

UNIVERSIDADE ESTADUAL  
PAULISTA  
UNESP JABOTICABAL

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL PARA APOIAR O GERENCIAMENTO  
OPERACIONAL DOS PROCESSOS DE CORTE, TRANSBORDO  
E TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR

Paulo Italo Jordão de Lucas

Jaboticabal

2022

**UNIVERSIDADE ESTADUAL  
PAULISTA  
UNESP JABOTICABAL**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL  
PARA APOIAR O GERENCIAMENTO OPERACIONAL DOS PROCESSOS DE  
CORTE, TRANSBORDO E TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**PAULO ITALO JORDÃO DE LUCAS**

Trabalho apresentado para defesa da dissertação,  
do Mestrado Profissional, do Programa de Pós-  
Graduação em Administração, da Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP,  
Câmpus de Jaboticabal, como exigência para  
obtenção do título de Mestre em Administração.

Área de Concentração: Gestão de Organizações  
Agroindustriais

Orientador: Prof. Dr. José de Souza Rodrigues

**Jaboticabal – SP**

**2022**

L933d Lucas, Paulo Italo Jordão de  
Desenvolvimento de um modelo de simulação computacional para apoiar o gerenciamento operacional dos processos de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar / Paulo Italo Jordão de Lucas. -- Jaboticabal, 2022  
188 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
Orientador: José de Souza Rodrigues

1. Agroindústria canavieira. 2. Engenharia de produção. 3. Pesquisa operacional. 4. Modelos e construção de modelos. 5. Métodos de simulação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

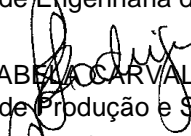
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA APOIAR O GERENCIAMENTO OPERACIONAL DOS PROCESSOS DE CORTE, TRANSBORDO E TRANSPORTE DA CANA-DE-AÇÚCAR

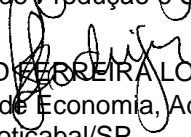
**AUTOR: PAULO ITALO JORDÃO DE LUCAS**

**ORIENTADOR: JOSE DE SOUZA RODRIGUES**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ADMINISTRAÇÃO, área: Gestão de Organizações Agroindustriais pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSE DE SOUZA RODRIGUES (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP

  
Profa. Dra. ANABELA CARVALHO ALVES (Participação Virtual)  
Departamento de Produção e Sistemas - Universidade do Minho-Campus de Azurém / Guimarães/Portugal

  
Prof. Dr. DAVID FERREIRA LOPES SANTOS (Participação Virtual)  
Departamento de Economia, Administração e Educação / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - FCAV - UNESP - Jaboticabal/SP

Jaboticabal, 20 de janeiro de 2022

## Agradecimentos

Certo de que todo bom resultado é fruto de um somatório de esforços, e não de um esforço solo, mas ciente de que esta página é insuficiente para registrar todo o reconhecimento, aproveito este espaço para externalizar parte da minha gratidão.

Agradeço primeiramente à Deus, por minha vida e pela proteção.

Aos meus pais, Paulo e Sandra, por todo amor, dedicação, orientação, exemplo, esforço e tudo que fizeram e fazem por mim durante toda a minha vida. Não tenho dúvidas que em todas minhas conquistas há mais de vocês que de mim.

À minha irmã, Ana Paula, pelo carinho, apoio, companheirismo e preocupação.

À minha namorada, Jaquelini, pelo carinho, compreensão, companheirismo e apoio em momentos difíceis durante esta dissertação.

Aos meus avós, Wagdenir, Odette, Jorge e Yvone, estando neste ou em outro plano, suas memórias me ajudaram passar por momentos difíceis neste caminho.

À minha família e aos meus amigos, pela compreensão da minha ausência, e pelo apoio e motivação nos momentos difíceis.

Ao meu tio e padrinho, Jorge de Lucas Junior, pelo incentivo de ingressar no mestrado e por ser exemplo e espelho para minha carreira.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José de Souza Rodrigues, pelo apoio e parceria na construção desta dissertação; pelas provocações e discussões que contribuíram para meu pensamento crítico e desenvolvimento intelectual; e pela paciência e flexibilidade, as quais foram fundamentais para a entrega deste trabalho.

Ao Prof. Dr. David Ferreira Lopes Santos e à Prof<sup>a</sup>. Dra. Anabela Carvalho Alves, membros da banca, por todas as críticas e sugestões que contribuíram diretamente para concretização deste trabalho.

Aos docentes, aos colegas de turma e a todos os envolvidos no Mestrado Profissional em Administração da UNESP/FCAV, por contribuírem com o meu desenvolvimento intelectual e pessoal, além das contribuições para o agronegócio brasileiro.

À empresa estudada, que não só abriu as portas das suas operações para o estudo, como também me permitiu cursar o mestrado em paralelo às atividades profissionais.

## **Resumo**

### **Objetivo**

Desenvolver um modelo de simulação computacional das operações de corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar, que apoie a tomada de decisão e o gerenciamento operacional, e melhore o fluxo de colheita e abastecimento industrial da cana.

### **Metodologia / Procedimentos de Pesquisa**

O método utilizado foi o *Design Science Research*, com abordagem predominantemente qualitativa, pois permite desenvolver um modelo para resolver um problema prático e gerar conhecimentos científicos para contribuir com a base teórica de gestão das operações sucroenergéticas. A pesquisa foi orientada por um estudo de caso em uma usina de cana-de-açúcar, cuja coleta de dados foi baseada em observação dos processos, entrevistas e análise documental. A análise dos dados foi segmentada em mapeamento e descrição dos processos, modelagem, teste e validação, e utilização do modelo.

### **Resultados e Discussões**

O modelo computacional desenvolvido demonstrou representatividade ao sistema real, apresentando baixos níveis de desvios nas etapas de verificação e validação. Sua utilização permitiu: identificar oportunidade de redução de 7 caminhões de linha e 20 conjuntos de carretas, que representam, respectivamente, 14,3% e 17,2% da estrutura total, uma economia potencial de R\$ 2.611.525 por safra; e avaliar o fluxo de cana das frentes de colheita e o comportamento de filas, ciclos e *leadtime* em diferentes cenários. Também foi proposto um fluxo para utilização do modelo no planejamento operacional. Além disso, lacunas encontradas na base teórica foram supridas.

### **Implicações Gerenciais**

O modelo contribui para o processo de tomada de decisão no setor sucroenergético, a partir de dados confiáveis e cenários gerados com agilidade, que podem suportar: o planejamento operacional, a partir do dimensionamento da estrutura de equipamentos e a avaliação de entrega de cana; as decisões estratégicas, no que tange à fusões ou aquisições e estratégias de “clusterização”; e o desenvolvimento tecnológico, como ferramenta para novas tecnologias

relacionadas à Agricultura 4.0, principalmente, no que se refere à integração entre o sistema agrícola e o industrial.

### **Conclusões e Limitações da Pesquisa**

Os objetivos propostos foram alcançados, de modo que foi desenvolvido um modelo de simulação computacional representativo às operações de CTT da cana-de-açúcar, que possibilitou a melhor compreensão do sistema estudado para a tomada de decisão e gestão operacional, assim como identificar e avaliar melhorias no fluxo da cana. Destaca-se contribuições práticas para a gestão operacional do setor sucroenergético e científicas para incrementar a base de conhecimento sobre gestão de organizações agroindustriais, propósito do mestrado profissional. No que tange às limitações do estudo, tem-se que o modelo é único, baseado nos dados e processos de uma empresa; e que foi elaborado em um único *software*, que não dispõe de simulação dinâmica.

### **Originalidade**

O modelo apresentado neste trabalho, supre as seguintes lacunas que contribuem para sua originalidade: integração de todas as operações da cadeia, das frentes de colheita até a moagem; flexibilidade de configuração do modelo para gerar cenários com agilidade; modelo único capaz de simular o sistema em diferentes horizontes de tempo; modelo que representa um sistema com uma estrutura agrícola que fornece para mais de uma planta industrial. A escolha do *software* Promodel também é uma fonte de originalidade, dado que não foi encontrado em nenhum estudo aplicado no agronegócio.

**Palavras-chaves:** Sucroenergético. Operações Agroindustriais. Gestão de Operações. Modelagem de Processos. Simulação Computacional. Promodel. Corte, Transbordo e Transporte.

## **Abstract**

### **Purpose**

Develop a computer simulation model of sugarcane harvest, loading, transport and milling operations, which supports decision-making and operational management, and improves the flow of harvesting and industrial supply of sugarcane.

### **Design/methodology**

The method used was Design Science Research, with a predominantly qualitative approach, as it allows the development of a model to solve a practical problem and generate scientific knowledge to contribute to the theoretical basis for managing sugarcane operations. The study was guided by a case study in a sugarcane industry, whose data collection was based on observation of processes, interviews and document analysis. Data analysis was segmented into process mapping and description, modeling, testing and validation, and model use.

### **Findings and Discussions**

The computational model developed showed representativeness to the real system, with low levels of deviations in the verification and validation steps. Its use allowed: to identify opportunities to reduce 7 line trucks and 20 sets of trailers, which represent, respectively, 14.3% and 17.2% of the total structure, a potential savings of R\$ 2,611,525 per harvest; and evaluate the flow of sugarcane from the harvesting fronts and the behavior of queues, cycles and leadtime in different scenarios. A flow for using the model in operational planning was also proposed. Furthermore, gaps found in the theoretical basis were filled.

### **Management Implication**

The model contributes to the decision-making process in the sugarcane sector, based on reliable data and quickly generated scenarios, which can support: operational planning, based on the dimensioning of the equipment structure and the assessment of sugarcane delivery; strategic decisions, regarding mergers or acquisitions and “clusterization” strategies; and technological development, as a tool for new technologies related to Agriculture 4.0, mainly with regard to the integration between the agricultural and industrial systems.

### **Conclusion and Research limitations**

The proposed objectives were achieved, so that a computer simulation model representative of the sugarcane CTT operations was developed, which enabled a better understanding of the system for decision-making and operational management, as well as identifying and evaluating improvements in the flow of sugarcane. The following were found: practical contributions to the operational management of the sugarcane sector and scientific contributions to increase the knowledge base on the management of agro-industrial organizations, the purpose of the professional master's degree. Regarding the study's limitations, the model is unique, based on a company's data and processes; and that it was developed in a single software, which does not have dynamic simulation.

### **Originality**

The model presented in this work fills the following gaps that contribute to its originality: integration of all operations in the chain, from the harvesting fronts to the milling; model configuration flexibility to generate scenarios with agility; unique model capable of simulating the system in different time horizons; model that represents a system with an agricultural structure that supplies more than one industrial plant. The choice of Promodel software is also a source of originality, as it has not been found in any study applied to agribusiness.

