os usuários. Na área das simulações, especialmente no âmbito de Sistemas Discretos, a gama de possibilidades cresceu consideravelmente, possibilitando que o cliente possa escolher o que mais adequa aos seus objetivos e modelo a ser desenvolvido. Para a elaboração do sistema estudado, serão utilizados alguns softwares de simulação, como o Arena, FlexSim, Simul8, além de bibliotecas de programação, como o SimPy, e alguns recursos computacionais que serão abordados nesta seção.

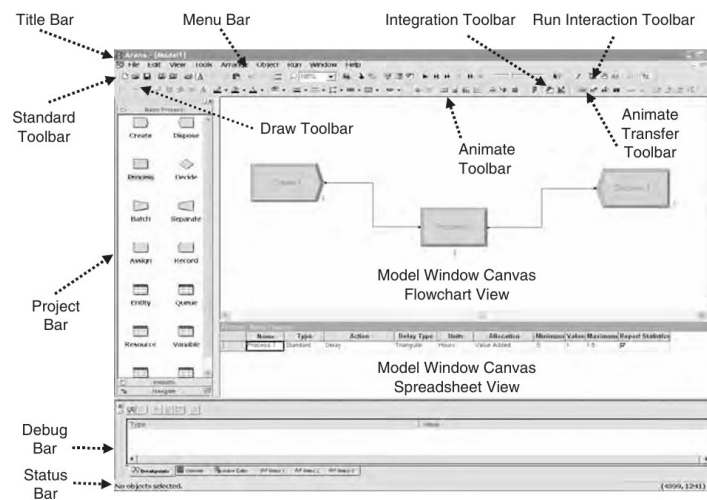
2.3.1 Arena

Desenvolvido pela Rockwell Automation, o software Arena tem o uso para análises de Sistemas de Eventos Discretos como funcionalidade principal, já que pode ser utilizado para modelar e simular sistemas complexos que são baseados em processos que ocorrem em momentos específicos do tempo. Por ser ideal para Eventos Discretos, a aplicação é comumente empregada em modelagens para Logística, Manufatura, Saúde e Supply Chain, uma vez que muitas dessas envolvem gerenciamento de filas e recursos.

Para o funcionamento do software, o Arena utiliza uma linguagem chamada SIMAN (Simulation Language), que é uma linguagem de simulação orientada a eventos. Entretanto, na maioria dos casos, não há necessidade de que o usuário a utilize para elaborar as simulações, já que a interface gráfica do software cobre a maioria das necessidades.

Todavia, apesar de facilitar a modelagem com a interface gráfica, o Arena possui certas especificidades que, juntamente com a interface com design antigo, dificultam a rápida aprendizagem do usuário.

Figura 1- Tela do Arena



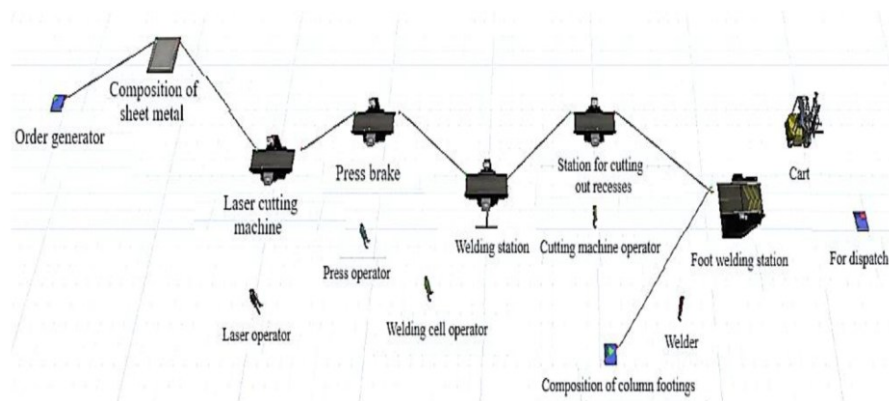
Fonte: ALTIOK (2010)

O software permite a modelagem dos processos por meio de blocos como o Create: cria entidades (caminhões, máquinas, etc.); Process: representa atividades (carregamento, atendimento, etc); Decide: responsável pelas decisões lógicas (usar qual das entidades) e Dispose: finaliza o ciclo da entidade. Vale ressaltar que o Arena fornece gráficos, tabelas e relatórios ao final da simulação que facilitam ainda mais a realização das análises de desempenho do sistema modelado. Por fim, o software possui versão paga e versão estudantil gratuita, que, apesar de ser limitada em algumas funções, atende bem para realização de simulações não tão complexas.

2.3.2 FlexSim

O FlexSim, desenvolvido pela FlexSim Software Products, é uma aplicação que trabalha com três tipos de simulação de eventos: discretos, contínuos e híbridos. Esse software se destaca pela sua interface 3D com modelagem visual realista, o que torna o funcionamento intuitivo e oferece a possibilidade de representação mais fidedigna de operações reais.

Figura 2- Tela do Flexsim



Fonte: LEWICK et al (2024)

Com uma lógica baseada em linguagem C++, o Flexsim possui uma alta capacidade de personalização, apesar de ter maior aplicabilidade para a área de Logística. Vale ressaltar que, para usuários sem experiência prévia em simulação, a usabilidade do software pode ser reduzida e trazer dúvidas e dificuldades na utilização. Por fim, como grande parte dos softwares da área de modelagem, o Flexsim possui um custo elevado para obter a versão completa, com todas as funcionalidades, o que pode ser um empecilho na aquisição da licença para usuários pontuais ou pequenas empresas.

2.3.3 Simul8

Criado em 1990, na Escócia, o Simul8 é um software de simulação de eventos discretos que, inicialmente, foi desenvolvido para fins educativos, mas posteriormente passou a ser comercializado pela Simul8 como uma ferramenta profissional.

O software possui uma interface intuitiva e de fácil entendimento, baseada em fluxogramas, e que, juntamente com a presença de simulação 2D, baixo custo e alta velocidade de modelagem e análise, fazem-no uma ótima opção de ferramenta de simulação. Todavia, é necessário pontuar que, para simulações com certo nível de complexidade, o Simul8 pode ter suas limitações, sendo recomendado outras aplicações, como o Flexsim.

Por fim, vale salientar que, assim como os demais softwares, o Simul8 tem diversas áreas de aplicabilidade, como a manufatura, saúde e a logística. Dessa forma, é possível modelar e implementar simulações nos mais diferentes âmbitos do mercado de trabalho e realizar uma análise

fundamentada em dados concretos e resultados verídicos.

2.3.4 Simpy

Simulation in Python, mais conhecida como SimPy, é uma biblioteca de simulação de eventos discretos desenvolvida na linguagem de programação Python. Atualmente, ela tem sido amplamente utilizada em pesquisas operacionais, áreas que envolvam engenharia e logística, pois se mostrou uma ótima ferramenta para modelar processos que evoluem ao longo do tempo. Além de ser gratuito e de fácil instalação, o SimPy é ideal para simular sistemas com filas, manufatura, sistemas logísticos e sistemas de transporte.

A estrutura da biblioteca é bem similar ao do software Arena e os conceitos principais podem ser vistos abaixo:

- **Environment:** é o ambiente da simulação, gerencia todos os eventos e organiza a execução dos processos;
- **Processos:** são as entidades que realizam ações ao longo do tempo. São definidos como funções geradoras com yield, que pausam e retomam a execução;
- **Evento:** algo que acontece em algum momento do tempo;
- **Resource:** elementos limitados e compartilhados que são usados na simulação.

É importante salientar, que o SimPy não avança o tempo continuamente, mas sim de evento em evento. Os processos permanecem desativados e só retornam após uma determinada unidade de tempo, pré-estabelecida pelo usuário e projetista da simulação, caracterizando um evento discreto.

Além disso, para que a simulação fique ainda mais completa, é comum serem utilizadas outras bibliotecas em Python, como matplotlib e pandas, para auxiliar na visualização dos resultados com maior facilidade.

2.4 Logística

Originária da palavra grega “logistikos”, que significa “a arte de calcular” ou “organizar”, a Logística surgiu como uma ferramenta para a área militar, focada em garantir o suprimento eficaz de

armamentos, alimentos e outros materiais para a linha de frente do exército (KURGANOV et al, 2023).

Na contemporaneidade, a Logística desempenha um papel fundamental em diversos setores, como o de transporte, armazenamento, processamento de pedidos e produção de bens. Os conceitos dessa área de estudo são amplamente utilizados, já que estabelece uma conexão vital entre produtores, consumidores e mercado internacional, possibilitando compreender cada caso específico e aplicar as melhores técnicas e soluções para o sistema analisado (SUSANTO et al, 2025).

Nesse sentido, percebe-se que, para uma indústria, um bom processo logístico é essencial, já que assegura o fluxo contínuo de materiais e informações, de forma que o sistema trabalhe em sua capacidade máxima, sem atrasos e desperdício de tempo e de recursos. Além disso, com um sistema de logística eficiente, há inúmeras oportunidades de melhorias que podem ser aplicadas, como a integração com a Indústria 4.0, o aumento das automações de produção e maior desenvolvimento da sustentabilidade na fábrica.

Além de otimizar fluxos e reduzir custos operacionais, a logística também se torna uma aliada fundamental no desenvolvimento da sustentabilidade industrial. Um processo bem estruturado permite gerir recursos de forma mais eficiente, minimizar desperdícios e tomar decisões estratégicas com base em dados e indicadores de desempenho. A escolha de rotas otimizadas, o uso racional de matérias-primas e a integração de tecnologias de monitoramento contribuem para a redução de emissões, consumo energético e impactos ambientais. Dessa forma, a logística não apenas melhora a produtividade e a competitividade da fábrica, mas também promove práticas mais responsáveis e alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

3 Metodologia

No processo logístico atual, o transporte das toras de eucaliptos provenientes da floresta anexada à fábrica é feito por uma empresa terceira e pode acontecer com dois tipos de caminhões: tritrens, pentatrens. Todavia, visando carregar a maior quantidade de madeiras por viagem e por ser uma norma padrão da companhia, dá-se preferência para a utilização dos pentatrens para esse tipo de carregamento.

Os tritrens utilizados são da marca Volvo FH 540, acoplados com 3 semirreboques interligados por meio pino-rei/quinta roda. Esse tipo de transporte pode chegar até 36 metros de comprimentos e, apesar de ter a capacidade de carregar até 77 toneladas de carga, é utilizado na companhia para transportar no máximo 50 toneladas. O modelo possui 540 cv e pode variar de 1.450rpm até 1.900rpm, com um torque de aproximadamente 2.600Nm.

Por ser um veículo mais leve comparado aos demais, os tritrens da fábrica conseguem circular a uma velocidade média de até 45km/h e, como o consumo médio de combustível varia de acordo com a carga, topografia e velocidade, esse modelo consome até 1,5L/km, dependendo da situação analisada.

Figura 3- Tritrem



Fonte: Mais Floresta (2025)

Já os pentatrens utilizados pela fábrica são da marca Scania XT 540, que é um modelo focado

em tarefas pesadas e projetado para operar em ambientes agressivos, como construção civil e operações fora de estrada. Esse caminhão tem 540cv, com torque máximo de aproximadamente 2.700Nm, podendo variar de 1.000 a 1.300rpm. Quando acoplado com 5 semirreboques, o conjunto tem a capacidade de carregar até 200 toneladas, mas, para manter a eficiência, as cargas na indústria estudada não passam de 173 toneladas.

Os pentatrens da fábrica têm um comprimento de aproximadamente 68m, consumo médio de 0,65L/km e se deslocam em uma velocidade média de 15km/h. Todavia, por serem consideravelmente extensos e carregarem um volume alto de carga, não podem circular em rodovias, sejam elas municipais, estaduais ou federais, devendo deslocar-se somente nas estradas privadas da plantação de eucalipto.

Figura 4- Pentatrem



Fonte: Autoria Própria (2025)

Em operações nas quais todo o desempenho do processo depende da fase inicial, torna-se fundamental identificar e analisar pontos de melhoria. Esse é o caso da situação em questão, na qual se faz necessário buscar oportunidades que permitam tornar o processo ainda mais eficiente e otimizado. Nesse sentido, a empresa terceirizada propôs que fosse implantado um novo tipo de caminhão para auxiliar a operação logística de transporte de madeiras para a fábrica: o megatrem.

Esse novo modelo é caracterizado pela adição de mais uma unidade de semirreboque (compartimento de carga), permitindo, assim, carregar cerca de 25% a mais de carga.

Figura 5- Megatrem



Fonte: Autoria Própria (2025)

3.1. Esboço do Processo e Modelagem Conceitual

Para o a colheita de eucalipto, prevalecem majoritariamente dois tipos de processos: Full Tree e Cut Length. O primeiro método de colheita se diferencia pelo fato da árvore inteira ser derrubada e retirada do talhão com galhos e copas, para ser processada apenas posteriormente.

Nesse tipo de sistema, uma máquina do tipo Feller Buncher faz o corte da árvore e a armazena com o seu sistema de mola, o que possibilita segurar cerca de 7 árvores cortadas antes de fazer a derrubada.

Figura 6- FellerBuncher Tigercat



Fonte: Tigercat (2024)

Logo após serem derrubadas, um maquinário do tipo Skidder fica responsável por fazer o

arraste das árvores para a borda do talhão, retirar os galhos e as copas com o seu sistema de desgalhamento, além de mantê-las agrupadas em conjuntos de 7.

Figura 7- Skidder Tigercat



Fonte: Autorial Própria (2024)

Por fim, uma garra seccionadora com um sistema de régua digital, faz o corte das toras com o comprimento pré-estabelecido e as separa ainda mais na borda do talhão para iniciar o processo de transporte de madeira. Vale ressaltar que antes do transporte logístico iniciar, a madeira deve ficar em campo cerca de 15 dias, para que elas possam secar e facilitar, posteriormente, o descascamento.