**Keywords:** Sugarcane Sector. Agro-Industrial Operations. Operations Management. Process Modeling. Computer Simulation. Promodel. Harvest, Loading and Transportation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Sistema de Colheita Semi-Mecanizado da Cana-de Açúcar.....	26
<b>Figura 2:</b> Sistema de Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar .....	27
<b>Figura 3:</b> Percentual de Colheita Mecanizada.....	29
<b>Figura 4:</b> Evolução da Mecanização da Colheita de Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo .....	29
<b>Figura 5:</b> Estrutura de Colheita da Cana-de-Açúcar .....	32
<b>Figura 6:</b> Participação relativa dos subsistemas de acordo com a variação do raio médio .....	34
<b>Figura 7:</b> Sistema de recepção e descarregamento da cana-de-açúcar na usina.....	35
<b>Figura 8:</b> Evolução dos softwares de simulação .....	39
<b>Figura 9:</b> Categorização da modelagem e simulação .....	40
<b>Figura 10:</b> Processo para Modelagem e Simulação .....	46
<b>Figura 11:</b> Fluxo com as etapas e inter-relações para a modelagem e simulação de processos .....	47
<b>Figura 12:</b> Metodologia de simulação computacional de processos .....	48
<b>Figura 13:</b> Elementos do Modelo DSR .....	62
<b>Figura 14:</b> Estrutura de desenvolvimento da pesquisa .....	66
<b>Figura 15:</b> Estrutura da Análise de Dados.....	69
<b>Figura 16:</b> Fluxo da cana-de-açúcar no caso estudado.....	75
<b>Figura 17:</b> Relação tipos de frente de colheita e atuação gerencial .....	76
<b>Figura 18:</b> Simplificação do sistema em estudo.....	77
<b>Figura 19:</b> Visão de processo da operação de corte de cana .....	78
<b>Figura 20:</b> Configuração das horas de corte/elevador .....	80
<b>Figura 21:</b> Simplificação da produção de cana das frentes de colheita.....	81
<b>Figura 22:</b> Gráfico da relação do TCH pelo número de corte na cana própria .....	83
<b>Figura 23:</b> Matriz de velocidade a partir da densidade do canavial .....	85
<b>Figura 24:</b> Fluxograma do processo de transporte – Geral – Usina 1 .....	89
<b>Figura 25:</b> Fluxograma do processo de transporte – Implemento Rodoviário – Usina 1.....	90
<b>Figura 26:</b> Fluxograma do processo de transporte – Caminhões – Usina 1 .....	91
<b>Figura 27:</b> Fluxograma do processo de transporte – Geral – Usina 2 .....	92
<b>Figura 28:</b> Fluxograma do processo de transporte – Implemento Rodoviário – Usina 2.....	93
<b>Figura 29:</b> Fluxograma do processo de transporte – Caminhões – Usina 2.....	94

<b>Figura 30:</b> Visão de processo da operação de transporte de cana .....	95
<b>Figura 31:</b> Visão de processo das operações de recebimento e moagem da cana-de-açúcar .....	105
<b>Figura 32:</b> Fluxo de recebimento de cana da Indústria 1 .....	106
<b>Figura 33:</b> Fluxo de recebimento de cana da Indústria 2 .....	106
<b>Figura 34:</b> Planta Indústria 1 .....	107
<b>Figura 35:</b> Planta Indústria 2 .....	107
<b>Figura 36:</b> Modelo conceitual para o sistema de CTT estudado .....	117
<b>Figura 37:</b> Ilustração do Modelo de Simulação Computacional .....	121
<b>Figura 38:</b> Verificação das operações de recebimento .....	129
<b>Figura 39:</b> Verificação dos recursos (disponibilidade) .....	129
<b>Figura 40:</b> Verificação dos recursos (quantidade) .....	130
<b>Figura 41:</b> Verificação dos fluxos por <i>Leadtime</i> .....	130
<b>Figura 42:</b> Histograma - Comportamento dos Desvios na Validação .....	132
<b>Figura 43:</b> Recursos - Cenário Pessimista .....	134
<b>Figura 44:</b> Recursos - Cenário Mais Provável .....	134
<b>Figura 45:</b> Recursos - Cenário Otimista .....	135
<b>Figura 46:</b> Análise de Capacidade - Entrega de Cana - Cenário Pessimista .....	138
<b>Figura 47:</b> Análise da Capacidade - Entrega de Cana - Cenário Mais Provável .....	139
<b>Figura 48:</b> Análise da Capacidade - Entrega de Cana - Cenário Otimista .....	139
<b>Figura 49:</b> Saldo de Cana Cenários - Compensação Fornecedores .....	140
<b>Figura 50:</b> Pilares de Atuação - Nivelamento da Entrega de Cana .....	141
<b>Figura 51:</b> Mapa do Fluxo de Valor - Indústria 1 .....	142
<b>Figura 52:</b> Mapa do Fluxo de Valor - Indústria 2 .....	142
<b>Figura 53:</b> Fluxo para utilização do modelo no planejamento operacional .....	146
<b>Figura 54:</b> Estrutura para discussão em implicações gerenciais .....	148

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Número de Colhedoras por Região no Brasil .....	30
<b>Quadro 2:</b> Indicadores de Desempenho das Operações do CTT .....	37
<b>Quadro 3:</b> Resultado da pesquisa de pacotes de simulação na base Scopus.....	53
<b>Quadro 4:</b> Módulos e Funcionalidades do ProModel .....	54
<b>Quadro 5:</b> Modelagem e Simulação de Processos Aplicados ao CTT da Cana-de-Açúcar (continua).....	57
<b>Quadro 6:</b> Modelagem e Simulação de Processos Aplicados ao CTT da Cana-de-Açúcar (continuação) .....	58
<b>Quadro 7:</b> Modelagem e Simulação de Processos Aplicados ao CTT da Cana-de-Açúcar (conclusão).....	59
<b>Quadro 8:</b> Descrição das etapas do modelo conceitual (continua) .....	118
<b>Quadro 9:</b> Descrição das etapas do modelo conceitual (conclusão) .....	119
<b>Quadro 10:</b> Classificação das etapas do modelo para simulação em diferentes horizontes de tempo .....	120
<b>Quadro 11:</b> Discussão das Lacunas.....	148

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> TCH por corte do canavial .....	83
<b>Tabela 2:</b> Comportamento do TCH do sistema estudado.....	84
<b>Tabela 3:</b> Distribuição dos tempos gerenciáveis das colhedoras.....	86
<b>Tabela 4:</b> Distribuição de probabilidade do tempo de corte nas frentes de colheita .....	86
<b>Tabela 5:</b> Estrutura de equipamentos das frentes de colheita.....	87
<b>Tabela 6:</b> Distância das Frentes de Colheita .....	97
<b>Tabela 7:</b> Velocidade média do transporte .....	98
<b>Tabela 8:</b> Relação velocidade média e distância da FC .....	99
<b>Tabela 9:</b> Densidade de carga das carretas .....	100
<b>Tabela 10:</b> Tempo de palhada .....	101
<b>Tabela 11:</b> Indisponibilidade dos caminhões canavieiros .....	102
<b>Tabela 12:</b> Indisponibilidade das unidades de carga .....	103
<b>Tabela 13:</b> Deslocamento interno da Indústria 1 .....	108
<b>Tabela 14:</b> Deslocamento interno da Indústria 2.....	108
<b>Tabela 15:</b> Tempo das operações no Bate e Volta .....	109
<b>Tabela 16:</b> Tempo das operações na Balança.....	110
<b>Tabela 17:</b> Taxa de carreta sorteada para coleta na Sonda PCTS .....	111
<b>Tabela 18:</b> Tempo de coleta na Sonda PCTS .....	112
<b>Tabela 19:</b> Tempo de descarregamento no hilo.....	113
<b>Tabela 20:</b> Ritmo de moagem mensal (ton/hora) .....	114
<b>Tabela 21:</b> Produção das frentes de colheita de fornecedores.....	116
<b>Tabela 22:</b> Indisponibilidade climática .....	116
<b>Tabela 23:</b> <i>Outputs</i> Taxa de Produção Frentes de Colheita - Simulação de Monte Carlo ....	123
<b>Tabela 24:</b> Verificação da taxa de chegada de cana.....	128
<b>Tabela 25:</b> Verificação moagem.....	129
<b>Tabela 26:</b> Validação do Modelo .....	131
<b>Tabela 27:</b> Configuração dos cenários para simulação .....	133
<b>Tabela 28:</b> Análise de Sensibilidade – Caminhões.....	136
<b>Tabela 29:</b> Análise de Sensibilidade – Carretas .....	137
<b>Tabela 30:</b> Economia potencial da estrutura de transporte.....	137
<b>Tabela 31:</b> Análise de Capacidade - Entrega de Cana - Resumo .....	140

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ACD	<i>Activity Cycle Diagram</i>
ATR	Açúcar Total Recuperável
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CTT	Corte, Transbordo e Transporte
DSR	<i>Design Science Research</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FNQ	Fundação Nacional da Qualidade
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDEA	Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time to Repair</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCTS	Sistema de Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose
PECEGE	Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas
PIB	Produto Interno Bruto
TCH	Tonelada de Cana-de-Açúcar por Hectare
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. Problema de Pesquisa .....	19
1.2. Objetivo .....	21
1.2.1. Objetivo geral .....	21
1.2.2. Objetivos específicos .....	21
1.3. Justificativa .....	22
1.4. Estrutura do Trabalho .....	24
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
2.1. O Setor Sucroenergético e suas Operações de Produção .....	25
2.1.1. Mecanização da Colheita da Cana-de-Açúcar .....	26
2.1.2. Operações de Corte, Transbordo e Transporte da Cana-de-Açúcar .....	31
2.1.3. Principais Indicadores de Desempenho das Operações de Corte, Transbordo e Transporte da Cana-de-Açúcar .....	36
2.2. Modelagem e Simulação de Processos .....	38
2.2.1. Histórico, Definição e Classificação da Modelagem e Simulação de Processos .....	38
2.2.2. Modelagem e Simulação Computacional de Processos .....	42
2.2.3. Etapas para a Modelagem e Simulação de Processos .....	45
2.2.4. Softwares para Simulação Computacional de Processos .....	51
2.3. Simulação Computacional Aplicada às Operações Agroindustriais .....	54
2.3.1. Modelagem e Simulação Computacional em Processos Agrícolas .....	55
2.3.2. Modelagem e Simulação Computacional nas Operações de CTT da Cana .....	57
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>60</b>
3.1. Caracterização da Pesquisa .....	60
3.2. Pesquisa de Campo .....	64
3.2.1. Elementos de Pesquisa .....	65
3.2.2. Etapas da Pesquisa .....	65
3.2.3. Coleta de Dados .....	67
3.2.4. Análise de Dados .....	68

<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
4.1.	Descrição e Mapeamento dos Processos .....	73
4.1.1.	Contexto do sistema das operações de CTT .....	74
4.1.2.	Descrição das Operações de Corte e Transbordo .....	77
4.1.2.1.	Variáveis que impactam na produção de cana das frentes de colheita .....	78
4.1.2.2.	Simplificação da produção de cana .....	79
4.1.2.2.1.	Cálculo do índice de colheitabilidade .....	81
4.1.2.2.2.	Densidade dos canaviais (TCH) .....	83
4.1.2.2.3.	Velocidade de corte .....	84
4.1.2.2.4.	Tempo de corte .....	85
4.1.2.3.	Estrutura de equipamentos para corte e transbordo .....	87
4.1.3.	Descrição da Operação de Transporte .....	87
4.1.3.1.	Fluxo das operações de transporte .....	88
4.1.3.2.	Variáveis que impactam no transporte da cana-de-açúcar .....	95
4.1.3.2.1.	Raio das frentes de colheita .....	96
4.1.3.2.2.	Velocidade média do transporte .....	97
4.1.3.2.3.	Tempo de carregamento na frente de colheita .....	99
4.1.3.3.	Estrutura e disponibilidade de equipamentos para o transporte .....	102
4.1.4.	Descrição das Operações de Recebimento e Moagem da Cana-de-Açúcar .....	103
4.1.4.1.	Variáveis que impactam no recebimento e na moagem .....	104
4.1.4.2.	Fluxo das operações de recebimento e descarregamento da cana .....	105
4.1.4.2.1.	Pátio bate e volta (estoque) .....	109
4.1.4.2.2.	Balança .....	110
4.1.4.2.3.	Análise sonda (PCTS) .....	111
4.1.4.2.4.	Descarregamento .....	112
4.1.4.3.	Ritmo de moagem .....	113
4.2.	Modelagem do Processo .....	114
4.2.1.	Construção do Modelo Conceitual .....	114
4.2.1.1.	Seleção de variáveis .....	115
4.2.1.2.	Modelo conceitual .....	116
4.2.2.	Construção do Modelo de Simulação Computacional .....	120
4.3.	Teste e Validação do Modelo .....	126
4.3.1.	Verificação do Modelo .....	127
4.3.2.	Validação do Modelo .....	131

4.4.	Utilização do Modelo .....	132
4.4.1.	Propostas de Melhoria ao Sistema.....	133
4.4.1.1.	Recursos.....	133
4.4.1.2.	Entrega de cana.....	137
4.4.1.3.	Filas, ciclos e <i>leadtime</i> .....	141
4.4.2.	Proposta de Utilização do Modelo no Planejamento Operacional .....	145
4.5.	Discussão e Implicações Gerenciais.....	147
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>151</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>154</b>
	<b>APÊNDICE A – VÍDEOS: PROCESSO CTT E SIMULAÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>163</b>
	<b>APÊNDICE B – PROTOCOLO DE PESQUISA .....</b>	<b>164</b>
	<b>APÊNDICE C – ROTEIRO DE PESQUISA .....</b>	<b>165</b>
	<b>APÊNDICE D – CRONOGRAMA DO PROJETO .....</b>	<b>166</b>
	<b>APÊNDICE E – MAPEAMENTO VARIÁVEIS DAS ETAPAS DO PROCESSO .....</b>	<b>167</b>
	<b>APÊNDICE F – DISTRIBUIÇÃO TEMPOS PRODUTIVOS DE COLHEDORA.....</b>	<b>168</b>
	<b>APÊNDICE G – TESTE DE HIPÓTESE ENTRE VELOCIDADE MÉDIA E DISTÂNCIA DAS FRENTE DE COLHEITA .....</b>	<b>174</b>
	<b>APÊNDICE H – PROGRAMAÇÃO DO PROMODEL.....</b>	<b>176</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, na Safra 20/21 a área colhida foi de aproximadamente 8.616.100 hectares (CONAB, 2021) e a produção foi de 654.504.921 toneladas de cana-de-açúcar no território brasileiro (MAPA, 2021).

Dentre os estados da federação, São Paulo é o maior produtor, apresentando mais da metade da área plantada no país. De acordo com dados da Pesquisa Agrícola Municipal realizada pelo IBGE, no ano de 2017 foram colhidos 5,7 milhões de hectares, resultando no montante de 450 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e gerando um valor de R\$ 30,4 bilhões (IBGE, 2017).

O setor sucroenergético apresenta como principais produtos o Açúcar, o Etanol e a Energia Elétrica, produzidos a partir da cana-de-açúcar. O processo de produção pode ser dividido em duas grandes áreas, a agrícola e a industrial. Na primeira são realizadas as operações para produção da cana-de-açúcar, englobando desde o preparo de solo e plantio até a entrega da cana picada na usina; e, na segunda, são realizadas as operações para transformação da matéria-prima em produto final, que é iniciado pela moagem e concluído na entrega dos produtos finais para comercialização (RODRIGUES e ROSS, 2020).

Os gastos das operações agrícolas são mais expressivos que os das operações industriais. Segundo pesquisa do portal Nova Cana publicada em 2019, os gastos com o canavial representaram, na Safra 18/19, 70,85% do custo agroindustrial total, sendo as operações de Corte, Transbordo e Transporte (CTT) a mais onerosa, sobre a qual o Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas – PECEGE (2015), aponta a colheita como principal componente do custo operacional de produção, correspondendo a aproximadamente 40% dos desembolsos na produção da cana-de-açúcar (PECEGE, 2015; MILAN e ROSA, 2015; NOVA CANA, 2019).

Além dos gastos provenientes dos elevados investimentos em equipamentos e dos onerosos custos operacionais, as operações de corte, transbordo e transporte estão expostas à inúmeras variáveis, tais como densidade do canavial (medido por toneladas de cana por hectare - TCH), condições climáticas e distância entre as frentes de colheita e as unidades industriais (raio médio), além de algumas restrições, como a capacidade industrial de moagem e a cota de produção própria e de terceiros. Dessa forma, a tomada de decisão, seja para o planejamento das operações de CTT ou para ajustes durante a safra, apresenta alta complexidade e impacta diretamente na eficiência das operações.

As práticas mais utilizadas para planejamento e gestão das operações de CTT são análises simples, pautadas nas médias de algumas variáveis do processo e considerando um período longo, de modo a não abordar a variabilidade do processo nem o impacto das diferentes formações de áreas colhidas durante a safra, as quais apresentam diferenciação, entre outros fatores, no raio até a unidade industrial e na densidade do canavial (TCH). Destaca-se que a formação do conjunto de áreas a serem colhidas em um momento, considerando suas características de distância e produtividade, impactam na capacidade de entrega de cana na unidade industrial.

Considerando essa complexidade para a tomada de decisão, a utilização de técnicas determinísticas, para planejar a estrutura ou ajustar as operações de CTT, não proporcionam um retrato adequado da realidade operacional, dado que não consideram a variabilidade das variáveis envolvidas nem as interações entre as etapas do processo. Logo, oportunidades de ganhos, seja por excesso ou falta de produção, não são percebidas (ROSA, 2017).

Para eliminar esse gap é necessário reduzir as incertezas no processo decisório, o que pode ser feito aumentando o grau de aderência dos modelos de planejamento aos processos reais (IANNONI e MORABITO, 2006; TOMAZELA *et al.*, 2017).

Desse modo, uma ferramenta viável para atingir esse objetivo em um ambiente complexo, tal qual as operações de CTT, é a utilização de um modelo de simulação computacional de processos, o qual possibilita realizar uma abordagem probabilística e integradora dos processos, favorecendo a identificação das oportunidades e aumentando a flexibilidade para realização de testes. Nesse ponto, vale ressaltar que a simulação computacional ainda é pouco utilizada para o gerenciamento operacional no setor sucroenergético.

Segundo Pegden *et al.* (1995), simulação é um processo de projetar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos a partir desse modelo com o propósito de entender seu comportamento e avaliar estratégias para sua operação. Sobre a simulação computacional, Morabito e Pureza (2018) destacam que é uma importante ferramenta de planejamento que busca emular, por meio de relações lógicas, o funcionamento de sistemas reais, que são complexos demais para serem modelados analiticamente, a fim de observar seu comportamento em diferentes cenários.

A modelagem e simulação teve sua evolução intensificada a partir da Segunda Guerra Mundial, e seu desenvolvimento, desde o início, teve como maior responsável os problemas práticos e de alta complexidade. Morabito e Pureza (2018), indicam um futuro promissor para

a modelagem e simulação aplicada na gestão de operações, pautado na evolução dos *softwares* e no aumento da necessidade de agilidade e assertividade na tomada de decisão.

### **1.1. Problema de Pesquisa**

As cadeias produtivas do agronegócio apresentam elevado grau de complexidade, dado que, em grande parte, são formadas por dois grupos de operações distintos, que são os processos agrícolas, responsáveis pelo cultivo dos principais insumos; e os processos industriais, responsáveis pelo processamento e transformação da matéria prima em produto. Destaca-se como fatores que contribuem para essa complexidade o elevado número de variáveis nos processos, sendo que algumas tem-se pouco ou nenhum controle sobre elas, por serem operações descentralizadas, e haver forte interdependência entre todas as etapas do processo.

No que tange às operações de CTT da cana-de-açúcar, é possível elencar a exposição à variáveis logísticas, climáticas e operacionais, tais como distância entre as frentes de colheita e a indústria, chuvas e outros acontecimentos climáticos, densidade do canavial e velocidade de trabalho.

Deve-se considerar também que no processamento da cana-de-açúcar há forte interdependência entre os processos agrícola e industrial, de modo que o abastecimento agrícola deve atender a demanda industrial com o menor desvio possível, pois por ser um processo com regime de trabalho contínuo, a falta de cana em um momento não pode ser compensada em outro, gerando perda de eficiência. Por outro lado, o excesso de produção agrícola aumenta o tempo de espera da cana cortada, gerando perda de ATR (açúcar total recuperável).

O aumento da estrutura agrícola pode parecer uma alternativa para evitar a falta de abastecimento industrial, no entanto junto a ela há significativas restrições de custo, dado que as operações de CTT, segundo Guerra (2018), estão entre as mais custosas do setor sucroenergético e seus equipamentos são significativas fontes de capital imobilizado, sendo foco de redução pelas empresas.

Partindo da descrição das operações de CTT, nota-se significativo grau de complexidade, sendo assim pesquisas de modelagem e simulação são encontradas nessas operações com o objetivo de apoiar a tomada de decisão gerencial frente a esses ambientes complexos.