Figura 8- Garra Seccionadora Komatsu



Fonte: Autorial Própria (2024)

O processo abordado e estudado neste projeto, tem início a partir deste momento, em que as toras já foram seccionadas e já foi aguardado o tempo correto para elas secarem em campo. Dessa forma, o setor florestal da indústria em questão, solicita para a empresa tercerizada que seja iniciado o processo de transporte para que as madeiras sejam processadas e a celulose seja produzida.

Atualmente, para fazer todo o transporte de madeira, tanto na floresta anexa, quanto em fazendas mais distantes, há 30 caminhões, sendo 25 tritrens, 4 pentatrens e 1 megatrem. Por ser uma propriedade privada e ter suas próprias estradas, dá-se preferência à utilização dos pentatrens na fazenda integrada à fábrica, com o objetivo de realizar menos fretes.

Dessa forma, a cada 2 horas, em média, 2 caminhões, podendo ser do tipo pentatrem ou megatrem, saem da fábrica e deslocam-se para o talhão designado para serem carregados. Ao chegar no destino, duas gruas florestais fazem o carregamento dos 2 caminhões simultaneamente.

Figura 9- Grua Sany



Fonte: Mais Floresta (2024)

Após o carregamento ser finalizado, o caminhão retorna para a fábrica carregado e aguarda na balança até que a pesagem e os demais trâmites sejam feitos. Por fim, o caminhão direciona-se para o Pátio de Madeiras, onde será feito o descarregamento das toras, para dar início, posteriormente, ao descascamento das toras.

Por tratar-se de um processo que depende da boa logística do setor de transporte, a indústria analisada, juntamente com a empresa responsável pelos fretes da madeira, enxergaram essa oportunidade de reduzir o número de viagens por talhão por meio do novo tipo de caminhão. Dessa

maneira, ambas estão analisando a possibilidade de implementar uma frota de Megatrens, que tem a capacidade de carga aumentada em 25%, em relação ao Pentatrem.

Nesse sentido, este trabalho desenvolveu uma simulação com os dados coletados do processo de transporte de madeiras dessa indústria, para verificar se a renovação da frota, substituindo os Pentatrens pelos Megatrens, faz sentido para a companhia, bem como os custos que essa implementação traria para o processo.

A seguir, é possível verificar alguns dados comparativos dos dois tipos de caminhões, com base apenas na coleta de dados, sem tratamento e simulações.

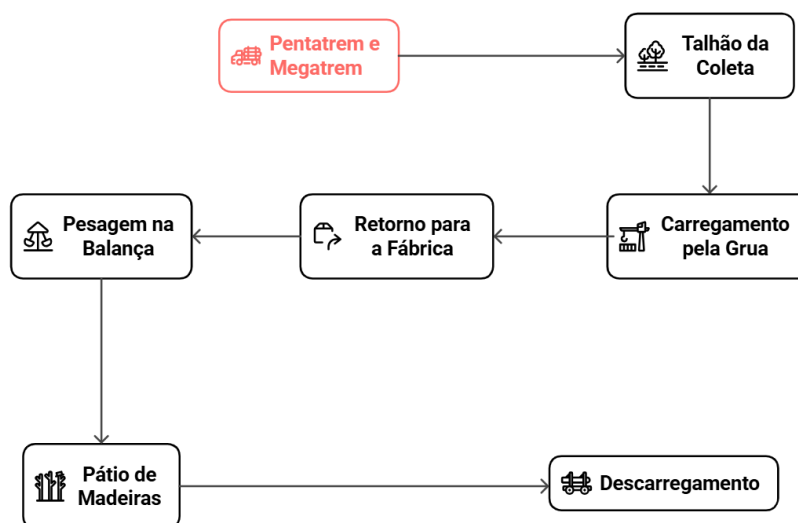
Tabela 1- Tabela Comparativa do Pentatrem e do Megatrem

	Pentatrem	Megatrem
Média de Carga(ton)	146,96	174,96
Consumo Combustível (l/km)	0,5	0,65
Velocidade Média (km/h)	15	16
Tempo de Carregamento (min)	40	60
Tempo de Descarga (min)	35	45

Fonte: Autoria Própria (2026)

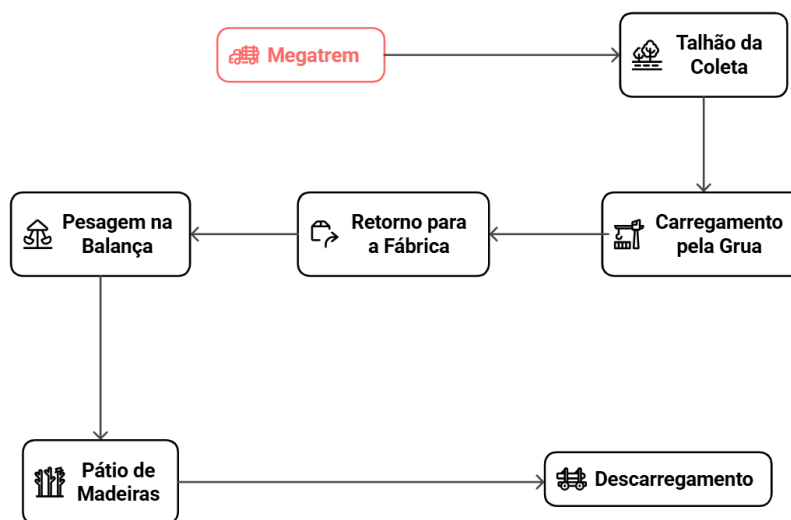
Nesse contexto, a seguir é possível verificar o esboço do processo. Vale ressaltar que o processo AS IS e o TO BE são iguais, com exceção do fato da possível mudança do tipo de caminhão, de pentatrem para megatrem.

Figura 10- Esboço do Processo (AS IS)



Fonte- Autoria Própria (2025)

Figura 11- Esboço do Processo (TO BE)



Fonte- Autoria Própria (2025)

3.2 Coleta de Dados

Pelo fato do processo logístico de transporte de madeiras ser realizado por uma empresa terceirizada, a coleta de dados e aquisição dos recursos necessários foi de responsabilidade destes. Os requisitos que envolvem tempo de duração foram coletados com o auxílio de um cronômetro; o de velocidade média é o parâmetro utilizado pela empresa para circulação na floresta anexa e o de consumo é com base na quilometragem rodada em relação ao consumo do caminhão no período analisado.

3.3 Tratamento de Dados com o Software Past

Após a coleta dos dados, foi realizado o tratamento dos dados com a utilização do software Past. O PAleontological Statistics, abreviado como Past, é uma aplicação gratuita para Windows, originalmente criada para uso na Paleontologia, que analisa dados de forma estatística e gráfica.

Esse software possui uma interface baseada em planilhas e usabilidade de fácil compreensão, em que é possível utilizá-lo para executar desde estatísticas descritivas, até análises multivariadas complexas. Um dos recursos que esse software possui são os gráficos do tipo boxplot, que são divididos em 4 quartis e possuem 5 componentes principais: limite inferior, primeiro quartil (Q1),

mediana, terceiro quartil (Q3) e limite superior.

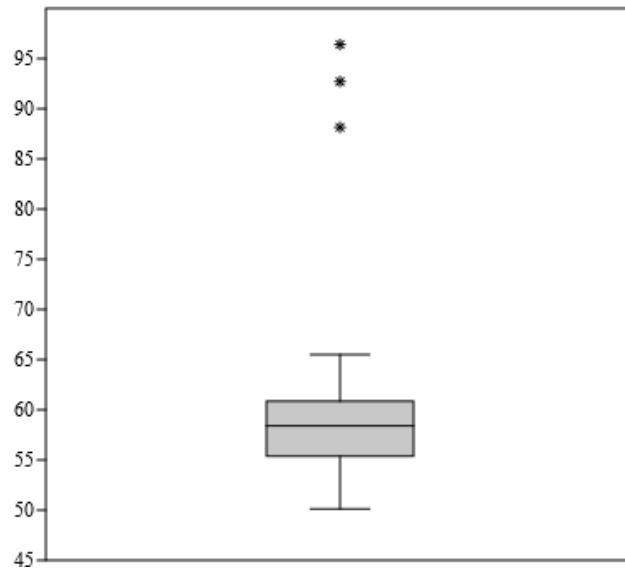
O limite inferior, ou mínimo, representa o menor valor dos dados que estão sendo analisados e que não são considerados pontos fora da curva (outliers) e, graficamente, indica o limite mínimo que os valores baixos da sua amostra chegam dentro da normalidade estatística. O Q1 separa os 25% menores valores da amostra e, caso a linha inferior do retângulo (Q1) esteja muito afastada da linha central (mediana), significa que os dados apresentam dispersão considerável. A mediana segue o conceito matemático e se caracteriza como o ponto exato do meio entre os dados da amostra, e pode apresentar assimetria caso os dados não estejam distribuídos uniformemente ao redor do centro. Já o Q3 separa os 75% menores valores da amostra e, por fim, o limite superior segrega os maiores valores da amostra, que não são considerados outliers e, assim, representa o teto da normalidade da amostra analisada.

Além disso, as linhas verticais que se estendem para fora da caixa do gráfico boxplot, denominadas hastes ou whiskers, representam a variabilidade dos dados fora do intervalo interquartil (a parte central). O comprimento destas hastes indica a amplitude da dispersão nas caudas da distribuição: hastes curtas sugerem que os dados estão concentrados próximos ao centro, enquanto hastes longas indicam maior variabilidade nos extremos da amostra. Por fim, é necessário pontuar sobre os valores discrepantes, também chamados de outliers, que são os pontos individuais plotados além das hastes, como asteriscos ou círculos pequenos. É importante dar certa atenção para eles, pois são dados que, estatisticamente, estão distantes do valor da amostra e não devem ser considerados na análise, já que não representam o padrão que está sendo analisado.

Dessa forma, os aspectos que serão possíveis de serem verificados nos gráficos boxplot dos processos são: Deslocamento até o Talhão- Pentatrem, Deslocamento até o Talhão- Megarem, Carregamento na Floresta- Pentatrem, Carregamento na Floresta- Megatrem Deslocamento até a Fabrica- Pentatrem, Deslocamento até a Fabrica- Megatrem, Tempo na Balança- Pentatrem, Tempo na Balança- Megatrem, Tempo de Descarregamento- Pentatrem e Tempo de Descarregamento- Megatrem. Após isso, as amostras foram tratadas e os dados que representam situações adversas foram retirados, para que não impactem no cenário real simulado.

Nas figuras a seguir, os eixos X e Y representam, respectivamente, o processo e o tempo, em minutos, para executar a atividade.

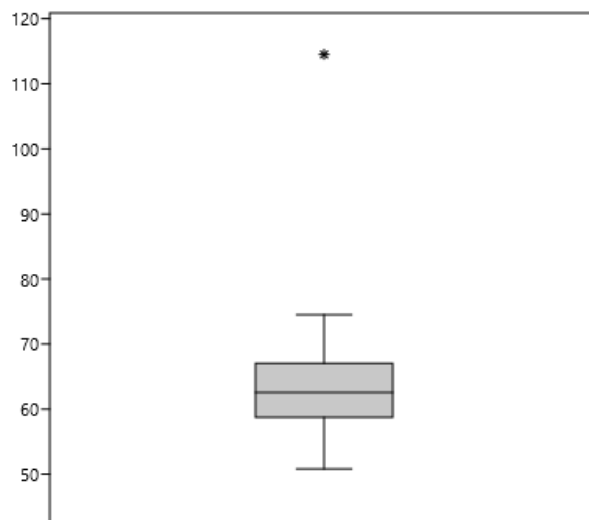
Figura 12- Gráfico Boxplot Deslocamento até o Talhão (Pentatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 12, é possível verificar o gráfico do processo Deslocamento até o Talhão do caminhão Pentatrem e foram observados três outliers: 92.7, 88.15 e 96.4 minutos. Essas exceções podem refletir alguma situação pontual em que a estrada estava com muitos buracos, pneu do caminhão furou ou alguma outra adversidade.

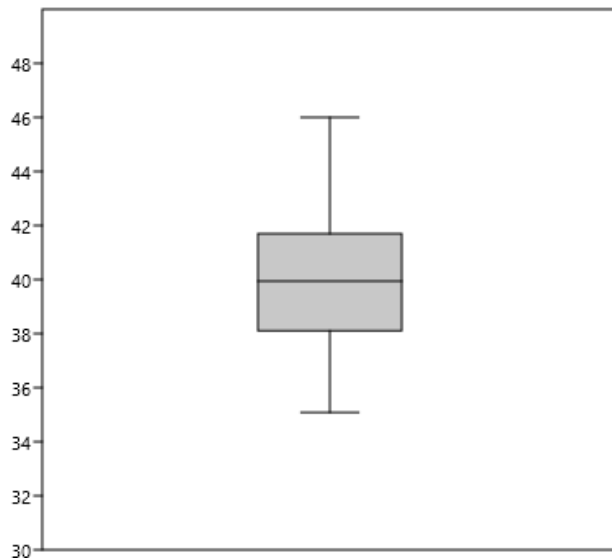
Figura 13- Gráfico Boxplot Deslocamento até o Talhão (Megatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 13, é possível verificar o gráfico do processo Deslocamento até o Talhão do caminhão Megatrem e foi observado um outlier de 114 minutos.