Milan, Fernandez e Aragonés (2006) desenvolveram um modelo de programação linear com objetivo de reduzir custo no transporte da cana-de-açúcar, e destacaram a complexidade devido ao grande número de variáveis e restrições presentes no processo. Em outro trabalho,

também a partir de um modelo de programação linear, Milan e Aragones (2014), propuseram um sistema de suporte à decisão gerencial para reduzir custo no transporte da cana-de-açúcar e garantir o fornecimento à indústria, no entanto, considerando a necessidade de programação diária, concluíram que apesar de funcional é um modelo complexo para manuseio e há dificuldade de operacionalização.

Masoud, Kozan e Kent (2011) desenvolveram um modelo matemático para planejar o sequenciamento do transporte ferroviário de cana-de-açúcar na Austrália para reduzir custo e atender a demanda de produção das colhedoras e de consumo da unidade industrial. Apesar do modelo deles ter atingido seus objetivos, relataram que é um modelo complicado de programar e precisa ser resolvido em um prazo razoável devido à natureza dinâmica do sistema. Também a partir de um modelo matemático, Lamsal; Jones e Thomas (2017) propuseram um modelo logístico para a colheita de cana-de-açúcar no Brasil, no entanto, destacaram que é um modelo determinístico, satisfatório para pequenos horizontes de tempo (4 à 6 horas), e devido às incertezas nas operações de CTT, apontaram oportunidades de desenvolvimento de modelos estocásticos.

A utilização de técnicas determinísticas de modelagem, que não consideram a variabilidade e a interação das variáveis do processo, apresentam limitações de abrangência e representatividade de modelos de sistemas complexos, como é o caso das operações de CTT. Para esses casos, Morabito e Pureza (2018) sugerem a simulação computacional.

Arjona, Bueno e Salazar (2001) desenvolveram um modelo de simulação computacional nas operações de CTT, mecanizada e semi-mecanizada, para avaliar a subutilização dos equipamentos. Le Gal *et al.* (2009) propuseram um modelo de simulação computacional das operações logísticas de CTT integrados com o plano de abastecimento industrial. Destacaram melhorias nos resultados de utilização da estrutura dos equipamentos, no entanto, relataram dificuldades em lidar com eventos não planejados e necessidade de refinar a entrada de dados.

Iannoni e Morabito (2006) desenvolveram um modelo de simulação discreta com abordagem probabilística baseado nas operações de colheita do setor sucroenergético, com aplicação em outros setores da agroindústria. O objetivo do modelo era representar a interação entre as áreas agrícola e industrial, possibilitando comparar cenários de fila de espera e desperdícios no descarregamento. Tomazela *et al.* (2017) também criaram um modelo de simulação discreta, para mensurar o desempenho das operações de CTT, e relataram boas condições de predição a partir do modelo.

No cenário exposto, a tomada de decisão apresenta alta complexidade e impacta diretamente na eficiência das operações, de modo que a utilização de técnicas e ferramentas

simples para análise, culminam em elevado nível de risco no processo decisório e, conseqüentemente, em decisões equivocadas que podem proporcionar desabastecimento de cana-de-açúcar na indústria ou aumento dos custos operacionais.

Ainda, na base de conhecimento científico existem lacunas quanto à integração das operações da cadeia, das frentes de colheita até a usina; a operacionalização do modelo para gerar cenários a tempo de fornecer subsídios para tomada de decisão; modelo que permite a simulação em diferentes horizontes de tempo; e que simule um sistema com estrutura agrícola compartilhada entre usinas, favorecendo a operação em clusters.

Dessa forma destaca-se o questionamento: Como desenvolver um modelo de simulação computacional, que melhore o processo decisório e o gerenciamento das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, para melhorar o fluxo de cana da colheita e do abastecimento industrial?

A construção e utilização do modelo de simulação computacional indica a possibilidade de melhoria no processo de decisão envolvendo as operações de corte, transbordo, transporte e processamento industrial da cana-de-açúcar, que produza economias por eliminação de desperdícios, flutuações indesejáveis em níveis de estoque (seja por falta ou por excesso) e melhoria do fluxo do processo produtivo.

## **1.2. Objetivo**

### **1.2.1. Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação computacional das operações de corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar, que apoie a tomada de decisão e o gerenciamento operacional, e melhore o fluxo de colheita e abastecimento industrial da cana.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

O objetivo principal deste trabalho foi desmembrado nos seguintes objetivos específicos:

- a. Elaborar o roteiro metodológico para a construção do modelo.

- b. Mapear os processos e as variáveis presentes nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar.
- c. Analisar como as variáveis interagem com a métrica definida para o modelo e transformá-las, se necessário.
- d. Selecionar as variáveis com maior impacto sobre o processo para integrarem ao modelo.
- e. Desenvolver o modelo em *software* de simulação computacional.
- f. Realizar simulações para testar e validar a aderência do modelo à realidade.
- g. Analisar os dados proporcionados pela simulação.
- h. Apontar oportunidades de melhoria nas operações de CTT, com foco na linearidade do abastecimento industrial.
- i. Sugerir processo e frequência de utilização do modelo que se enquadre na rotina do gerenciamento operacional.

### 1.3. Justificativa

A tomada de decisão para o planejamento das operações de CTT e para ajustes operacionais durante a safra apresenta alta complexidade e impacta diretamente na eficiência e no custo das operações de processamento da cana-de-açúcar. Nesta situação, Angeloni (2003) destaca como elementos essenciais para o processo decisório assertivo, a qualidade e confiabilidade das informações e o conhecimento do sistema.

Os modelos de simulação computacional possibilitam realizar uma abordagem probabilística e integradora dos processos, favorecendo a identificação de oportunidades e aumentando a flexibilidade para realização de testes, de modo a reduzir as incertezas no processo decisório. Evidencia-se que a modelagem e simulação de processos apresentam bons resultados comprovados em sistemas de diferentes características e complexidade, tais como: atendimento ao cliente (CANEDO; SILVA, 2017); manufatura (PIMENTEL, 2015); e planejamento estratégico e operacional (FRIGERI; BIANCHI; BACKES, 2007). Observa-se também a aplicação, com resultados positivos, nas operações agrícolas do setor sucroenergético (LE GAL *et al.*, 2009; MASOUD; KOZAN; KENT, 2011).

Considerando que Cortez *et al.* (2016) evidenciam a necessidade de constantes mudanças e melhoria ininterrupta em toda a cadeia produtiva do setor Sucroenergético, o modelo de simulação computacional permite a antecipação de cenários das operações de CTT

para a tomada de decisão, de modo a evitar o desabastecimento industrial e o superdimensionamento da estrutura agrícola. Destaca-se que o aproveitamento dessas oportunidades para ganho de eficiência apresenta impactos significativos para a empresa, o país e a sociedade.

Para a empresa, o aumento de eficiência proporciona maior produtividade, porque melhora o aproveitamento de seus ativos e insumos na produção agrícola, reduzindo os custos operacionais. Considerando que o setor sucroenergético brasileiro é um dos mais competitivos do mundo (BARBIERI; CARVALHO; SABBAG, 2016) e tratando-se de uma cultura considerada *commodity*, a dinâmica competitiva do setor é regida, predominantemente, pela redução de custos.

Para o país, o impacto gerado reflete diretamente em sua economia, dado que o Brasil é um dos protagonistas do agronegócio mundial e um dos maiores exportadores de açúcar. Segundo Neves *et al.* (2014) o valor bruto movimentado pela cadeia sucroenergética, na Safra 13/14, supera US\$ 100 bilhões, com um PIB de aproximadamente US\$ 40 bilhões, montante equivalente a cerca de 2% do PIB brasileiro. Dessa forma o aumento da eficiência agrícola pode proporcionar aumento da margem de lucro e aumento da participação de mercado das empresas brasileiras, o que se transformam em renda e investimentos na economia nacional.

Para a sociedade, o aumento da eficiência nas operações agrícolas apresenta impactos sociais e ambientais, principalmente porque são operações relacionadas à produção de alimentos e a principal fonte de energia das máquinas agrícolas é o diesel. Sendo assim, o aumento da produção de alimentos com a menor utilização de recursos, dentre eles o consumo de combustíveis fósseis, está intimamente correlacionado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (2015), divulgados na Agenda 2030, à citar: Fome Zero e Agricultura Sustentável (ODS 2), Energia Limpa e Acessível (ODS 7), Trabalho Decente e Crescimento Econômico (ODS 8) e Consumo e Produção Responsáveis (ODS 12).

Além disso, para a área de pesquisa, este é um tipo de problema que apresenta diversos desafios técnicos, operacionais e científicos. Análise de possíveis roteiros de solução e de ferramentas e técnicas disponíveis e aplicáveis, formulação do modelo e definição de suas variáveis, construção e simulação do modelo, e coleta e análise de dados e de resultados.

Dessa forma, o desenvolvimento de um modelo de simulação computacional nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, com foco na melhoria do fluxo de abastecimento industrial, incrementa a base de conhecimento científico sobre gerenciamento operacional no setor Sucroenergético, de forma a possibilitar que os benefícios da modelagem

e simulação de processos, nas operações de CTT, se tornem acessíveis para empresas, pesquisadores, produtores e demais entidades interessadas do setor.

#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, apresentados de forma que permitam ao leitor entender o que foi proposto no estudo. Neste capítulo foi realizada a introdução, considerando a apresentação do tema do trabalho; a contextualização do setor Sucroenergético com suas operações de CTT da cana-de-açúcar; a descrição da problemática da pesquisa; a exposição do objetivo a ser alcançado; e as justificativas do interesse e relevância do tema.

No capítulo II é apresentado o referencial teórico estruturado em torno de três grandes temas, o setor Sucroenergético e suas operações de produção (corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar), a modelagem e simulação computacional, e a simulação computacional nas operações agroindustriais. No que tange o setor Sucroenergético, são abordados, temas relacionados ao histórico e representatividade do setor; à mecanização da colheita; e aos processos de produção da cana-de-açúcar abordados nesse trabalho. Sobre a modelagem e simulação de processos são abordados conceitos sobre os métodos de modelagem e simulação de processos; softwares de simulação; e etapas da modelagem e simulação de processos. Além disso, é discutido sobre os principais trabalhos de simulação computacional aplicada às operações agroindustriais.

No capítulo III apresenta-se o método de pesquisa, a caracterização da pesquisa e a justificativa pela escolha desse método. Nesse capítulo também é apresentada a estruturação da pesquisa de campo, contendo os elementos de pesquisa, as etapas da pesquisa, os processos para a coleta de dados e a maneira que é realizado o estudo.