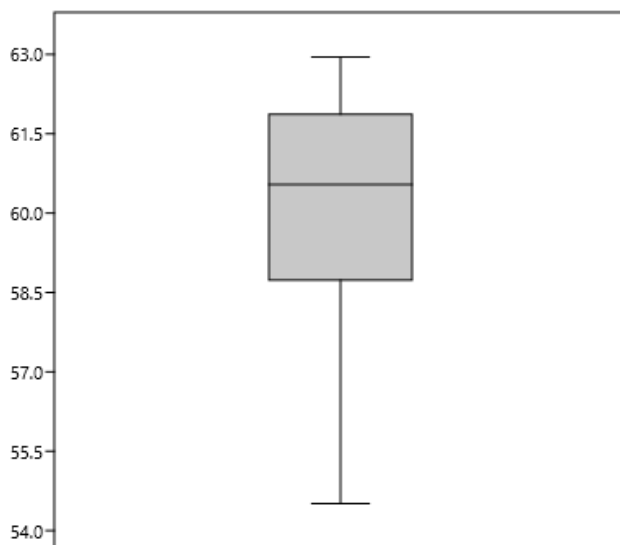
Figura 14- Gráfico Boxplot Carregamento na Floresta (Pentatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 14, é possível verificar o gráfico do processo Carregamento na Floresta do caminhão Pentatrem e não foram identificados outliers nessa etapa.

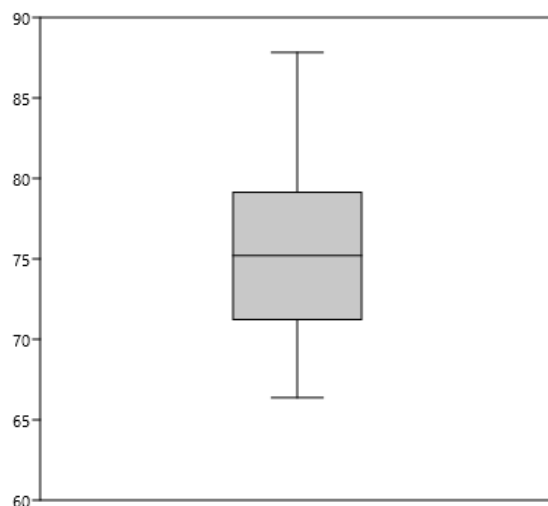
Figura 15- Gráfico Boxplot Carregamento na Floresta (Megatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 15, é possível verificar o gráfico do processo Carregamento na Floresta do caminhão Megatrem e, igualmente ao Pentatrem, não foram identificados outliers nessa etapa.

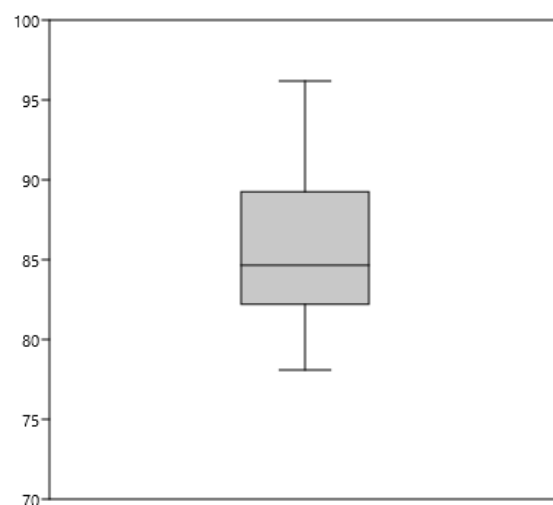
Figura 16- Gráfico Boxplot Deslocamento até a Fabrica (Pentatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 16, é possível verificar o gráfico do processo Deslocamento até a Fabrica do caminhão Pentatrem e não foram identificados outliers nessa etapa.

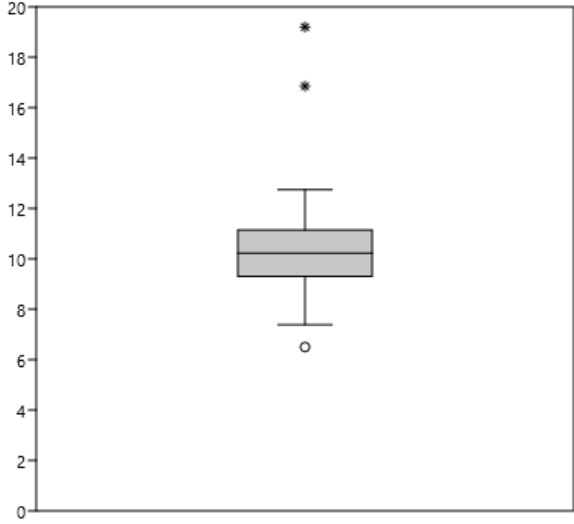
Figura 17- Gráfico Boxplot Deslocamento até a Fabrica (Megatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 17, é possível verificar o gráfico do processo Deslocamento até a Fabrica do caminhão Megatrem e não foram identificados outliers nessa etapa, assim como o Pentatrem.

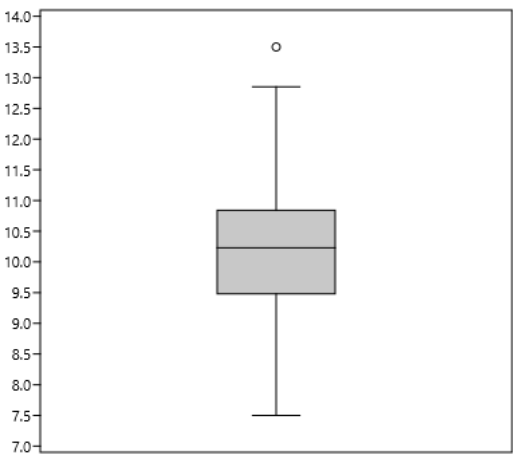
Figura 18- Gráfico Boxplot Tempo na Balança (Pentatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 18, é possível verificar o gráfico do processo Tempo na Balança do caminhão Pentatrem e foram observados dois outliers: 19,2 e 16,85 minutos. Esses pontos fora da normalidade podem ser justificados como um momento adverso de troca de turno na balança ou dificuldade na checagem da documentação a ser apresentada no momento da pesagem.

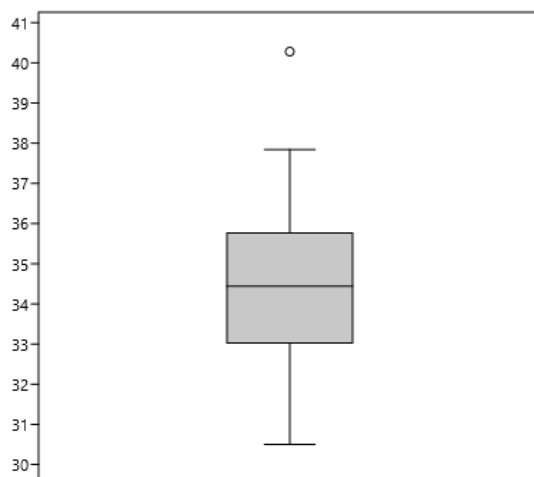
Figura 19- Gráfico Boxplot Tempo na Balança (Megatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 19, é possível verificar o gráfico do processo Tempo na Balança do caminhão Megatrem e não foram identificados outliers nessa etapa, apenas um ponto com uma certa distância dos demais.

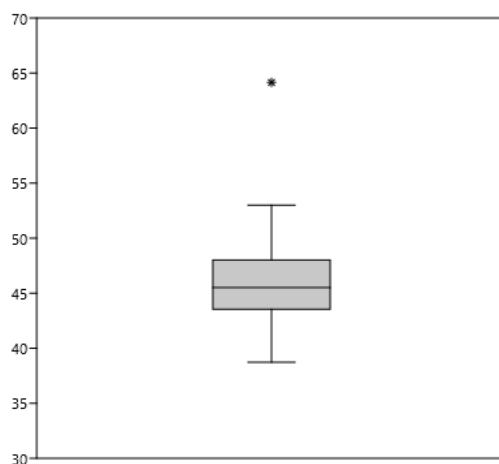
Figura 20- Gráfico Boxplot Tempo de Descarregamento (Pentatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 20, é possível verificar o gráfico do processo Tempo de Descarregamento do caminhão Pentatrem e não foram identificados outliers nessa etapa, apenas um ponto com uma certa distância dos demais.

Figura 21- Gráfico Boxplot Tempo de Descarregamento (Megatrem)



Fonte: Autoria própria (2026)

Na figura 21, é possível verificar o gráfico do processo Tempo de Descarregamento do caminhão Megatrem e foi identificado um outlier nessa etapa: 64,15 minutos. Esse ponto fora da normalidade pode indicar uma troca de turno ou alguma falha na grua.

Vale salientar que, para melhor replicação do cenário atual de todo o processo de carregamento e transporte de madeiras da fábrica analisada, foram retirados os outliers apontados pelo Software Past e utilizados apenas os dados sem esses pontos, pois eles não caracterizam o sistema, sendo apenas uma anormalidade ocasional.

3.4 Distribuição de Dados com Input Analyzer

A etapa seguinte, após o tratamento com o software Past, consistiu em compreender como os dados comportam-se, por meio da análise do histograma correspondente, para definir qual forma de distribuição assemelha-se melhor com os dados analisados. Entre as formas de distribuição estatística, o histograma pode caracterizar-se com a Triangular, Normal, Exponencial, Lognormal, dentre outras.

Para realizar essa identificação dos histogramas, foi utilizado o Input Analyzer, que é uma ferramenta do software Arena e que permite determinar a distribuição de probabilidade que melhor representa um conjunto de dados brutos coletados. A ferramenta opera gerando histogramas de frequência a partir de dados importados e sobrepondo curvas teóricas para identificar os padrões de comportamento. Uma vantagem dessa ferramenta é que a sobreposição das curvas (curve fitting) pode ser feita de maneira manual ou automática, ficando a critério de quem está realizando a análise decidir qual método utilizar.

Para validar estatisticamente a aderência de uma distribuição aos dados reais, também chamada de goodness-of-fit, a ferramenta conta com teste de hipótese clássicos, como o teste de Qui-Quadrado e o Kolmogorov-Smirnov. Todavia, apesar desses teste verificarem a validade estatística de uma distribuição, eles não indicam qual a melhor representação visual dos dados, ou seja, a curva que tem mais aderência com o que está sendo analisado. Nesse sentido, para auxiliar nessa decisão, o Input Analyzer utiliza o Erro Quadrático (Mean Square Error- MSE) como critério para rankear as distribuições, analisando as diversas famílias de curvas, ajustando os parâmetros e calculando o erro para cada uma delas. Dessa forma, a curva que apresentar o menor valor do Erro Quadrático é considerada a que tem mais aderência aos dados empíricos que estão sendo analisados, já que esse parâmetro corresponde à “área vazia” entre a curva e as barras dos dados.

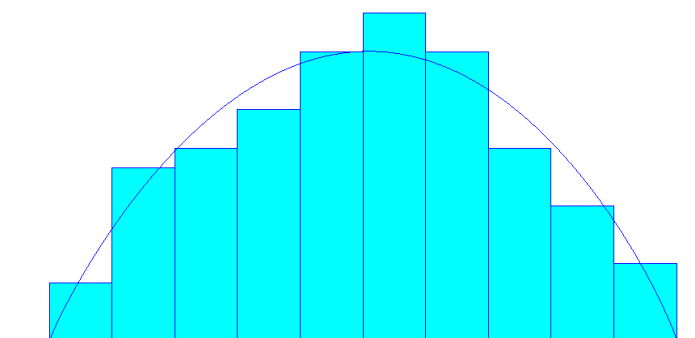
Em suma, o Input Analyzer foi utilizado neste trabalho para garantir que as etapas do

processo, desde o Deslocamento até o Talhão até o Tempo de Descarregamento, sejam bem representadas pelas expressões adequadas e para fornecer uma base consolidada de dados coerentes com o cenário real estudado.

A seguir, será evidenciado as melhores distribuições estatísticas para cada parte do processo, bem como a imagem do gráfico e seus detalhes, a expressão determinada e o erro quadrático da mesma. Os gráficos serão apresentados de tal forma que o eixo X e Y serão, respectivamente, o intervalo de dados e a frequência que eles aparecem.

A figura 22 corresponde ao gráfico da etapa Deslocamento até o Talhão do caminhão Pentatrem.

Figura 22- Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Pentatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 23 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa anterior. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Beta, com um MSE de 0,001609.

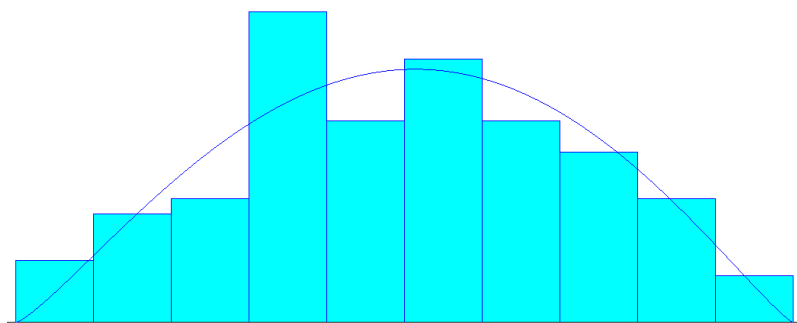
Figura 23- Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Pentatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$50 + 16 * \text{BETA}(1.91, 1.88)$
Square Error:	0.001609
Chi Square Test	
Number of intervals	= 8
Degrees of freedom	= 5
Test Statistic	= 1.14
Corresponding p-value	> 0.75
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0389
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 102
Min Data Value	= 50.1
Max Data Value	= 65.5
Sample Mean	= 58.1
Sample Std Dev	= 3.66
Histogram Summary	
Histogram Range	= 50 to 66
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 24 corresponde ao gráfico da etapa Deslocamento até o Talhão do caminhão Megatrem.

Figura 24- Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Megatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 25 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Beta, com um MSE de 0.005629.