No capítulo IV, consta uma breve apresentação da empresa onde o estudo é realizado; a descrição do cenário das operações de corte, transbordo e transporte; o desenvolvimento do modelo de simulação, assim como suas etapas de validação, análise e identificação de oportunidades de melhoria. Finalmente, no capítulo V são tecidas as considerações finais.

Além dos capítulos citados acima, a estrutura do trabalho apresenta as referências bibliográficas que foram utilizadas para a realização do estudo. Estão presentes artigos e livros que foram utilizados na elaboração desta dissertação. Ainda, destaca-se que ao final encontram-se os Apêndices.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico com os temas mais relevantes e que apoiaram o desenvolvimento do trabalho. Para isso está estruturado em torno de três grandes temas: a) o setor Sucroenergético e suas operações de produção (corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar); b) a modelagem e simulação computacional; e c) a simulação computacional aplicada às operações agroindustriais.

O referencial teórico teve como principais fontes de pesquisa as bases *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*. Além disso também foram utilizados livros específicos sobre o setor sucroenergético e suas operações e sobre simulação computacional de processos.

Destaca-se que foram utilizados mais de cinquenta artigos no referencial teórico, de modo que foram, predominantemente, encontrados na base *Scopus e Web of Science*, com os termos: “*Operation Management*”; “*Agribusiness*”; “*Sugarcane*”; “*Cut, Loading and Transportation*”; “*Modeling and Simulation*”; “*Simulation*”; “*Agricultural*” e “*Harvest*”. O *Google Scholar* foi utilizado para completar a base teórica com trabalhos de menor profundidade técnica, mas que contribuíram com informações sobre a cultura canavieira no Brasil, principalmente, no que se refere ao histórico e as operações da cana-de-açúcar.

### 2.1. O Setor Sucroenergético e suas Operações de Produção

Conforme roteiro dos temas abordados no referencial teórico, nesta subseção é descrito sobre o setor Sucroenergético. São apresentados temas relacionados ao contexto do setor; à mecanização da colheita; aos processos de produção da cana-de-açúcar; e aos principais parâmetros de desempenho desses processos.

No que tange às operações de produção, destaca-se que o setor Sucroenergético apresenta uma grande quantidade de operações divididas entre operações agrícolas, como preparo de solo; tratos culturais; plantio; corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, e operações industriais, como moagem e outros processos químicos e mecânicos que são responsáveis pela transformação da cana-de-açúcar em açúcar, etanol e energia.

Diante do escopo deste trabalho, as operações de produção abordadas no referencial teórico são as operações agrícolas de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, e a operação industrial de moagem da cana-de-açúcar que está relacionada ao ritmo de consumo da matéria-prima pela unidade industrial.

Por fim, são identificados os principais indicadores de desempenho das operações que são foco de estudo desta dissertação, de modo a contribuir com a identificação dos pontos relevantes das operações de CTT para as empresas sucroenergéticas.

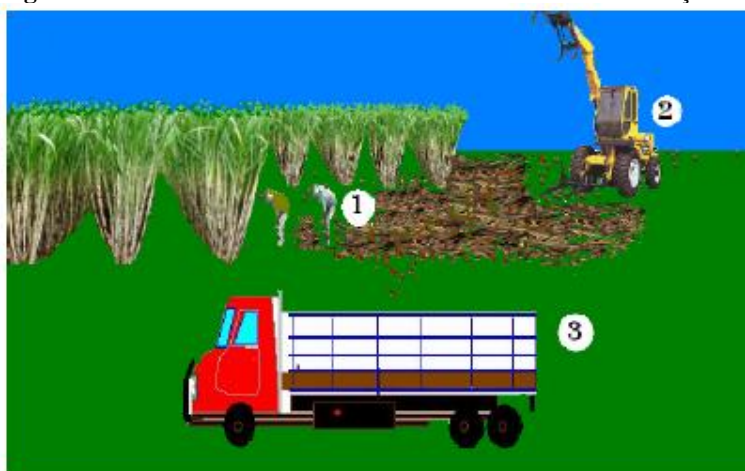
### 2.1.1. Mecanização da Colheita da Cana-de-Açúcar

De acordo com Vian *et al.* (2015) a mecanização de culturas agrícolas é o processo pelo qual as máquinas agrícolas são introduzidas no campo para realizar integralmente ou coadjuvar na execução das operações agrícolas, podendo essas serem máquinas autopropelidas, como os tratores e as colhedoras, ou pela utilização de implementos.

No que tange as operações de colheita de cana-de-açúcar, destaca-se que foram classificadas por Ripoli (1996) em três sistemas distintos: manual, semi-mecanizado e mecanizado. De acordo com Silva e Garcia (2009), as operações de colheita apresentam um processo global que envolve o corte, o carregamento, o transporte e a recepção da cana-de-açúcar, de modo que a diferença entre os sistemas está em como essas operações são realizadas, sendo no sistema mecanizado, as operações de corte, carregamento e transporte, feitas exclusivamente por meio de máquinas.

Conforme Figura 1, no sistema de colheita semi-mecanizado, o corte é realizado de forma manual pelos trabalhadores (1), que cortam a cana-de-açúcar, normalmente queimada e a deixa cortada no chão da frente de colheita. Após o corte, a cana é recolhida com auxílio de uma carregadora mecânica (2) que a coloca nos caminhões (3) para fazerem o transporte (SCOPINHO *et al.*, 1999; RANGEL *et al.*, 2009b).

**Figura 1:** Sistema de Colheita Semi-Mecanizado da Cana-de Açúcar



Fonte: Rangel *et al.* (2009b, p.1216)

Nesse ponto, destaca-se que, nesse sistema de colheita um trabalhador corta entre sete e doze toneladas de cana-de-açúcar por dia e em uma frente de colheita pode ter entre cem e duzentos trabalhadores para o corte da cana (SCOPINHO *et al.*, 1999). Ainda sobre a operação de carregamento, destaca-se que o tempo de carregamento da cana-de-açúcar, nesse sistema de colheita, é de aproximadamente quarenta minutos, e a ocupação da carregadora é dependente da quantidade de cana cortada na frente de colheita e da disponibilidade dos caminhões para o transporte (RANGEL *et al.*, 2009b).

Já no sistema de colheita mecanizada, a Figura 2 mostra que a colhedora (1) realiza simultaneamente as operações de corte e carregamento da cana-de-açúcar, estando a cana queimada ou não (SCOPINHO *et al.*, 1999). Nesse caso, há ainda a presença de um transportador conhecido como transbordo (2), que é um trator ou caminhão de menor capacidade e com maior mobilidade dentro do canavial utilizado para fazer o transporte da cana-de-açúcar do ponto de corte até os caminhões (3) de grande capacidade que irão transportar a cana para a usina (RANGEL *et al.*, 2009b).

**Figura 2:** Sistema de Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar



Fonte: Rangel et al. (2009b, p. 1217)

Nesse ponto, destaca-se que o tempo de corte e carregamento da cana-de-açúcar em um caminhão é de aproximadamente trinta minutos e uma colhedora de cana pode colher entre setecentos e mil toneladas de cana-de-açúcar por dia (SCOPINHO *et al.*, 1999; RANGEL *et al.*, 2009b), a depender da velocidade da máquina, da densidade do canavial, do comprimento das linhas de cana, entre outros fatores operacionais. Sendo assim, a partir de uma análise comparativa entre os sistemas de colheita, pode-se estimar que, em média, uma colhedora mecanizada substitui o trabalho de cem operários.

Destaca-se que, tanto no sistema de colheita semi-mecanizado quanto no mecanizado, após o corte e carregamento, a cana-de-açúcar é transportada diretamente para a usina, não sofrendo nenhuma espécie de armazenagem.

Destaca-se que a efetiva utilização das colhedoras para a colheita da cana-de-açúcar foi resultado de sucessivos acontecimentos que direcionaram para sua predominância nos sistemas de colheita atuais. Os fatores responsáveis por isso são: a) os impactos ambientais; b) escassez de mão-de-obra; c) pressões sobre as condições de trabalho; d) aumento de produtividade; e) redução de custos operacionais; e f) exigências do mercado consumidor. Esses fatores podem ser agrupados em dois grandes grupos, as restrições legais e os benefícios para o negócio (BRAUNBECK e OLIVEIRA, 2006; CAMARGO *et al.*, 2008; PAES, 2011).

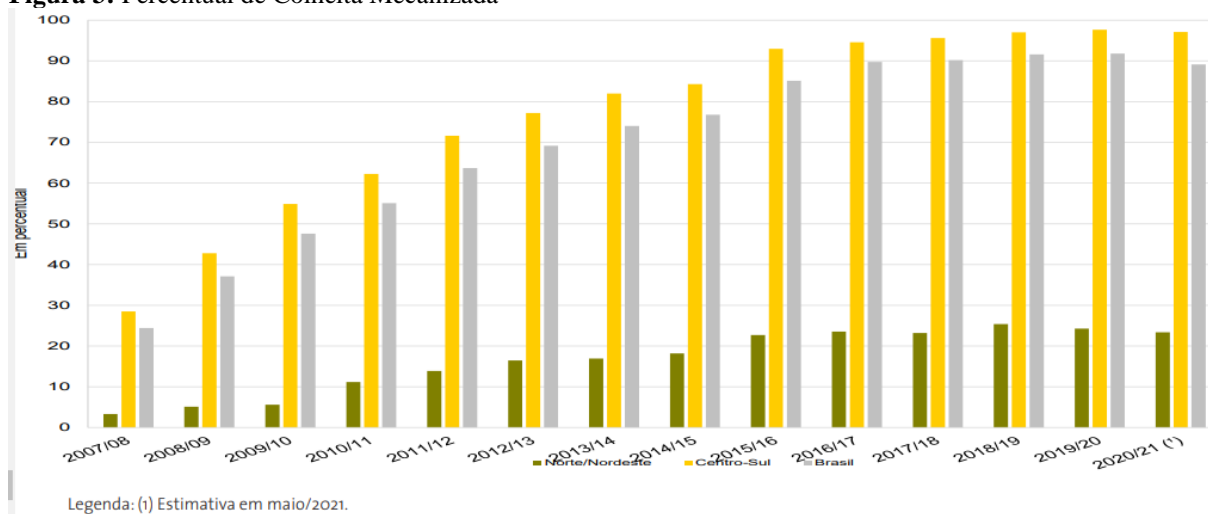
Scopinho (2004) apresenta os seguintes benefícios da mecanização para o produtor: o aumento da produtividade do trabalho com melhoria da qualidade da matéria-prima; maior agilidade na amortização do capital investido em inovações tecnológicas; e a diminuição de custos de produção agrícola, que segundo Camargo *et al.* (2008) com a mecanização é, em média, 30% menor.