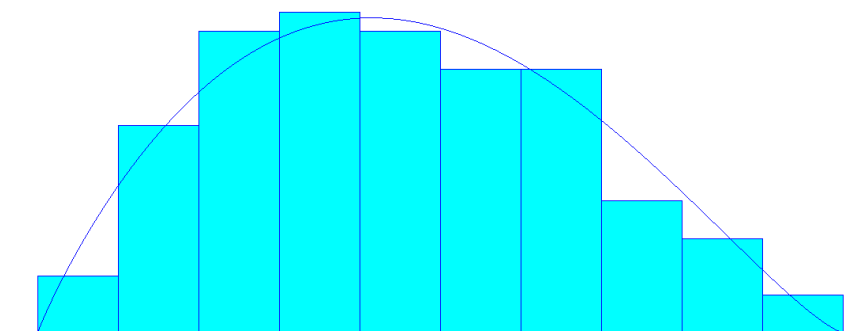
Figura 25- Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até o Talhão (Megatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$50 + 25 * \text{BETA}(2.26, 2.19)$
Square Error:	0.005629
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 3
Test Statistic	= 3.29
Corresponding p-value	= 0.368
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0662
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 104
Min Data Value	= 50.8
Max Data Value	= 74.5
Sample Mean	= 62.5
Sample Std Dev	= 5.59
Histogram Summary	
Histogram Range	= 50 to 75
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 26 corresponde ao gráfico da etapa Carregamento na Floresta do caminhão Pentatrem.

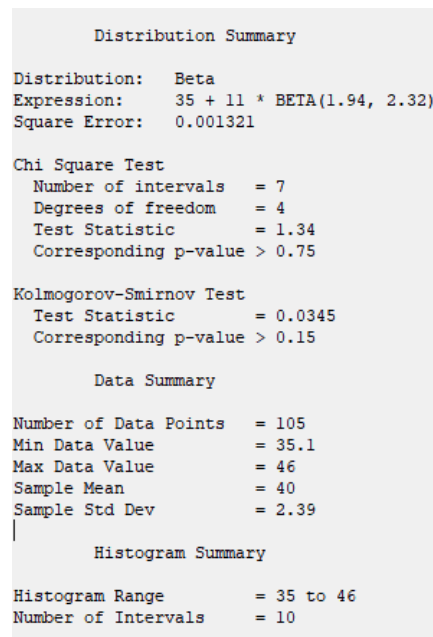
Figura 26- Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Pentatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 27 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Beta com um MSE de 0.001321.

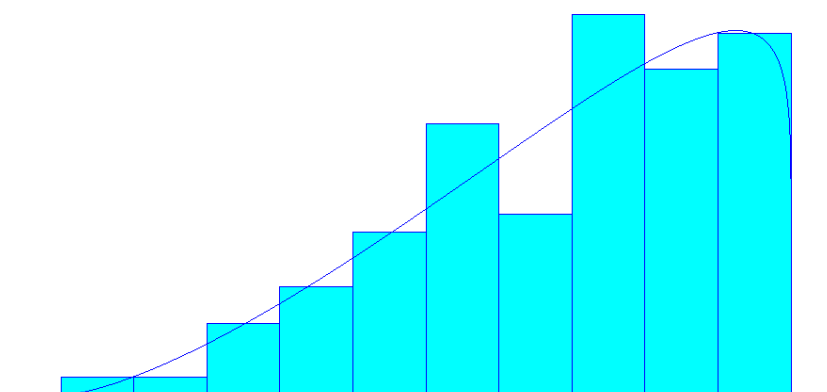
Figura 27- Legenda da Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Pentatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 28 corresponde ao gráfico da etapa Carregamento na Floresta do caminhão Megatrem.

Figura 28- Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Megatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 29 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Beta, com um

MSE de 0.004492.

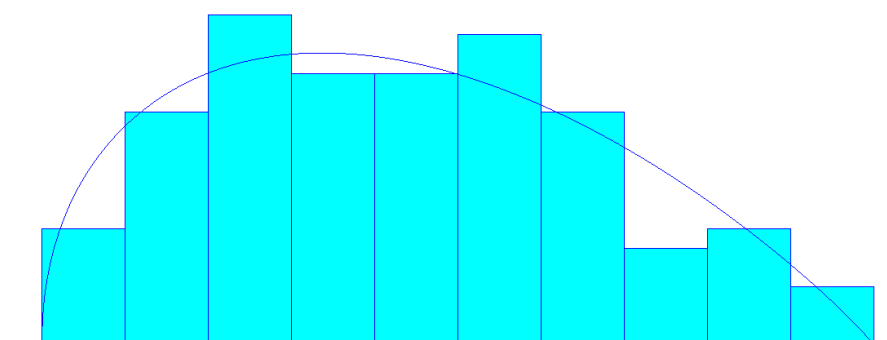
Figura 29- Legenda da Distribuição Estatística- Carregamento na Floresta (Megatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$54 + 9 * \text{BETA}(2.46, 1.12)$
Square Error:	0.004492
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 3
Test Statistic	= 2.96
Corresponding p-value	= 0.415
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0314
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 105
Min Data Value	= 54.5
Max Data Value	= 63
Sample Mean	= 60.2
Sample Std Dev	= 1.96
Histogram Summary	
Histogram Range	= 54 to 63
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 30 corresponde ao gráfico da etapa Deslocamento até à Fábrica do caminhão Pentatrem.

Figura 30- Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Pentatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 31 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada

anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Beta com um MSE de 0.003218.

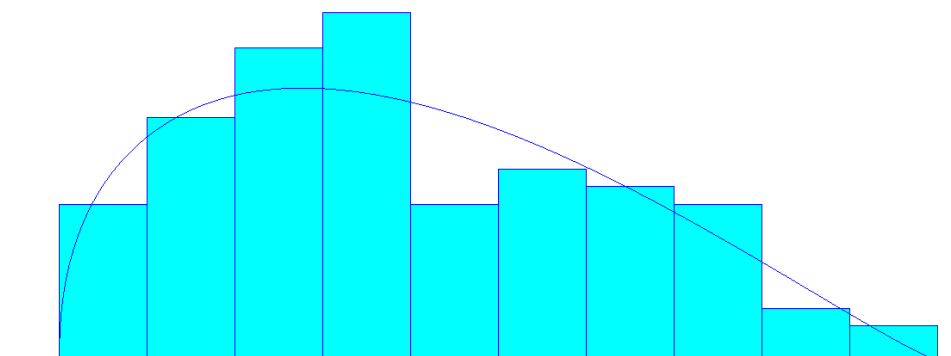
Figura 31- Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Pentatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$66 + 22 * \text{BETA}(1.47, 1.93)$
Square Error:	0.003218
Chi Square Test	
Number of intervals	= 7
Degrees of freedom	= 4
Test Statistic	= 2.93
Corresponding p-value	= 0.575
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0498
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 105
Min Data Value	= 66.4
Max Data Value	= 87.8
Sample Mean	= 75.5
Sample Std Dev	= 5.2
Histogram Summary	
Histogram Range	= 66 to 88
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 32 corresponde ao gráfico da etapa Deslocamento até à Fábrica do caminhão Megatrem.

Figura 32- Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Megatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 33 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada

anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Beta com um MSE de 0.005559.

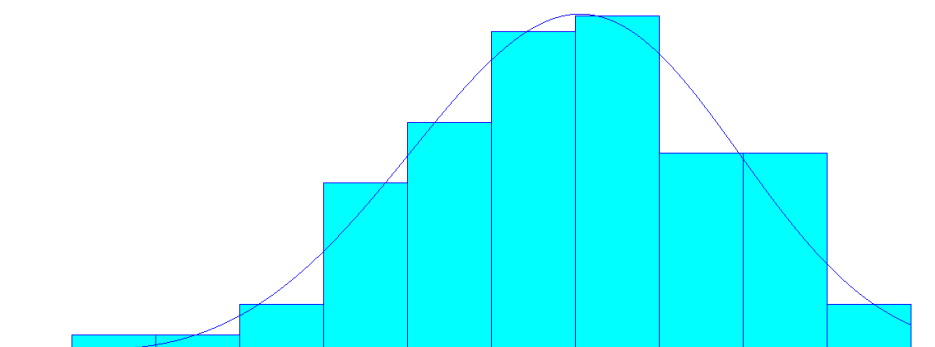
Figura 33- Legenda da Distribuição Estatística- Deslocamento até à Fábrica (Megatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$78 + 19 * \text{BETA}(1.44, 2.16)$
Square Error:	0.005559
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 3
Test Statistic	= 4.16
Corresponding p-value	= 0.247
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0784
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 105
Min Data Value	= 78.1
Max Data Value	= 96.2
Sample Mean	= 85.6
Sample Std Dev	= 4.38
Histogram Summary	
Histogram Range	= 78 to 97
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 34 corresponde ao gráfico da etapa Tempo na Balança do caminhão Pentatrem.

Figura 34- Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Pentatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 35 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Weibull com um

MSE de 0.003119.

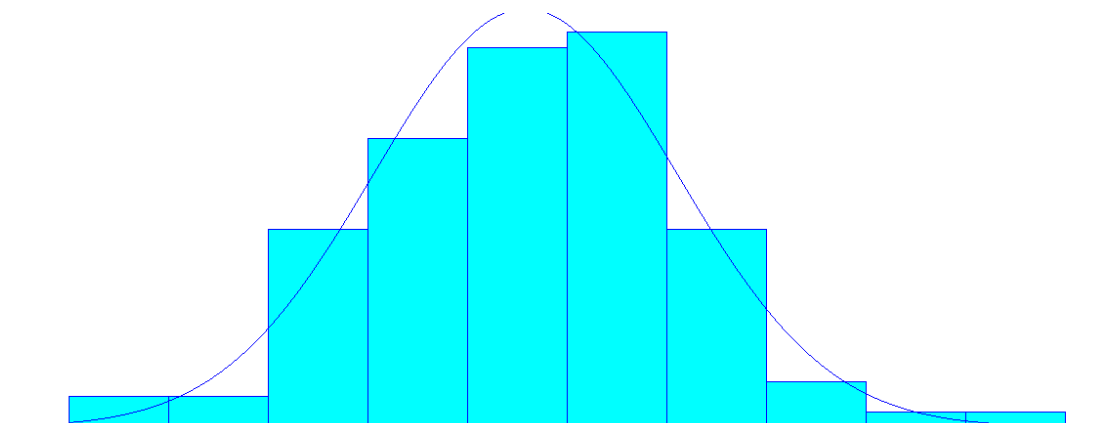
Figura 35- Legenda da Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Pentatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Weibull
Expression:	6 + WEIB(4.62, 3.7)
Square Error:	0.003119
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 3
Test Statistic	= 1.89
Corresponding p-value	= 0.603
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0446
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 103
Min Data Value	= 6.5
Max Data Value	= 12.7
Sample Mean	= 10.2
Sample Std Dev	= 1.28
Histogram Summary	
Histogram Range	= 6 to 13
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autorial Própria (2026)

A figura 36 corresponde ao gráfico da etapa Tempo na Balança do caminhão Megatrem.

Figura 36- Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Megatrem)



Fonte: Autorial Própria (2026)

Já a figura 37 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada

anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Normal com um MSE de 0.002875

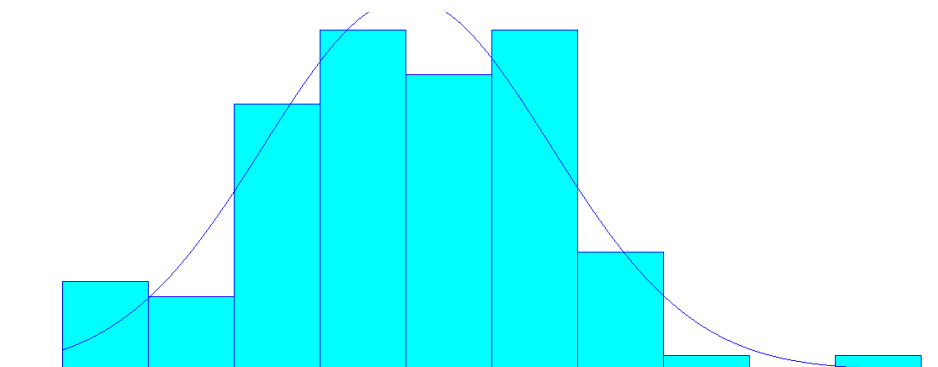
Figura 37- Legenda da Distribuição Estatística- Tempo na Balança (Megatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(10.2, 1.06)
Square Error:	0.002875
Chi Square Test	
Number of intervals	= 5
Degrees of freedom	= 2
Test Statistic	= 1.03
Corresponding p-value	= 0.611
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0384
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 105
Min Data Value	= 7.5
Max Data Value	= 13.5
Sample Mean	= 10.2
Sample Std Dev	= 1.07
Histogram Summary	
Histogram Range	= 7 to 14
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 38 corresponde ao gráfico da etapa Tempo de Descarregamento do caminhão Pentatrem.

Figura 38- Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Pentatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 39 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Normal com um MSE de 0.007253.

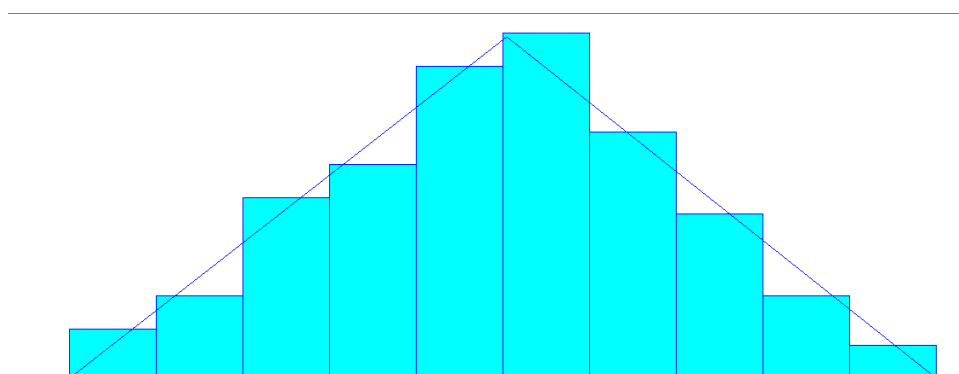
Figura 39- Legenda da Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Pentatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(34.4, 1.83)
Square Error:	0.007253
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 3
Test Statistic	= 3.89
Corresponding p-value	= 0.282
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0513
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 105
Min Data Value	= 30.5
Max Data Value	= 40.3
Sample Mean	= 34.4
Sample Std Dev	= 1.84
Histogram Summary	
Histogram Range	= 30 to 41
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

A figura 40 corresponde ao gráfico da etapa Tempo de Descarregamento do caminhão Megatrem.