Além disso, segundo Camargo *et al.* (2008) o mercado externo, principalmente o da Europa, é outro fator que faz pressão sobre o uso da mecanização da colheita, considerando sua preferência por somente adquirir etanol de procedência “limpa”, isto é, entre outros quesitos, sem queima na colheita.

Ainda é importante considerar que a adoção de colhedoras por parte dos empresários do setor deve ser analisada numa perspectiva mais ampla que compreende o investimento em modernização da agricultura (VEIGA FILHO, 1994; SOUZA, BAGOLIN e CORONA, 2010)

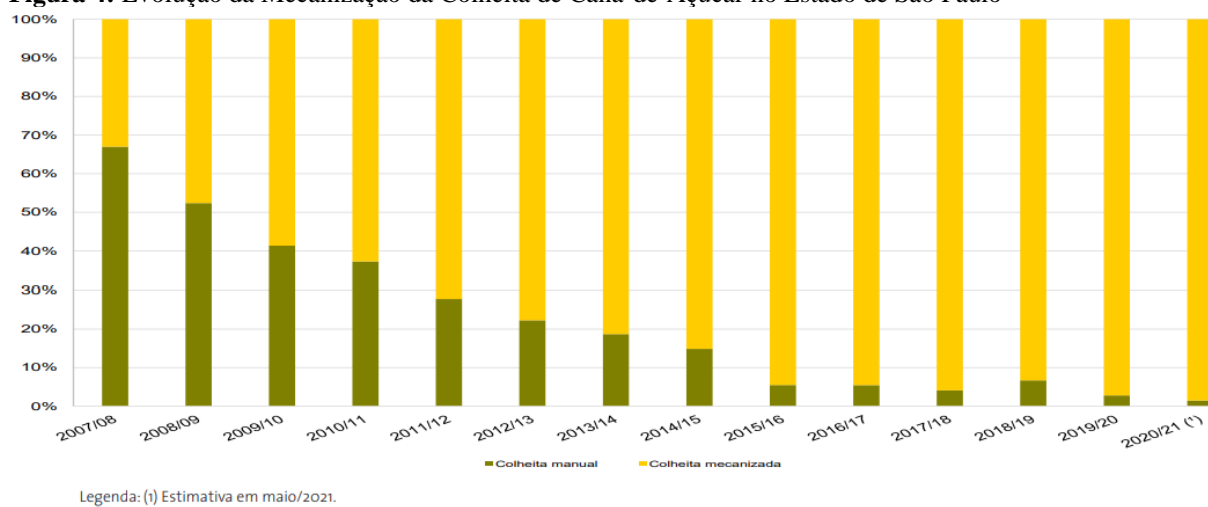
Como reflexo dessa evolução da mecanização, o levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB em 2021, no Brasil, demonstra que o sistema de colheita mecanizada teve considerável avanço nos últimos anos, como é apresentado na Figura 3.

Considerando o cenário do País, o percentual de mecanização da colheita que era de 24,4% na safra 2007/08, foi estimado em 89,1% na safra 2020/21. Sendo que nas duas safras anteriores esse índice já havia superado os 91% (CONAB, 2021).

**Figura 3:** Percentual de Colheita Mecanizada

Fonte: CONAB (2021)

No entanto, considerando somente a Região Centro-Sul, beneficiada por relevo que favorece a mecanização, o índice de mecanização da colheita já chega a 97,1%. Conforme a Figura 4, em São Paulo, estado mais expressivo na cultura canaveira, esse índice saiu de 33% na safra 2007/08 para 98,5% na safra 2020/21 (CONAB, 2021).

**Figura 4:** Evolução da Mecanização da Colheita de Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo

Fonte: CONAB (2021)

Essa evolução da mecanização também pode ser notada pela quantidade de colhedoras, podendo ser avaliada no Quadro 1. Nota-se que o Brasil possui 5.325 colhedoras de cana-de-açúcar na Safra 2020/21, de modo que 5.147 são da região Centro-Sul e apenas 178 da região Norte/Nordeste. Além disso, percebe-se que a Safra 2016/2017 foi a que apresentou maior número de máquinas e a mecanização já estava em patamares parecidos aos atuais (CONAB, 2021).

**Quadro 1:** Número de Colhedoras por Região no Brasil

Região	2009/10	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19	2019/20	2020/21
Centro-Sul	2.880	3.863	4.517	4.785	5.249	5.600	5.968	5.994	5.693	5.571	5.456	5.147
Sudeste	2.162	2.863	3.286	3.381	3.774	3.865	4.156	4.302	4.031	3.902	3.905	3.618
Centro-Oeste	582	790	997	1.114	1.153	1.325	1.415	1.258	1.239	1.257	1.168	1.163
Sul	136	210	234	290	322	410	397	434	423	412	383	366
Norte/Nordeste	67	114	149	166	174	185	201	201	198	194	185	178
Nordeste	44	66	104	115	119	131	148	145	146	143	142	137
Norte	23	48	45	51	55	54	53	56	52	51	43	41
<b>Brasil</b>	<b>2.947</b>	<b>3.977</b>	<b>4.666</b>	<b>4.951</b>	<b>5.423</b>	<b>5.785</b>	<b>6.179</b>	<b>6.195</b>	<b>5.891</b>	<b>5.765</b>	<b>5.641</b>	<b>5.325</b>

Fonte: CONAB (2021)

Houve barreiras e restrições para a mecanização da colheita da cana-de-açúcar que, em sua maioria, já foram superadas, a citar: a) elevados investimentos; b) ruptura no tipo de mão-de-obra; c) declividade do terreno; e d) espaçamento de linhas de cana.

No que se refere aos investimentos, apesar da viabilidade técnica, econômica e ambiental da colheita mecanizada frente aos outros sistemas, as operações de CTT são as mais onerosas do processo produtivo da cana-de-açúcar. Em artigo publicado na Revista Canavieiros, Guerra (2018) expõe a magnitude desses custos, a destacar o investimento na compra de equipamentos, tais como R\$ 1,3 milhões por colhedora, R\$ 350 mil por cavalo mecânico e R\$ 150 mil por carreta, e os maiores custos operacionais, tais como o consumo de diesel, de pneus, de lubrificantes e a manutenção dos ativos.

Considerando os diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar, tem-se necessidades de mão-de-obra específicas em cada um deles. Enquanto o corte manual da cana-de-açúcar exige do trabalhador atenção e grande dispêndio de esforço físico, a operação de uma colhedora exige atenção difusa, rapidez de raciocínio e conhecimento técnico. Para Ripoli *et al.* (2007) não se obterá sucesso na implantação e operação de uma tecnologia caso não se atente ao aspecto comportamental das pessoas envolvidas na sua operação e utilização.

No que se refere à declividade do terreno, Braunbeck e Oliveira (2006) reconhecem como um fator limitante à mecanização da colheita da cana-de-açúcar, de modo que é correlacionado com o percentual de inclinação dos terrenos e a tecnologia de colheita disponível. Ainda de acordo com os mesmos autores a falta de estabilidade ao tombamento e as deficiências de dirigibilidade, é que limitam a utilização das colhedoras em terrenos com declividades inferiores a 12%.

No que se refere ao espaçamento, é um tema relevante para o desenvolvimento da cultura canavieira, dado que ele afeta, entre outros, a utilização da área refletindo na produtividade; na adaptação varietal a partir da necessidade de nutrição de cada tipo de cana-de-açúcar, na eficiência operacional e necessidade de operações de preparo de solo. Nesse ponto, considerando a mecanização da colheita, destaca-se que as máquinas não apresentam a

flexibilidade necessária para atender os diferentes tipos de espaçamento, tendo os produtores, que adaptar seu canavial ao espaçamento que a colhedora pode colher (BELARDO; ROSA e MAGALHÃES, 2015).

Por fim, considerando que o foco desse trabalho está na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, na próxima subseção é abordado com maior profundidade as operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar.

### **2.1.2. Operações de Corte, Transbordo e Transporte da Cana-de-Açúcar**

As operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, também conhecida pelas suas iniciais, CTT, ou ainda pela substituição do nome da segunda operação de transbordo para carregamento, tornando-se CCT são as últimas operações agrícolas, as quais formam um elo entre o cultivo da cana-de-açúcar e a alimentação das usinas de processamento.

Para Veiga Filho (1999), essas operações são constituídas de três subsistemas, sendo: um de corte e carregamento; um de transporte; e o último de recepção da matéria-prima. De modo que, segundo o mesmo autor, esses subsistemas que compõem o arranjo técnico se relacionam entre si e estabelecem um fluxo de matéria-prima das frentes de colheita às unidades industriais.

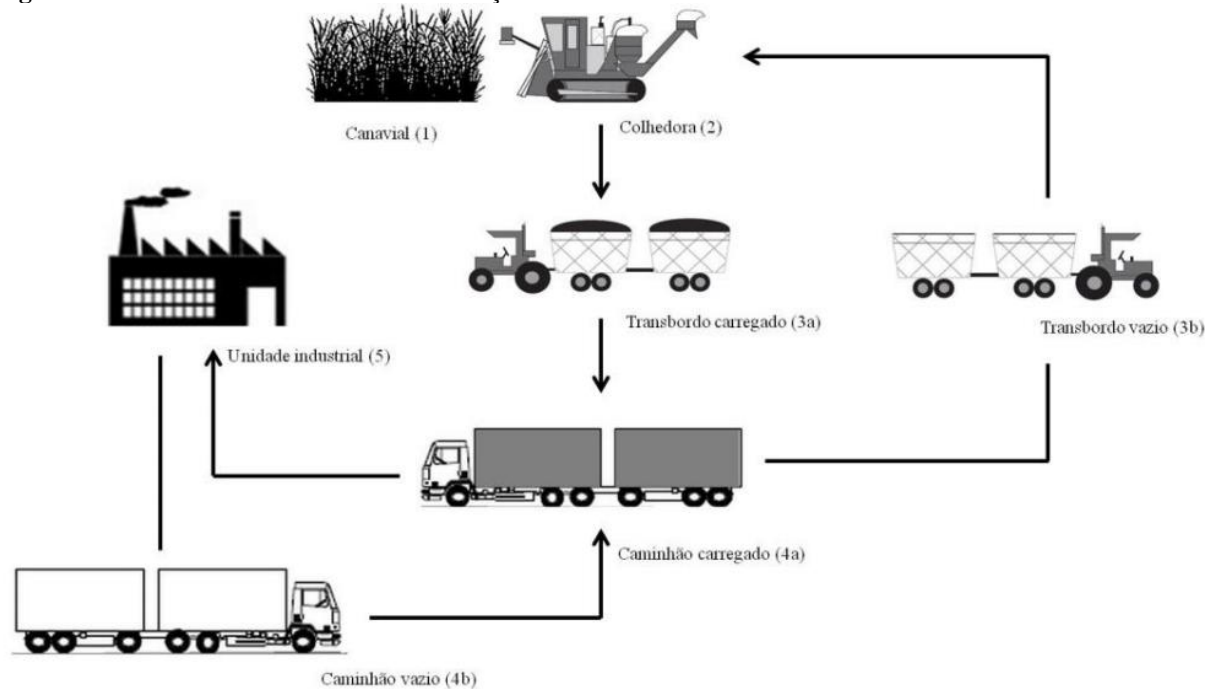
No que tange à sua representatividade em custos, as operações de CTT são as mais onerosas ao gasto agrícola, de forma que representam aproximadamente 40% dos desembolsos na produção da cana-de-açúcar, sendo assim o principal componente do custo operacional de produção (PECEGE, 2015). De acordo com Milan e Rosa (2015) esses custos podem ser fixos, que envolvem a depreciação da máquina, os juros, alojamento, seguros e taxas; ou variáveis, que se referem ao gasto com combustíveis e manutenção.