Figura 40- Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Megatrem)



Fonte: Autoria Própria (2026)

Já a figura 41 é referente à legenda da Distribuição Estatística da etapa supracitada anteriormente. Como é possível verificar, a distribuição que mais adequou-se foi a Triangular com um MSE de 0.001067.

Figura 41- Legenda da Distribuição Estatística- Tempo de Descarregamento (Megatrem)

Distribution Summary	
Distribution:	Triangular
Expression:	TRIA(38, 45.6, 53)
Square Error:	0.001067
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 4
Test Statistic	= 0.62
Corresponding p-value	> 0.75
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0486
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 104
Min Data Value	= 38.7
Max Data Value	= 53
Sample Mean	= 45.5
Sample Std Dev	= 3.05
Histogram Summary	
Histogram Range	= 38 to 53
Number of Intervals	= 10

Fonte: Autoria Própria (2026)

Vale ressaltar que as expressões das distribuições encontradas foram utilizadas nos blocos de Processo do software Arena para o modelo analisado.

3.5 Modelagem e Simulação com o software Arena

Após a aquisição das expressões das distribuições estatísticas dos dados, a etapa seguinte foi a modelagem e simulação no software Arena. A construção dos modelos na aplicação baseia-se em uma construção visual de fluxogramas, em que a lógica do processo é desenhada por meio da conexão de blocos pré-definidos.

O software Arena foi escolhido por sua consolidação, robustez e versalidade na área de

Engenharia, sendo amplamente reconhecido como uma ferramenta de referência para a Simulação de Eventos Discretos (SED). Para essa modelagem, foi utilizado o modelo acadêmico do software, na versão 14.7, o que possibilitou toda a simulação de maneira gratuita e eficiente, fornecendo os resultados necessários para uma análise aprofundada.

A modelagem conceitual com o Arena utilizou os seguintes blocos: Create, Decide, Process, Dispose e Assign. Com esses recursos, é possível desenvolver e arquitetar grande parte das simulações, já que esses blocos são o pilar do software.

- Bloco Create

Esse bloco é o ponto de partida do fluxo da simulação e responsável por gerar as entidades do processo, como caminhões, peças, clientes, dentre outros. É possível configurar a quantidade de entidades, o intervalo de chegada e a distribuição estatística que rege as chegadas.

- Bloco Decide

A função do módulo Decide é controlar o fluxo das entidades, coordenando-as com base nas regras pré-definidas para que elas sigam os diferentes caminhos da simulação. Vale ressaltar que a forma de decisão pode ser Probabilística ou Condicional e as decisões são, geralmente, baseadas em “verdadeiro” ou “falso”.

- Bloco Process

A função principal desse bloco é representar a execução das atividades operacionais que consomem tempo de simulação, como pesagem, carregamento e descarregamento. Esse módulo é responsável por categorizar os tempos gastos em cada atividade para serem base para os cálculos estatísticos fornecidos no relatório fornecido pelo Arena.

- Bloco Dispose

O bloco Dispose é responsável por encerrar o fluxo lógico das entidades dentro de um modelo de simulação. Conceitualmente ele atua como o “nó de saída” (sink node) do sistema, delimitando o fim do ciclo de vida das entidades geradas e processadas anteriormente.

- Bloco Assign

O bloco Assign é utilizado para atribuir novos valores a variáveis, atributos de entidades, tipos de entidades ou outras variáveis de sistema durante a execução do modelo. Dessa forma, geralmente esse módulo é utilizado como controlador lógico, com o intuito de aumentar a rastreabilidade de métricas individuais e atualizar as variáveis globais que monitoram o desempenho do sistema em tempo real.

Esses blocos constituem a base das simulações do software Arena e grande parte das modelagens podem ser feitas utilizando exclusivamente as suas funções. Após a modelagem conceitual e visual do processo a ser simulado, o software converte o fluxograma lógico em um código de linguagem de simulação baseado na linguagem SIMAN, criada em 1980.

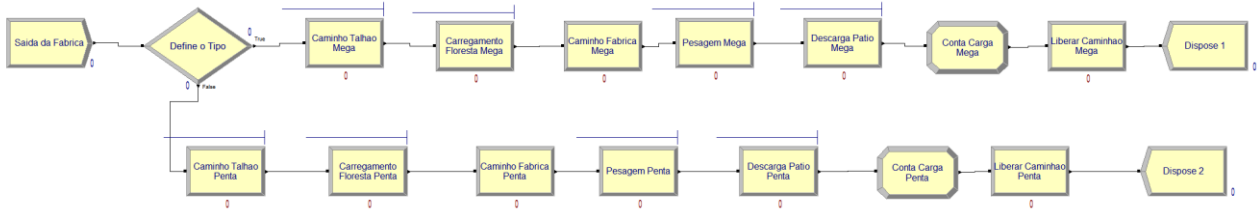
Essa linguagem divide a simulação em dois tipos de arquivos: .mod e .exp. O primeiro é o frame do modelo, que define a lógica física e o fluxo das entidades, e, em uma modelagem, os blocos lógicos Create, Process e Dispose são processados nesse arquivo. Já o arquivo .exp compila os elementos de dados, como Resource, Entity e Schedule. Nesse sentido, a linguagem vincula esses dois arquivos para criar o executável da simulação, possibilitando uma flexibilidade considerável ao dar a liberdade de alterar os parâmetros da modelagem, sem a necessidade de reescrever todo o código.

Para realizar a simulação dos modelos AS IS e TO BE, todos os dados foram coletados em minutos e, posteriormente tratados no software Past. Além disso, para parametrizar os blocos Process da simulação, os dados foram submetidos à ferramenta Input Analyzer para que fosse possível obter a melhor distribuição estatística e a expressão para cada conjunto de dados coletados.

Dessa maneira, para poder efetuar uma comparação do cenário AS IS (4 pentatrens e 1 megatrem) com o TO BE (5 megatrens), foi realizada duas simulações no software Arena, com o objetivo de coletar as informações fornecidas pelos relatórios de simulação para análise comparativa. Vale ressaltar que além das comparações referentes a quantidade de fretes, tempo de fila e taxa de uso, também analisou-se o custo a médio e longo prazo para a empresa, bem como os impactos financeiros da mudança para um dos cenários.

A imagem a seguir mostra o fluxograma do processo AS IS no Arena, com a modelagem composta pelos blocos básicos do software. Vale salientar que esse modelo serviu, também, para os dois cenários TO BE, com a distinção somente das configurações de cada bloco.

Figura 42- Fluxograma do modelo AS IS/ TO BE no software Arena



Fonte: Autoria Própria (2026)

Para essa simulação, foi necessário considerar alguns pontos:

- Expressões dos blocos Process- Caminhão Tipo Pentatrem:
 - Caminho Talhão Penta: $50 + 16 * \text{BETA}(1.91, 1.88)$;
 - Carregamento Floresta Penta: $35 + 11 * \text{BETA}(1.94, 2.32)$;
 - Caminho Fábrica Penta: $66 + 22 * \text{BETA}(1.47, 1.93)$;
 - Pesagem Penta: $6 + \text{WEIB}(4.62, 3.7)$;
 - Descarga Patio Penta: $\text{NORM}(34.4, 1.83)$;

- Expressões dos blocos Process- Caminhão Tipo Megatrem:
 - Caminho Talhão Mega: $50 + 25 * \text{BETA}(2.26, 2.19)$;
 - Carregamento Floresta Mega: $54 + 9 * \text{BETA}(2.46, 1.12)$;
 - Caminho Fábrica Mega: $78 + 19 * \text{BETA}(1.44, 2.16)$;
 - Pesagem Mega: $\text{NORM}(10.2, 1.06)$;
 - Descarga Patio Mega: $\text{TRIA}(38, 45.6, 53)$;

Para respeitar a regra de saída de 2 caminhões a cada 2 horas, o modelo elaborado considerou “Pedidos de Carregamento de Madeira”, emitidos no tempo determinado, que necessitam de 1 caminhão disponível para serem executados. Após a descarga do material no processo do Pátio de Madeiras, o caminhão é liberado e volta a circular, após 3 minutos.

Dessa forma, os recursos utilizados para essa modelagem são:

- 1 Frota_Mega: representa o único caminhão Megatrem;
- 4 Frota_Penta: representa as 4 unidades da caminhão Pentatrem;
- 2 Grua_Floresta: representa as 2 garras de carregamento na floresta;
- 1 Balanca: representa a única balança da fábrica;
- 1 Grua_Patio: representa a garra que descarrega os caminhões no Pátio de Madeiras;

Para o processo TO BE foram feitas diversas simulações e estabelecido dois cenários que fariam mais sentido para garantir o equilíbrio e produtividade do processo. A seguir, será apresentado o modelo TO BE, que abrange os dois cenários escolhidos, com a distinção apenas da configuração dos blocos e dos recursos particulares de cada um. Dessa forma, com o modelo a seguir pôde ser empregada a análise comparativa dos arranjos, garantindo consistência metodológica e permitindo avaliação dos impactos decorrentes apenas da variação dos recursos.

Essa modelagem respeita o mesmo princípio do modelo AS IS, em que os “Pedidos de Carregamento de Madeira” saem a cada 2 horas, utilizando os caminhões “Frota_Mega” como recurso obrigatório para que o processo percorra a simulação.

Para o Cenário 1, foi considerado os seguintes recursos:

- 2 Frota_Mega: representa dois caminhões do tipo Megatrem;
- 3 Frota_Penta: representa as 3 unidades da caminhão Pentatrem;
- 2 Grua_Floresta: representa as 2 garras de carregamento na floresta;
- 1 Balanca: representa a única balança da fábrica;
- 1 Grua_Patio: representa a garra que descarrega os caminhões no Pátio de Madeiras;

Vale ressaltar que no bloco Decide “Define o Tipo”, foi utilizado o 2-way-by-Chance, definindo que 30% dos Pedidos de Carregamento de Madeira fossem direcionados para os caminhões Megatrem e 70% para os Pentatrens.

Para o Cenário 2, foi considerado os seguintes recursos:

- 5 Frota_Mega: representa os cinco caminhões do tipo Megatrem;
- 2 Grua_Floresta: representa as 2 garras de carregamento na floresta;

- 1 Balanca: representa a única balança da fábrica;
- 1 Grua_Patio: representa a garra que descarrega os caminhões no Pátio de Madeiras;

Nesse sentido, o bloco Decide “Define o Tipo”, foi utilizado o 2-way-by-Chance, definindo que 100% dos Pedidos de Carregamento de Madeira fossem direcionados para os caminhões Megatrem e 0% para os Pentatrens. Nesse cenário, exclusivamente, essa lógica poderia ser retirada, pois todos os pedidos seriam para apenas um tipo de recurso, mas optou-se por manter a configuração para demonstrar como a mesma modelagem e simulação pode ser utilizada para diversas análises.

Outro ponto importante de ser salientado é o processo de interrupção da simulação, que optou-se por colocar uma condição que assemelhasse o máximo possível com o processo real de carregamento da fábrica analisada. Com isso, para que a simulação tivesse uma condição de finalização, foi desenvolvida uma lógica que conta a carga de cada tipo de caminhão e acrescenta à uma variável, que, ao atingir o valor médio de toneladas de um talhão (10.000 tons), interrompe o processo e finaliza a simulação.

Por fim, vale pontuar que os dois blocos Dispose encerram o Pedido de Carregamento de Madeira e liberam os recursos das Frotas dos caminhões que estavam sendo utilizados, para que eles possam voltar ao começo do processo e serem utilizados novamente na simulação. Além disso, os blocos “Liberar Caminhão Penta” e “Liberar Caminhão Mega” foram inseridos no processo para representar o tempo de deslocamento que os veículos gastam para retornar à portaria e serem inseridos no início do processo, com o intuito de tornar a simulação mais similar com a realidade do processo.

4 Resultados e Discussões

Para melhor análise dos resultados obtidos, essa sessão foi dividida em 4 partes, explicitando os resultados do processo AS IS, TO BE- 1, TO BE- 2 e TO BE- Outros Cenários. Nesse sentido, serão mostrados os resultados da Simulação de Eventos Discretos, obtidos por meio do software Arena, a respeito do processo de transporte de madeiras da fábrica de celulose não-solúvel, localizada em Indianópolis- MG. É importante salientar que todos os dados apresentados são valores médios fornecidos pelo relatório do software Arena.