Considerando o processo de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, de forma simplificada, pode ser entendido a partir do vídeo no Apêndice A e descrito apoiado na Figura 5, da seguinte forma (MILAN e ROSA, 2015):

- a) a partir de um determinado canavial (1), a colhedora (2), promove o corte, a limpeza e o fracionamento dos colmos que são carregados no transbordo que a acompanha;
- b) o transbordo, composto por um trator e carreta(s), após atingir determinada carga (3a) se desloca até um ponto fora do talhão, local onde é feita a transferência da carga para um veículo de transporte, normalmente caminhão e carreta(s) (4a);

- c) ao atingir a capacidade de carga do veículo de transporte, este se desloca até a unidade industrial (5), descarregando a matéria-prima para o processamento (com início na moagem);
- d) tanto o transbordo (3b) quanto o caminhão (4b), retornam aos respectivos pontos de carregamento e o ciclo se repete ao longo da safra

**Figura 5:** Estrutura de Colheita da Cana-de-Açúcar



Fonte: Milan e Rosa (2015, p. 421)

Ainda, paralelamente a estas operações, existe um sistema de apoio, cujo objetivo é garantir o reabastecimento de combustível (comboio); a manutenção em campo (caminhão oficina); e a segurança operacional no que tange o risco de incêndio (caminhão bombeiro). De acordo com Milan e Rosa (2015), essas atividades, somada às manobras, embora essenciais para a operação, não produzem trabalho efetivo e os tempos produtivos dos equipamentos expressam a influência dessas atividades auxiliares. Sendo assim, por não ser objeto desse estudo, as operações de apoio não serão aprofundadas nesse referencial teórico.

No que tange a operação de corte, segundo Milan e Rosa (2015), dentre as máquinas disponíveis para colher a cana-de-açúcar, as colhedoras autopropelidas, popularmente conhecidas como combinadas ou cana picada, são as mais utilizadas. Essas máquinas realizam o corte, a limpeza parcial da matéria-prima, o fracionamento dos colmos e o carregamento da cana picada nos veículos de carga (nesse caso, transbordos).

Segundo Belardo, Rosa e Magalhães (2015), as colhedoras autopropelidas realizam 11 operações, sendo: o corte dos ponteiros; o levantamento e alinhamento dos colmos; o

tombamento dos colmos; o corte de base dos colmos; o levantamento da base dos colmos; o transporte dos colmos com separação da terra; a picagem dos colmos em rebolos; a limpeza primária da palha a partir da ventilação; o transporte dos rebolos através do elevador para descarga; a ventilação e limpeza secundária; e a descarga dos rebolos nos veículos transbordos.

O transbordo, conforme Rosa (2017) é um subsistema caracterizado pela movimentação interna no talhão da cana-de-açúcar colhida, de modo que seu tempo de ciclo é dado pela somatória dos tempos de: a) carregamento, que é o período que acompanha a colhedora e as unidades de carga demoram para serem cheias; b) deslocamento, que é o tempo consumido para movimentação entre o talhão e o ponto de transbordamento, onde a cana-de-açúcar é transferida para as carretas; e c) descarregamento, que é o tempo que o transbordo gasta para transferir a carga para o caminhão.

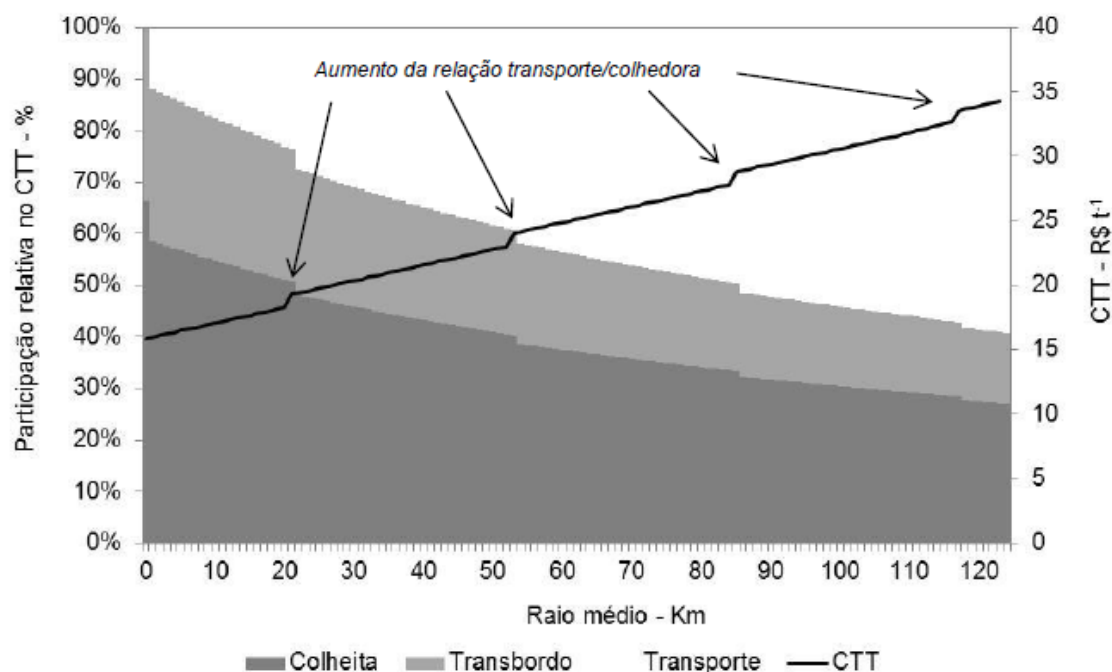
Nesse ponto, segundo Rosa (2017), as variáveis que interferem nos tempos de ciclo dos transbordos são: a) capacidade da colhedora; b) tamanho das unidades de carga dos transbordos; c) distâncias de ida e volta para o transbordamento; e d) velocidade de deslocamento.

O transporte, de acordo com Rosa (2017), é o subsistema que representa a interface final entre a produção agrícola e o processamento industrial da cana-de-açúcar, tendo seu dimensionamento parecido com o subsistema de transbordo, ou seja, considerando seu tempo de ciclo, que é formado pelos tempos de carregamento, deslocamento e descarregamento.

Rangel *et al.* (2009a) destaca que há diferença entre o tempo de deslocamento da usina para a frente de colheita (descarregado) para o tempo de deslocamento da frente de colheita para a usina (carregado), sendo esse último mais demorado pela maior carga que o caminhão deve movimentar.

Como fator que impacta drasticamente toda operação de CTT, Milan e Rosa (2015) indicam o raio ou a distância das frentes de colheita. Além de impactar diretamente no tempo de ciclo, a partir do tempo de deslocamento dos caminhões, tem forte viés econômico como mostra a Figura 6.

**Figura 6:** Participação relativa dos subsistemas de acordo com a variação do raio médio

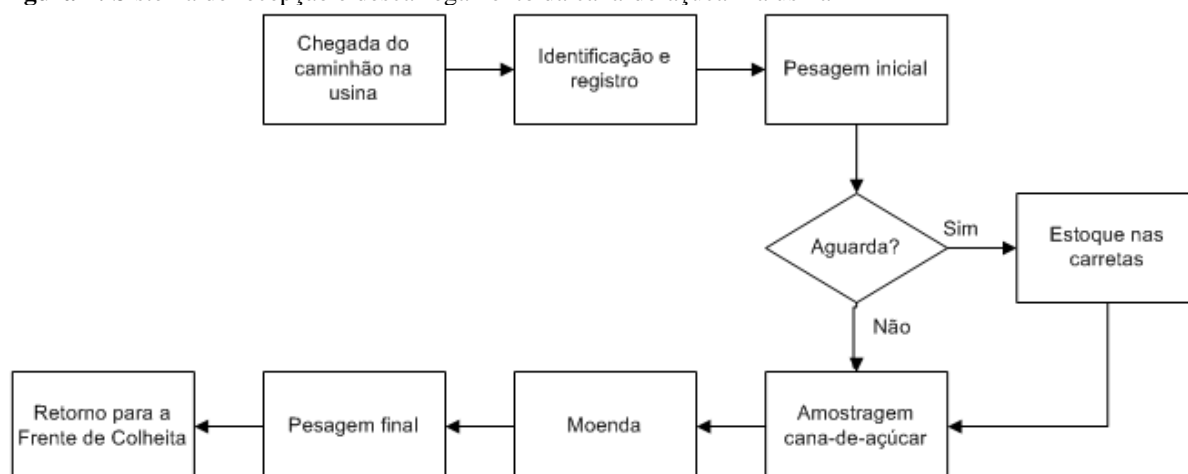


Fonte: Milan e Rosa (2015, p. 426)

No que se refere ao recebimento da cana-de-açúcar na usina, de acordo com Rangel *et al.* (2009b), esse subsistema é tão importante quanto as operações no campo, de tal modo que deve ser considerado, de forma integrada, ao fluxo operacional. Ainda, os mesmos autores ressaltam que existe relação direta entre a eficiência do sistema de descarregamento de cana-de-açúcar na usina com a capacidade de carregamento no campo.