4.1 Resultados da modelagem do Cenário AS IS

- **Desempenho Geral do Sistema**
 - **Number Out (nº de Pedidos de Carregamento Processados):** 65;
 - **Tempo Total:** 5,44 horas;
 - **Tempo de Espera:** 1,61 horas;
 - **Work In Progress (WIP):** 5,4249 caminhões;

- **Utilização dos Recursos** (Instantaneous Utilization- Indica a porcentagem do tempo em que o recurso esteve ocupado):
 - **Frota_Mega:** 89,35%
 - **Frota_Penta:** 77,75%
 - **Grua_Pátio:** 57,61%
 - **Grua_Floresta:** 36,41%
 - **Balança:** 15,89%

- **Total Seized-** Indica quantas vezes o recurso foi utilizado:
 - **Frota_Mega:** 14 vezes;
 - **Frota_Penta:** 56 vezes;

- **Grua_Pátio:** 66 vezes;
- **Grua_Floresta:** 70 vezes;
- **Balança:** 66 vezes;

- **Fila com maior tempo de espera:**
 - **Caminho Talhão Mega:** 6,5 horas;
 - **Descarga Pátio Penta:** 15,89 minutos;
 - **Caminho Talhão Penta:** 8,43 minutos;

4.2 Resultados da modelagem do Cenário TO BE- 1

- **Desempenho Geral do Sistema**
 - **Number Out (nº de Pedidos de Carregamento Processados):** 63;
 - **Tempo Total:** 5,18 horas;
 - **Tempo de Espera:** 1,22 horas;
 - **Work In Progress (WIP):** 5,4249 caminhões;

- **Utilização dos Recursos** (Instantaneous Utilization- Indica a porcentagem do tempo em que o recurso esteve ocupado):
 - **Frota_Mega:** 84,28%
 - **Frota_Penta:** 76,87%
 - **Grua_Pátio:** 60,51%
 - **Grua_Floresta:** 38,48%
 - **Balança:** 16,02%

- **Total Seized-** Indica quantas vezes o recurso foi utilizado:
 - **Frota_Mega:** 26 vezes;

- **Frota_Penta:** 41 vezes;
 - **Grua_Pátio:** 64 vezes;
 - **Grua_Floresta:** 66 vezes;
 - **Balança:** 64 vezes;
- **Fila com maior tempo de espera:**
 - **Caminho Talhão Mega:** 1,8 horas;
 - **Caminho Talhão Penta:** 32,72 minutos;
 - **Descarga Pátio Penta:** 10,59 minutos;

4.3 Resultados da modelagem do Cenário TO BE- 2

- **Desempenho Geral do Sistema**
 - **Number Out (nº de Pedidos de Carregamento Processados):** 57;
 - **Tempo Total:** 4,77 horas;
 - **Tempo de Espera:** 0,34 horas;
 - **Work In Progress (WIP):** 4,67 caminhões;
- **Utilização dos Recursos** (Instantaneous Utilization- Indica a porcentagem do tempo em que o recurso esteve ocupado):
 - **Frota_Mega:** 89,57 %
 - **Frota_Penta:** 0 %
 - **Grua_Pátio:** 70,96 %
 - **Grua_Floresta:** 49,22%
 - **Balança:** 16,21 %
- **Total Seized-** Indica quantas vezes o recurso foi utilizado:

- **Frota_Mega:** 62 vezes;
 - **Frota_Penta:** 0 vezes;
 - **Grua_Pátio:** 58 vezes;
 - **Grua_Floresta:** 61 vezes;
 - **Balança:** 58 vezes;
- **Fila com maior tempo de espera:**
 - **Caminho Talhão Mega:** 0,19 horas;

4.4 Discussões

Como foi supracitado, foram explicitadas 3 simulações para melhor esboçar o atual contexto e as oportunidades de melhoria do processo de carregamento de madeira estudados. Como o caso de estudo busca constatar a viabilização em alterar a frota dos pentatrens para os megatrens, foram testados diversos cenários para entender o comportamento do sistema, os quais serão explicados a seguir.

O primeiro cenário, apresentado no item 4.1, representa a configuração base do sistema atual, em que há uma frota mista de caminhões: 1 caminhão do tipo megatrem e 4 caminhões do tipo pentatrem. A regra do bloco de despacho Dispose “Define o Tipo” direcionou 20% das ordens de carregamento de madeira para o caminhão megatrem e 80% para os caminhões do tipo pentatrem, repetindo a proporcionalidade numérica da frota. Outro ponto importante de ser salientado, é que o “Time Between Arrivals” foi fixado em 2 horas, já que é esse o intervalo de saída dos caminhões da fábrica. É importante ressaltar que, para fazer o carregamento e o transporte de um talhão com aproximadamente 10.000 toneladas, o relatório do software Arena indicou que foram necessárias cerca de 65 viagens.

Nesse sentido, após realizar a simulação e analisar os resultados do desempenho, foi possível identificar que há um desequilíbrio crítico entre o desempenho dos dois tipos de veículos: o megatrem apresentou-se como gargalo restritivo do sistema, já que mostrou ter uma taxa de utilização de 89,35%, mostrando que está em uso em, aproximadamente, 90% do tempo. Esse resultado mostra que o Lead Time (tempo de ciclo) desse veículo é consideravelmente grande e

oferece certo risco operacional, pois a alta percentagem de ocupação ocasiona na formação de filas severas no processo de despacho dos megatrens, além de que, caso haja alguma intercorrência, como manutenção programada, fará com que o sistema seja impactado por completo, com a ausência de um dos caminhões.

Em contraste, a frota de 4 pentatrens opera com certa folga, com a taxa de utilização em 77,75%, mostrando que possui certa estabilidade e que essa frota consegue balancear entre produtividade e margem para manutenções ou imprevistos. O tempo médio de fila desses veículos foi consideravelmente baixo, explicitando que essa frota consegue suprir a emissão dos “Pedidos de Carregamento de Madeira” e o volume de carga atribuída a esse modal.

Ademais, os outros recursos, como a Grua Floresta, Balança e Grua Pátio, apresentaram baixas taxas de utilização, demonstrando que não estão sobrecarregadas e que conseguem tratar com tranquilidade a carga que chega para ser processada. Somado a isso, é importante salientar que, por terem a taxa de utilização baixas, esses recursos mostram que caso haja aumento na demanda, não haveria problemas, já que a ociosidade suportaria o acréscimo do Pedidos de Carregamento de Madeira.

Dessa forma, com os pontos citados, percebe-se que há bastantes oportunidades de melhorias do processo de Carregamento de Madeiras, principalmente na gestão da frota para melhor aproveitamento dos recursos. A seguir, será apresentado, em formato de tabela, os dados coletados a partir do relatório extraído do Arena.

Tabela 2- Resumo dos resultados cenário AS IS.

Categoria	Indicador	Recurso/ Local	Valor Médio
Frota	Taxa de Ocupação (Utilization)	Frota Megatrem (1 un.)	89,35%
		Frota Pentatrem (4 un.)	77,75%
Filas	Tempo Médio de Espera	Despacho Megatrem	390,15 min
		Despacho Pentatrem	8,43 min
Infraestrutura	Taxa de Ocupação	Grua Floresta (2 un.)	36,41%
		Grua Pátio (1 un.)	57,61%
		Balança	15,89%

Fonte: Autoria própria

O cenário TO BE- 1, visou melhorar as taxas de ocupação e, para isso, foi simulado o processo com 2 veículos megatrem e 3 veículos pentatrem. Nesse configuração, o bloco Decide “Define o Tipo” foi recalibrado e direcionou 30% das emissões de pedidos de carregamento para os megatrens e 70% para os pentatrens, já que, dessa forma, o aproveitamento do megatrem mostrou-se mais proveitoso e com menos risco de colapso, caso algum dos modais sofra alguma intercorrência ou necessite de manutenção.

O “Time Between Arrivals” permaneceu em 2 horas e, com isso, a taxa de utilização do megatrem e do pentatrem foram, respectivamente, 84,26% e 76,87%. Nesse contexto, percebe-se que ambas taxas diminuíram e possibilitaram que o megatrem entrasse em uma faixa de utilização aceitável, que suportaria eventuais contratempos. Além disso, é importante salientar que para carregar 10.000 toneladas nessa nova configuração, foram necessárias 63 viagens, o que corresponde a uma diminuição de aproximadamente 3% em relação ao cenário AS IS.

Em relação às demais taxas de utilização dos demais recursos, todos tiveram aumento de trabalho, devido à maior eficiência desse modelo, em comparação ao apresentado anteriormente, porém, como estavam com ociosidade considerável, os valores desse indicador ainda permanecem em uma faixa aceitável, já que a Balança teve 16,02%, a Grua Floresta teve 38,48% e a Grua Pátio teve 60,51%.

É importante ressaltar que esse cenário foi testado visando oferecer uma oportunidade viável financeiramente e que, ainda assim, oferecesse melhora nos indicadores do processo e segurança operacional. Nesse sentido, esse modelo oferece uma alternativa para que a operação seja robusta e resiliente, ao contrário do cenário AS IS, que busca volume máximo de uma forma agressiva e às custas de riscos elevados. Além disso, a depender do CAPEX (Capital Expenditure) disponível, essa seria uma opção interessante a ser considerada, já que o custo é menor do que o do item 4.3.

Tabela 3- Resumo dos resultados cenário TO BE- 1.

Categoria	Indicador	Recurso/ Local	Valor Médio
Frota	Taxa de Ocupação (Utilization)	Frota Megatrem (2 un.)	84,28%
		Frota Pentatrem (3 un.)	76,87%
Filas	Tempo Médio de Espera	Despacho Megatrem	111,68 min
		Despacho Pentatrem	32,72 min
Infraestrutura	Taxa de Ocupação	Grua Floresta (2 un.)	38,48%
		Grua Pátio (1 un.)	60,51%
		Balança	16,02%

Fonte: Autoria própria

Por fim, no cenário TO BE-2, propôs uma reestruturação completa da estratégia logística, substituindo a frota mista original, por uma frota homogênea de 5 unidades do caminhão megatrem, que é capaz de carregar mais carga em relação ao cenário AS IS. Para esta configuração, não há necessidade do bloco Decide “Define o Tipo”, porém, com o intuito de explicitar como a mesma modelagem pode servir para realizar diversos testes, o bloco foi mantido e configurado para que 100% dos Pedidos de Carregamento fossem direcionados para o modal megatrem.

O objetivo da simulação desse cenário foi verificar se, ao padronizar o tipo de veículo, os efeitos seriam promissores ou não, considerando que o megatrem carrega mais carga que o pentatrem. Da mesma maneira que os demais casos, o Time Between Arrivals permaneceu em 2 horas e o resultado da simulação determinou que a taxa de utilização do megatrem é de 89,57%, evidenciando a melhora significativa comparada ao cenário AS IS, já que, caso algum dos veículos sofra alguma intercorrência, o sistema conseguirá suprir a demanda.

Com esse resultado, foi possível perceber que esse percentual de operação representa um nível de alta produtividade, realizando o transporte de 10.000 toneladas em 57 viagens, e que também é abaixo do nível de ruptura (95%). Além disso, um grande indicador de produtividade é a taxa de utilização dos demais recursos, em que a Grua Floresta teve 49,22% de uso, a Balança alcançou 16,21% e a Grua Pátio atingiu 70,96% de utilização e, vale ressaltar, que esses foram os maiores percentuais de utilização desses recursos nos cenários simulados.

Esses números demonstram um cenário bem mais promissor que o AS IS, já que, grandes

ociosidades não são interessantes em processos produtivos, o que também ressalta o quanto esse modelo seria interessante e válido para implementação. Todavia, é necessário ponderar que, para utilizá-lo, seria necessário um alto investimento e disponibilidade de CAPEX, já que seria necessário adquirir 4 caminhões do tipo megatrem.

Tabela 4- Resumo dos resultados cenário TO BE- 2.

Categoria	Indicador	Recurso/ Local	Valor Médio
Frota	Taxa de Ocupação (Utilization)	Frota Megatrem (5 un.)	89,57%
Filas	Tempo Médio de Espera	Despacho Megatrem	11,24 min
Infraestrutura	Taxa de Ocupação	Grua Floresta (2 un.)	49,22%
		Grua Pátio (1 un.)	70,96%
		Balança	16,21%

Fonte: Autoria própria

Além dos cenários apresentados, foram testadas outras hipóteses que mesclavam a quantidade de caminhões da frota mista, alternando as quantidades dos megatrens e dos pentatrens. Todavia, os resultados dessas simulações evidenciaram que seria inviável, para a operação, implantar tais configurações no processo de transporte de madeira, já que mostraram não haver benefícios suficientes para justificar a adoção, seja econômico ou em relação à produtividade. A seguir é possível verificar as outras simulações e um breve resumo dos resultados obtidos.

Tabela 5- Resumo dos resultados dos demais cenários.

Cenário	Configuração	Regra (Decide)	Utilização Mega	Utilização Penta	Tempo Fila Mega	Diagnóstico
Teste 1	2 Mega / 3 Penta	40% / 60%	100,00%	62,93%	Alto / Saturação	Colapso; Megatrem não consegue vencer a demanda.
Teste 2	3 Mega / 2 Penta	60% / 40%	91,15%	72,51%	Alto (Risco)	Arriscado; Fila do megatrem pode crescer rápido.
Teste 3	4 Mega / 1 Penta	80% / 20%	81,99%	88,08%	Baixo / Estável	Produtivo; Pentatrem único sofre com fila.
Teste 4	4 Mega / 1 Penta	85% / 15%	96,75%	40,61%	Crítico / Exponencial	Ruptura; Fila do megatrem muito longa.

Fonte: Autoria própria

Por outro lado, é válido ponderar a relação custo x produtividade, já que, apesar de carregar mais carga, o caminhão megatrem consome mais combustível e, conseqüentemente, possui um custo maior a cada viagem realizada. Nesse sentido, a empresa terceirizada responsável pelo transporte de madeira da fábrica de celulose não-solúvel forneceu os dados de consumo de combustível dos dois tipos de caminhões, bem como o valor gasto em cada viagem, o que facilitou a análise e, posteriormente, a decisão do melhor cenário para possível implantação.

Para realizar a análise comparativa dos custos, estabeleceu-se primeiramente o custo unitário por tonelada, levando em consideração a quantidade média de carga de cada tipo de veículo e o custo por viagem, que foi fornecido pela empresa terceirizada. Dessa forma, foram obtidos os seguintes dados:

- Pentatrem
 - Custo por viagem: R\$ 117,38;
 - Carga média: 146,97 toneladas;
 - Custo unitário:

$$\frac{117,38}{146,97} = \text{R\$ } 0,798 \text{ por tonelada} \quad (1)$$

- Megatrem
 - Custo por viagem: R\$ 163,50;
 - Carga média: 174,97 toneladas;
 - Custo unitário:

$$\frac{163,50}{174,97} = \text{R\$ } 0,934 \text{ por tonelada} \quad (2)$$

Com essas informações, é possível perceber que o megatrem possui um custo de combustível por tonelada transportada 17% maior que o pentatrem. Evidentemente, essa diferença de custos ocorre, pois, apesar de serem da mesma marca de caminhão, o megatrem tem a sua capacidade de carga aumentada e, conseqüentemente, o consumo de combustível.

Ao realizar comparações do custo de transporte de um talhão com cerca de 10.000 toneladas, foi possível verificar que em relação à análise econômica, o cenário AS IS é o que possui o menor custo operacional direto; o cenário TO BE – 1 é o que possui custo intermediário e, por fim, o cenário TO BE- 2 possui o maior custo operacional, em relação ao combustível. Nesse contexto, percebe-se que o critério para definir a escolha da melhor alternativa de implantação, deve basear-se, não só nos custos, mas também no desempenho da operação.

Apesar de o primeiro cenário obter vantagem sendo o de menor custo, com as simulações foi perceptível que o processo é inviável devido ao mau aproveitamento do recurso megatrem, já que ele fica horas ocioso e não consegue ter o seu potencial totalmente aproveitado. O cenário TO BE- 1, levando em consideração o fator econômico e o de produtividade, mostrou-se possuir um excelente custo-benefício, pois, embora o custo por tonelada seja superior ao AS IS, esse modelo opera em uma margem de utilização segura, diminui o número de viagens, melhora consideravelmente os tempos de filas e aumenta a capacidade de volume transportado.

Nesse sentido, o cenário TO BE- 2, apresenta o maior custo operacional de combustível, em relação aos demais, pois, apesar de transportar mais carga, o megatrem possui menor eficiência energética e, conseqüentemente, possui maior custo para mantê-lo operando. Com isso, percebe-se que, para tornar esse cenário viável, é necessário ponderar sobre a maximização de volume e considerar que, para atingir esse objetivo, será necessário mais investimento financeiro para garantir o recorde de volume entregue e maior utilização dos demais recursos.

Tabela 6- Custo total a cada 10.000 toneladas.

Indicador	Cenário AS IS	Cenário TO BE- 1	Cenário TO BE- 2
Mix de Frota (Penta/ Mega)	80% / 20%	70% / 30%	0% / 100%
Custo Médio (R\$/Ton)	R\$ 0,83	R\$ 0,84	R\$ 0,93
Viagens Necessárias (aprox.)	~66 viagens	~65 viagens	~57 viagens
Custo Total Combustível (R\$)	R\$ 8.250,00	R\$ 8.390,00	R\$ 9.344,00
Diferença Financeira	Referência	+1,7 (Baixo Impacto)	+13,2% (Alto Impacto)
Status da Operação	Inviável (Filas)	Viável (Recomendado)	Viável (Maior Custo)

Fonte: Autoria própria

Ademais, analisar a perspectiva de custos em determinado período de tempo também caracteriza-se com uma excelente alternativa para verificar a melhor solução para implantação. Dessa forma, foram ponderadas 3 hipóteses: custo em relação à curto prazo (1 ano), à médio prazo (5 anos) e à longo prazo (10 anos). Nesse sentido, os dados apresentados a seguir estimam cerca de 500.000 toneladas transportadas por ano e confirmam a necessidade de utilizar diversos parâmetros para análise, já que o cenário com menos caminhões megatrem apresentou menor custo e o com mais quantidade de megatrens apresentou maior custo.

Tabela 7- Projeção de custos em 1, 5 e 10 anos.

Cenário	Custo Unitário (R\$/ ton)	Curto Prazo (1 ano)	Médio Prazo (5 anos)	Longo Prazo	Diferença Total (10 anos)
AS IS	R\$ 0,83	R\$ 414,91	R\$ 2.074.523,00	R\$ 4.149.046,00	Referência
TO BE - 1	R\$ 0,85	R\$ 422,27	R\$ 2.111.347,00	R\$ 4.222.694,00	+ R\$ 73.648,00 (+1,8%)
TO BE - 2	R\$ 0,93	R\$ 467,22	R\$ 2.336.115,00	R\$ 4.672.230,00	+R\$ 523.184,00 (+12,6%)

Fonte: Autoria própria

Por fim, outro ponto importante analisado foi a questão do tempo de transporte de cada cenário, uma vez que, apesar de transportar mais carga, o caminhão megatrem demora mais tempo para realizar o seu ciclo. Comparando o “Value Added” (VA Time), que representa o tempo útil de trabalho (viajar + carregar + descarregar), o Cenário TO BE- Caso 1 obteve 237,33 minutos e o

Cenário TO BE- Caso 2 obteve 265,81 minutos, evidenciando uma diferença de 28,5 minutos entre as duas simulações.

Todavia, apesar dessa diferença, o Cenário TO BE- Caso 2 resultou em um Lead Time Total 8% menor que o outro cenário. Isso ocorre devido à maior capacidade de carga do Megatrem , que reduziu a saturação do sistema, diminuindo drasticamente o tempo de espera em filas (Wait Time) de 73 minutos para 20 minutos, possibilitando que o caminhão com maior capacidade carga possa trabalhar sem muitos períodos aguardando sua vez no sistema.

Como foi possível evidenciar com a análise crítica desenvolvida, as duas soluções propostas possuem ônus e bônus para o sistema, mas que, ainda assim, representam uma melhora considerável em relação ao cenário AS IS.

Dessa maneira, a proposta seria, visando adaptação suave e de menor custo, a implementação do Cenário TO BE- 1 e, posteriormente, a implantação do Cenário TO BE- 2, para que seja possível testar e verificar os resultados de maneira gradual, sem grande investimento proveniente do CAPEX da empresa. Com isso, a sugestão é alterar para o modelo com 2 megatrens e permanecer por cerca de 2 a 4 anos, com o intuito de ter tempo hábil para verificar a melhora do sistema e planejar o investimento para a aquisição de mais caminhões do tipo megatrem e implementação posterior do Cenário TO BE- 2.

Dessa maneira, espera-se melhora quase imediata do processo, perceptível pela diminuição dos tempos de filas, melhora da utilização do recurso megatrem, grua floresta, grua pátio e grua balança. Ademais, o volume de carga transportada por viagem será maior, o que conseqüentemente diminuirá a quantidade de viagens por talhão. Tal cenário será essencial caso haja a necessidade de aumento de produção e transporte de madeira da fábrica, pois irá trabalhar de maneira mais otimizada e aproveitando mais os recursos possuídos. Nesse sentido, durante o período estipulado, pode-se planejar e alocar recursos para a completa migração da frota mista para a frota homogênea de megatrens, o que levará o sistema ao seu ponto máximo de produtividade.

5 Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade de otimização do processo logístico de transporte de madeiras de uma floresta até uma fábrica de celulose não-solúvel. Nesse sentido, a utilização de Sistemas de Eventos Discretos mostrou-se de caráter extremamente importante, pois possibilitou simular, não só o cenário atual, como os possíveis cenários para melhoria.

Durante o processo de elaboração desse estudo de caso, foi possível estar em contato com a operação dessa indústria e associar os processos que estavam ocorrendo com os componentes curriculares que foram abordados durante o curso de graduação. Além disso, ao compreender as oportunidades de melhoria, foi extremamente nítido que os conceitos explanados na disciplina de SEDs seriam ideais para verificar a viabilidade de acatar mudanças no processo.

Dessa maneira, com os dados coletados e a implementação do modelo no Arena, os resultados extraídos do relatório da simulação foram valiosos para a análise da situação atual, evidenciando os pontos críticos e os gargalo do sistema. Da mesma maneira, após realizar as devidas alterações, foi possível levantar 2 cenários pertinentes, que trariam certa melhoria para o processo, tanto no quesito produtividade, quanto no quesito viagens realizadas.

Outrossim, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, já que evidenciaram o problema do sistema atual e levantaram formas de melhoria. Além disso, após apresentação e explanação para a empresa responsável pelo transporte de madeiras da fábrica, esse projeto será submetido no programa de inovação da empresa, visando melhor aproveitamento dos recursos da companhia e maior produtividade para a fábrica, que, cada vez mais, tem sua demanda expandida.

Por fim, foi possível salientar com esse projeto o valor inestimável dos conceitos de Simulação de Eventos Discretos, que permitem, com um software de acesso livre e gratuito, simular e projetar processos, apenas com os dados coletados. Nesse sentido, o software Arena mostrou-se extremamente importante e relevante para a atualidade, já que permitiu realizar as devidas simulações, com fácil acesso e relativa facilidade, fornecendo os relatórios e dados necessários para realizar uma análise crítica da situação atual e do cenário a ser implementado.

6 Referências Bibliográficas

ALTIOK, Tayfur; MELAMED, Benjamin. **Simulation modeling and analysis with Arena**. Elsevier, 2010

BANKS, J. et al. **Discrete-Event System Simulation**. (1995).

CHERNIKOVA, O. et al. **Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis**. *Review of Educational Research*, 90 (2020): 499 - 541.

COTO-MILLÁN, P. et al. **Integrating Logistics into Global Production: A New Approach**. *Logistics* (2024)

ERIKSSON, K. et al. **A Case Study Initiating Discrete Event Simulation as a Tool for Decision Making in I4.0 Manufacturing**. (2021): 84-96.

HRIDIN, V. et al. **THE ESSENCE OF SIMULATION MODELING**. *Business Navigator* (2024).

KAMPA, A. et al. **Discrete Event Simulation Method as a Tool for Improvement of Manufacturing Systems**. *Comput.*, 6 (2017): 10.

KARNON, J. et al. **Modeling Using Discrete Event Simulation**. *Medical Decision Making*, 32 (2012): 701 - 711.

KONS, K. et al. **Modelling Dynamics of a Log-Yard through Discrete-Event Mathematics**. *Forests* (2020).

KURGANOV, V et al. **The Study of the Logistics Ontology by the Historical-Genetic Method**. *World of Transport and Transportation* (2023).

LEWICKI, W et al. **Development of a Simulation Model to Improve the Functioning of Production Processes Using the FlexSim Tool.** *Applied Sciences* (2024).

SUSANTO, P et al. **The Role of Logistics in Supporting Domestic Economy and Industrial Growth: A Literature Review Study.** *Siber Journal of Transportation and Logistics* (2025).

TAKO, A et al. **Exploring the model development process in discrete-event simulation: insights from six expert modellers.** *Journal of the Operational Research Society*, 66 (2015): 747-760.

VÁZQUES-SERRANO, J. et al. **Discrete-Event Simulation Modeling in Healthcare: A Comprehensive Review.** *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (2021).

Apêndices

Apêndice A- Dados Deslocamento até o Talhão (Pentatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	55,34	45	96,4	89	53,4
2	62,1	46	57,9	90	61,6
3	58,45	47	59,95	91	56,9
4	51,2	48	54,6	92	58,5
5	59,8	49	61,1	93	52,2
6	57,15	50	56,1	94	63,6
7	63,4	51	60,3	95	54,7
8	54,9	52	52,6	96	60,5
9	92,7	53	58,6	97	57
10	56,25	54	64,8	98	59,3
11	60,1	55	57,3	99	55,5
12	58,9	56	59,7	100	62,9
13	52,45	57	53,2	101	51,7
14	61,3	58	62,5	102	58,4
15	57,8	59	55,4	103	64,1
16	59,05	60	60,6	104	53,9
17	55,6	61	58	105	60,15
18	64,2	62	51,5		
19	50,12	63	63,1		
20	58,75	64	56,7		
21	60,9	65	59,4		
22	53,5	66	54,4		
23	62,8	67	61,9		
24	57,4	68	57,7		
25	88,15	69	60,2		
26	56,8	70	52,9		
27	59,5	71	58,8		
28	54,2	72	65,5		
29	61,7	73	55,8		
30	58,2	74	59,6		
31	55,9	75	53,6		
32	60,4	76	61,5		
33	52,8	77	57,2		
34	63,9	78	60,8		
35	57,6	79	54,8		
36	59,2	80	62,2		
37	51,9	81	56,4		
38	65,1	82	58,3		
39	56,5	83	51,8		
40	60,75	84	64,5		
41	58,1	85	55,1		
42	53,8	86	60		
43	62,4	87	57,5		
44	55,2	88	59,1		

Apêndice B- Dados Deslocamento até o Talhão (Megatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	64,01	45	57,31	89	68,82
2	52,27	46	53,22	90	70,63
3	57,28	47	71,2	91	64,55
4	66,41	48	68,37	92	71,62
5	52,75	49	60,6	93	55,09
6	68,04	50	61,85	94	58,78
7	67,09	51	58,82	95	62,59
8	62,03	52	65,99	96	60,63
9	57,75	53	65,94	97	67,82
10	58,95	54	59,96	98	64,11
11	53,67	55	61,6	99	65,63
12	51,67	56	50,8	100	69,13
13	59,47	57	73,5	101	67,97
14	114,51	58	59,97	102	51,63
15	57,12	59	62,7	103	68,72
16	70,33	60	60,02	104	71,06
17	58,55	61	71,13	105	63,28
18	62,57	62	64,94		
19	70,69	63	68,25		
20	53,99	64	52,61		
21	59,84	65	63,61		
22	69,34	66	66,85		
23	63,38	67	64,27		
24	59,15	68	58,66		
25	58,8	69	62,98		
26	67,05	70	57,3		
27	60,45	71	59,9		
28	56,88	72	66,58		
29	59,48	73	60,69		
30	59,41	74	71,02		
31	67,04	75	57,03		
32	56,54	76	67,76		
33	58,3	77	61,97		
34	69,21	78	61,08		
35	64,41	79	66,93		
36	61,77	80	58,06		
37	64	81	73,97		
38	58,4	82	54,64		
39	66,8	83	65,8		
40	58,84	84	61,09		
41	60,26	85	63,93		
42	74,51	86	63,57		
43	58,09	87	53,97		
44	67,12	88	64,28		

Apêndice C- Dados Carregamento na Floresta (Pentatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	39,77	45	43,51	89	37,18
2	42,99	46	42,04	90	38,75
3	39,13	47	40,23	91	38,66
4	40,79	48	43,34	92	40,08
5	41,52	49	38,97	93	40,37
6	36,78	50	43,25	94	40,19
7	40,26	51	42,96	95	39,1
8	39,85	52	41,95	96	36,58
9	38,33	53	41,68	97	42,05
10	40,16	54	46	98	37,99
11	37,52	55	41,33	99	42,62
12	43,72	56	44,62	100	42,38
13	44,17	57	39,47	101	40,69
14	44,01	58	38,2	102	36,39
15	36,21	59	39,1	103	38,09
16	37,28	60	40,39	104	39,03
17	41,17	61	42,08	105	38,89
18	42,45	62	37,54		
19	40,24	63	37,73		
20	40,82	64	38,81		
21	38,1	65	39,69		
22	41,56	66	40,07		
23	37,71	67	39,34		
24	36,33	68	39,01		
25	40,72	69	44,61		
26	38,88	70	38,97		
27	37,86	71	42,04		
28	44,52	72	40,75		
29	37,4	73	37		
30	38,11	74	38,22		
31	35,61	75	45,12		
32	42,59	76	41,71		
33	36,1	77	37,48		
34	40,73	78	38,23		
35	42,32	79	35,08		
36	40,99	80	40,9		
37	40,99	81	41,51		
38	42,17	82	39,94		
39	39,01	83	36,6		
40	39,71	84	36,86		
41	39,3	85	43,54		
42	36,88	86	41,69		
43	39,29	87	40,48		
44	37,01	88	37,86		

Apêndice D- Dados Carregamento na Floresta (Megatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	57,28	45	59,33	89	62,95
2	62,82	46	62,69	90	62,13
3	60,72	47	62,02	91	60,43
4	61,63	48	61,28	92	60,59
5	56,03	49	56,66	93	61,16
6	58,41	50	62,71	94	59,38
7	61,5	51	61,15	95	61,17
8	59,32	52	59	96	61,29
9	62,86	53	60,98	97	60,48
10	60,86	54	55,87	98	62,09
11	61,9	55	58,52	99	59,68
12	57,8	56	60,37	100	59,6
13	61,42	57	62,13	101	57,51
14	60,15	58	59,96	102	61,71
15	57,4	59	61,18	103	60,45
16	62,8	60	57,99	104	62,38
17	57,69	61	58,68	105	55,19
18	59,85	62	62,35		
19	62,35	63	54,51		
20	59,16	64	60,16		
21	59,34	65	62,17		
22	60,54	66	61,88		
23	59,62	67	58,63		
24	61,46	68	57,3		
25	56,92	69	61,94		
26	60,42	70	61,35		
27	58,73	71	60,8		
28	62,6	72	60,96		
29	60,61	73	60,2		
30	62,61	74	59,1		
31	61,86	75	62,49		
32	58,07	76	60,34		
33	60,69	77	62,13		
34	57,81	78	58,74		
35	58,63	79	58,49		
36	56,12	80	57,25		
37	60,2	81	62,56		
38	62,77	82	60,86		
39	58,89	83	62,54		
40	61,84	84	58,26		
41	61,45	85	58,11		
42	59,96	86	61,94		
43	58,82	87	60,93		
44	61,61	88	62,88		

Apêndice E- Dados Deslocamento até a Fabrica (Pentatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	74,45	45	75,21	89	69,56
2	83,39	46	68,91	90	76,54
3	76,17	47	78,46	91	78,87
4	80,78	48	71,32	92	71,04
5	82,81	49	81,39	93	74,51
6	72,4	50	77,24	94	71,87
7	75,5	51	78,73	95	71,27
8	80,18	52	85,96	96	77,54
9	73,43	53	77,97	97	71,1
10	75,98	54	79,28	98	78,24
11	80,95	55	68,1	99	74,91
12	68,36	56	79,48	100	67,27
13	71,06	57	72,71	101	72,43
14	72,94	58	67,65	102	71,61
15	76,07	59	73,26	103	66,41
16	74,68	60	77,75	104	80,15
17	74,44	61	79,27	105	74,32
18	84,41	62	71,18		
19	75,44	63	71,52		
20	75,23	64	69,32		
21	77,66	65	77,71		
22	81,04	66	70,79		
23	68,54	67	71,53		
24	78,79	68	77,63		
25	73,38	69	68,55		
26	68,26	70	76,17		
27	74,86	71	72,78		
28	68,48	72	74,56		
29	70,72	73	85,16		
30	83,83	74	82,15		
31	77,44	75	75,46		
32	71,83	76	77,15		
33	79,64	77	81,2		
34	66,37	78	74,92		
35	70,58	79	84,28		
36	73,63	80	80,14		
37	70,3	81	86,32		
38	79	82	76,46		
39	81,95	83	81,93		
40	69,21	84	70,43		
41	74,69	85	85,62		
42	85,63	86	68,66		
43	69,32	87	68		
44	87,83	88	78,33		

Apêndice F- Dados Deslocamento até a Fabrica (Megatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	81,79	45	78,61	89	78,65
2	84,58	46	95,59	90	84,17
3	89,33	47	90,62	91	81,81
4	80,2	48	89,86	92	82,53
5	84,87	49	88,48	93	92,49
6	83,89	50	87,83	94	90,95
7	82,31	51	84,2	95	79,3
8	80,28	52	87,49	96	92,16
9	83,99	53	89,17	97	88,88
10	87,41	54	83,46	98	81,19
11	83,88	55	93,39	99	83,99
12	96,18	56	78,75	100	82,1
13	84,2	57	82,75	101	82,35
14	94,37	58	83,63	102	92,15
15	86,21	59	82,31	103	82,9
16	85,15	60	80,92	104	90,5
17	91,48	61	79,53	105	82,75
18	87,7	62	90,58		
19	92,57	63	92,09		
20	83,04	64	82,88		
21	83,96	65	91,24		
22	89,95	66	86,28		
23	83,72	67	84,65		
24	81,37	68	85,57		
25	83,67	69	80,22		
26	87,01	70	88,34		
27	89,61	71	93,31		
28	84,93	72	84,85		
29	88,77	73	81,59		
30	90,56	74	82,92		
31	86,3	75	88,18		
32	83,43	76	79,84		
33	84,85	77	80,31		
34	90,75	78	83,97		
35	79,88	79	91,55		
36	86,41	80	78,09		
37	89,35	81	81,73		
38	92,02	82	86,35		
39	81,18	83	80,68		
40	85,25	84	81,87		
41	89,06	85	83,47		
42	79,9	86	84,99		
43	86,53	87	80,09		
44	91,65	88	81,79		

Apêndice G- Dados Tempo na Balança (Pentatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	7,83	45	10,51	89	11,94
2	8,54	46	9,25	90	11,54
3	9,93	47	9,24	91	11,28
4	9,77	48	10,03	92	12,12
5	8,31	49	11,6	93	11,7
6	11,38	50	11,46	94	10,58
7	8,94	51	9,99	95	9,38
8	9,77	52	9,73	96	9,75
9	10,87	53	8,13	97	10,05
10	10,67	54	10,08	98	12,3
11	12,01	55	10,14	99	12,74
12	12,23	56	10,82	100	8,82
13	10,95	57	12,14	101	6,5
14	9,59	58	12,02	102	9,75
15	7,99	59	10,54	103	10,94
16	10,64	60	11,76	104	19,2
17	8,84	61	11,59	105	16,85
18	10,79	62	9,66		
19	9,85	63	9,84		
20	12,5	64	9,65		
21	8,32	65	11,73		
22	10,02	66	8,51		
23	10,64	67	11,44		
24	8,69	68	10,13		
25	11,62	69	10,78		
26	10,82	70	12,24		
27	8,87	71	9,36		
28	10,49	72	9,45		
29	9,25	73	8,03		
30	8,28	74	9,22		
31	10,34	75	11,04		
32	10,36	76	10,78		
33	9,72	77	10,79		
34	12,07	78	8,9		
35	9,63	79	8,19		
36	7,39	80	10,16		
37	9,36	81	9,23		
38	8,72	82	10,24		
39	8,42	83	11,19		
40	10,69	84	11,57		
41	10,61	85	10,23		
42	9,43	86	8,7		
43	10,97	87	10,25		
44	11,1	88	10,27		

Apêndice H- Dados Tempo na Balança (Megatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	9,26	45	9,95	89	11,06
2	12,13	46	9,9	90	9,66
3	9,27	47	11,5	91	8,35
4	9,01	48	10,54	92	9,85
5	8,9	49	10,34	93	11,79
6	10,81	50	10,55	94	9,51
7	10,64	51	9,54	95	7,63
8	9,67	52	10,87	96	7,5
9	10,02	53	11,94	97	11,44
10	10,5	54	10,69	98	8,62
11	10,77	55	11,04	99	10,69
12	9,97	56	9,43	100	10,32
13	11,54	57	9,1	101	8,53
14	12,13	58	10,69	102	9,13
15	8,47	59	11,6	103	9,97
16	11,31	60	8,82	104	10,44
17	11,1	61	8,73	105	13,5
18	9,79	62	10,2		
19	11,62	63	10,15		
20	9,02	64	8,64		
21	9,23	65	9,98		
22	12,85	66	9		
23	9,59	67	11,28		
24	9,52	68	10,81		
25	10,6	69	10,39		
26	11,66	70	9,82		
27	9,95	71	11,46		
28	9,19	72	10,6		
29	10,95	73	11,2		
30	10,19	74	10,07		
31	8,94	75	8,11		
32	10,13	76	11,17		
33	10,61	77	10,71		
34	11,88	78	9,45		
35	10,87	79	9,24		
36	10,56	80	10,23		
37	10,48	81	10,48		
38	10,99	82	9,77		
39	11,31	83	9,72		
40	10,53	84	10,74		
41	10,24	85	9,79		
42	10,03	86	9,4		
43	9,94	87	8,89		
44	10,75	88	10,37		

Apêndice I- Dados Tempo de Descarregamento (Pentatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	34,63	45	32,93	89	36,32
2	32,31	46	36	90	34,95
3	32,44	47	36,16	91	34,82
4	34,17	48	35,96	92	35,51
5	34,81	49	34,28	93	35,68
6	32,6	50	32,37	94	34,44
7	35,35	51	30,75	95	30,5
8	35,93	52	35,27	96	40,28
9	34,84	53	35,69	97	32,97
10	36,65	54	36,17	98	36,28
11	32,71	55	30,5	99	36,75
12	37,27	56	35,58	100	37,65
13	36,44	57	30,79	101	32,74
14	30,73	58	34,34	102	35,32
15	30,5	59	33,33	103	33,72
16	34,32	60	34,51	104	34,06
17	33,39	61	33,83	105	33,99
18	35,66	62	33,81		
19	33,26	63	32,03		
20	32,23	64	34,62		
21	36,99	65	31,89		
22	35,11	66	31,52		
23	35,17	67	36,9		
24	32,62	68	34,32		
25	34,22	69	34,23		
26	35,63	70	37,84		
27	32,96	71	36,09		
28	36	72	37,6		
29	33,52	73	34,63		
30	34,36	74	35,01		
31	36,19	75	33,08		
32	36,36	76	34,15		
33	34,82	77	36,87		
34	32,95	78	33,23		
35	36,25	79	34,22		
36	32,62	80	34,75		
37	35,46	81	34,88		
38	32,04	82	33,4		
39	32,22	83	32,22		
40	36,54	84	33,96		
41	35,84	85	31,83		
42	35,51	86	35,41		
43	34,36	87	35,84		
44	33,7	88	33,35		

Apêndice J- Dados Tempo de Descarregamento (Megatrem)

Amostra	Tempo (min)	Amostra	Tempo(min)	Amostra	Tempo(min)
1	45,95	45	45,06	89	47,56
2	42,42	46	46,75	90	49,15
3	45,74	47	44,79	91	40,3
4	48,03	48	46,65	92	42,38
5	45,16	49	48,76	93	41,94
6	48,85	50	44,14	94	47,84
7	40,72	51	43,49	95	49,04
8	49,37	52	45,95	96	64,15
9	45,77	53	45,82	97	45,67
10	45,3	54	44,61	98	50,11
11	45,39	55	44,96	99	45,39
12	45,56	56	46,31	100	48,46
13	46,47	57	43,89	101	39,26
14	44,95	58	44,05	102	50,71
15	43,26	59	41,36	103	42,5
16	48,34	60	52,55	104	40,22
17	53	61	42,75	105	43,8
18	41,4	62	45,52		
19	48,63	63	47,61		
20	46,92	64	48,27		
21	43,84	65	42,39		
22	46,72	66	44,85		
23	45,21	67	43,59		
24	44,07	68	42,12		
25	42,88	69	48,2		
26	39,64	70	46,05		
27	48,22	71	45,92		
28	48,11	72	48,01		
29	43,9	73	49,27		
30	43,33	74	47,81		
31	46,84	75	48,51		
32	44,81	76	49,58		
33	45,51	77	47,38		
34	39,89	78	45,34		
35	44,59	79	41,18		
36	45,58	80	41,92		
37	50,91	81	44,71		
38	47,23	82	46,6		
39	38,73	83	42,43		
40	50,56	84	42,94		
41	43,83	85	48,15		
42	45,38	86	51,46		
43	45,86	87	49,58		
44	42,88	88	38,98		