Com base na Figura 7, Rangel *et al.* (2009a) descrevem de forma genérica os processos de descarregamento da cana-de-açúcar na usina da seguinte forma: a) o caminhão chega à usina e vai direto para o processo de identificação e registro, onde se verifica o tipo de cana transportada (se própria ou de terceiros) e o fornecedor; b) realiza-se a pesagem inicial do caminhão carregado de cana; c) de acordo com a fila de descarregamento é decidido se a cana ficará no estoque (própria carreta) ou se deve ir para a moenda (início do processo industrial); d) a partir da decisão de ir para a moenda, o caminhão segue para o setor de teste da sacarose onde é recolhida uma amostra da cana-de-açúcar para se detectar o teor de açúcares retidos; e) realiza o descarregamento na moenda; f) após o descarregamento na moenda, o caminhão vazio segue para a pesagem final de modo a se obter o valor da carga de cana-de-açúcar que foi fornecida à usina; e, por fim, g) o caminhão retorna para frente de colheita.

**Figura 7:** Sistema de recepção e descarregamento da cana-de-açúcar na usina



Fonte: Adaptado de Rangel *et al.* (2009a)

Apesar de parecer simples, o processo de colheita da cana-de-açúcar está exposto a inúmeras variáveis, tanto endógenas quanto exógenas, que aumentam exponencialmente a complexidade do processo e os desafios logísticos da operação, a citar:

- a) a entrega de cana deve respeitar a capacidade de moagem da indústria e a cota contratual com os fornecedores de cana;
- b) o tempo de transporte varia em virtude da distância entre os canaviais e as unidades industriais, e as condições da estrada;
- c) a quantidade transportada depende do tipo de carreta que está sendo utilizada, que de acordo com Machado *et al.* (2018) pode variar de 15 a 80 toneladas;
- d) o tempo entre o corte e o processamento deve ser gerenciado, porque segundo Grunow; Günther e Westinner (2007) elevados níveis de estoque de segurança pode gerar perda de ATR devido à rápida deterioração da cana-de-açúcar. De acordo com Veiga; Vieira e Morgado (2006) a moagem deve ser realizada com tempo inferior a trinta e seis horas após o corte;
- e) a produtividade das colhedoras depende, entre outras coisas, da disponibilidade mecânica do equipamento e da velocidade de corte;
- f) a densidade do canavial está ligada à vários fatores, tais como a variedade, as operações de tratos culturais, as operações de preparo de solo, citados por Silva e Garcia (2009), além da exposição às condições climáticas.

Segundo Milan e Rosa (2015) a sinergia operacional entre os subsistemas de colheita, transbordo e transporte é fundamental para que a entrega da cana seja feita de forma constante e regular, considerando a demanda estabelecida pela unidade industrial. Rangel *et al.* (2009b)

destacam que sistemas logísticos eficazes e eficientes são essenciais para tornar essa integração possível e permitir operar com custos e tempos adequados no sistema de abastecimento de cana-de-açúcar.

### **2.1.3. Principais Indicadores de Desempenho das Operações de Corte, Transbordo e Transporte da Cana-de-Açúcar**

De acordo com a Fundação Nacional da Qualidade – FNQ (2020), indicadores de desempenho geram informações quantitativas ou qualitativas que expressam a performance de um determinado processo, permitindo acompanhar sua evolução ao longo do tempo e compará-lo com outras organizações. Além disso, os indicadores de performance podem orientar na forma que o processo pode ser modelado.

Conforme Rosa (2013) diversos trabalhos foram conduzidos no sentido de elencar e descrever os principais indicadores das operações de CTT, especialmente para as colhedoras. No entanto, observa-se que a alteração dos indicadores é comum no decorrer do tempo, a medida que as operações tiveram transformações significativas no modo em que são realizadas.

A seguir são apresentados os principais parâmetros de desempenho nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, cuja abordagem se dará mais no sentido de identificar os indicadores de performance associados aos sistemas de transporte e de corte e transbordo mecanizado do que discutir valores de referência propriamente dito.

No que tange aos parâmetros de desempenho do transporte da cana-de-açúcar, Carreira (2011), considerando o impacto das variáveis no desempenho operacional, econômico e energético, destaca os seguintes indicadores: a) velocidade média na estrada (km/h); b) carga transportada por viagem (t/viagem); c) distância percorrida (km); d) tempo de carregamento (h); e) tempo de descarregamento (h); e f) consumo de combustível (L/km).

Já no que se refere ao sistema de corte e transbordo, Cervi *et al.* (2015), considerando o monitoramento e controle das operações, apresentam os seguintes parâmetros de desempenho: a) capacidade de campo operacional (ha/h); b) capacidade de campo efetiva (ha/h); c) eficiência de campo (%); d) capacidade de campo efetiva da colhedora (há/h); e) capacidade de produção operacional da colhedora (t/h); f) número de colhedoras (unidades); g) tempo total do ciclo de transbordo (h); h) tempo de carregamento do transbordo (h); i) tempo de descarregamento do transbordo (h); j) tempo de deslocamento do transbordo na ida (h); k) tempo de deslocamento do transbordo na volta (h); l) tempo total de deslocamento do transbordo (h); m) capacidade de

produção operacional do transbordo (t/h); e n) número de transbordos para atender uma colhedora (unidades).

Ainda no sistema de corte e transbordo da cana-de-açúcar, mas considerando aspectos mais amplos de desempenho, Oliveira (2015), destaca os seguintes indicadores: a) produção média por safra (t); b) horas trabalhadas por safra (h); c) produção em toneladas por hora trabalhada (t/h); d) capacidade operacional em toneladas por dia (t/dia); e) capacidade efetiva em toneladas por dia (t/dia); f) rendimento ou eficiência de campo (%); g) consumo de óleo diesel (L/h e L/t); h) consumo de óleo hidráulico (L/h e L/t); i) disponibilidade mecânica (%); j) disponibilidade global (%); k) custo de reparo e manutenção (R\$/h e R\$/t); l) custo por hora trabalhada (R\$/h); e m) custo por tonelada (R\$/t).

Por fim, em uma das mais detalhadas publicações sobre indicadores de desempenho da agroindústria canavieira, o Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial – IDEA (2012), apresenta uma grande gama dos parâmetros de desempenho no que se refere às operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, as quais são listadas, considerando a relação com o tema deste trabalho, no Quadro 2.

**Quadro 2:** Indicadores de Desempenho das Operações do CTT

CORTE E TRANSBORDO	TRANSPORTE
<p><b>Produtividade</b> cana colhida por colhedora por dia efetivo de safra (t/colhedora/dia) cana transbordada por dia efetivo de safra (t/transbordo/dia)</p> <p><b>Dimensionamento</b> colhedoras de cana por 1.000 ha de cana de açúcar cortados utilização média anual da frota de colhedoras (h/ano) utilização média anual da frota de tratores transbordos (h/ano) disponibilidade operacional da frota de colhedoras (%) disponibilidade operacional da frota de tratores transbordos (%) relação transbordo vs colhedoras (transbordo/colhedora) idade média das colhedoras (anos) idade média dos tratores transbordos (anos) corte de cana com frota de terceiros (%)</p> <p><b>Gastos e Consumo</b> consumo de combustível por hectare cortado de cana (L/ha) consumo de combustível das colhedoras por tonelada de cana colhida (L/t) consumo de combustível dos transbordos por tonelada de cana colhida (L/t) consumo de óleo lubrificante do motor por área de cana trabalhada (L/ha) consumo de óleo hidráulico ponderado por área de cana trabalhada (L/ha) consumo de óleo hidráulico das colhedoras por tonelada colhida (L/t) consumo de óleo hidráulico dos transbordos por tonelada transbordada (L/t) gasto com reparos e manutenção por colhedora (R\$/ano/colhedora) gasto com reparos e manutenção por transbordo (R\$/ano/transbordo)</p>	<p><b>Produtividade</b> cana transportada por cavalo mecânico na safra (t/cavalo mecânico/dia) cana transportada por conjunto rodotrem por dia efetivo de safra (t/rodotrem/dia) cana transportada por treminhão por dia efetivo de safra (t/treminhão/dia)</p> <p><b>Dimensionamento</b> caminhões canavieiros por 1.000 ha cortados de cana-de-açúcar número de semirreboques por rodotrem número de semirreboques por dolly utilização média anual da frota de caminhões (km/ano) disponibilidade operacional da frota de caminhões (%) disponibilidade operacional da frota de carretas (%) relação conjunto vs caminhão (conjunto/cavalo mecânico) idade média dos cavalos mecânicos (anos) transporte de cana com frota de terceiros (%)</p> <p><b>Gastos e Consumo</b> consumo de combustível por tonelada transportada (L/t) consumo de combustível pela distância percorrida (L/km) gasto com reparos e manutenção dos cavalos mecânicos (R\$/ano/cavalo) gasto com reparos e manutenção dos implementos rodoviários (R\$/ano/implemento)</p>
<b>ESTRUTURA DE APOIO</b>	
<p>equipamentos motorizados por comboista (equipamento/comboista) equipamentos motorizados por eletricista (equipamento/eletricista) equipamentos motorizados e implementos rodoviários por soldador (equipamento/soldador) equipamentos atendidos por comboio de abastecimento e lubrificação (equipamentos/comboio) equipamentos motorizados atendidos por caminhão oficina (equipamentos/caminhão oficina) caminhões bombeiro por 1000 ha cortados de cana (caminhão bombeiro/1000 ha)</p>	
<b>MOAGEM E OUTROS</b>	
<p>cana moída por dia efetivo de safra (t/dia) cana produzida por frente de corte por dia efetivo de safra (t/frente/dia)</p>	

Fonte: IDEA (2012)

## **2.2. Modelagem e Simulação de Processos**

Nesta subseção são apresentadas a modelagem e simulação de processos. São abordados temas relacionados ao histórico e finalidades da modelagem e simulação de processos; aos conceitos sobre os métodos de modelagem; aos conceitos de simulação computacional de processos; aos softwares disponíveis para a simulação de processos; além das etapas para modelagem e simulação de processos.

### **2.2.1. Histórico, Definição e Classificação da Modelagem e Simulação de Processos**

A modelagem e simulação de processos fazem parte do escopo de estudo da Pesquisa Operacional. De acordo com Morabito e Pureza (2018), a base da pesquisa operacional foi construída entre os séculos XVI e XX, a partir de contribuições de diversos cientistas, matemáticos e engenheiros.

No entanto, mesmo sem ser estabelecido com precisão, Gass e Assad (2004) relatam o surgimento da pesquisa operacional como uma abordagem delineada a partir do advento do radar e das atividades militares nos primórdios da Segunda Guerra Mundial, de modo que são amplamente considerados como o que fomentou esse campo de estudos.

Ainda, de forma mais abrangente, a pesquisa operacional teve grandes avanços nas décadas de 1950 e 1960, a destacar entre outros: a) modelos de programação linear; b) modelos de programação dinâmica; c) modelagem de sistemas dinâmicos; d) métodos de previsão (GASS e ASSAD, 2004; MORABITO e PUREZA, 2018).

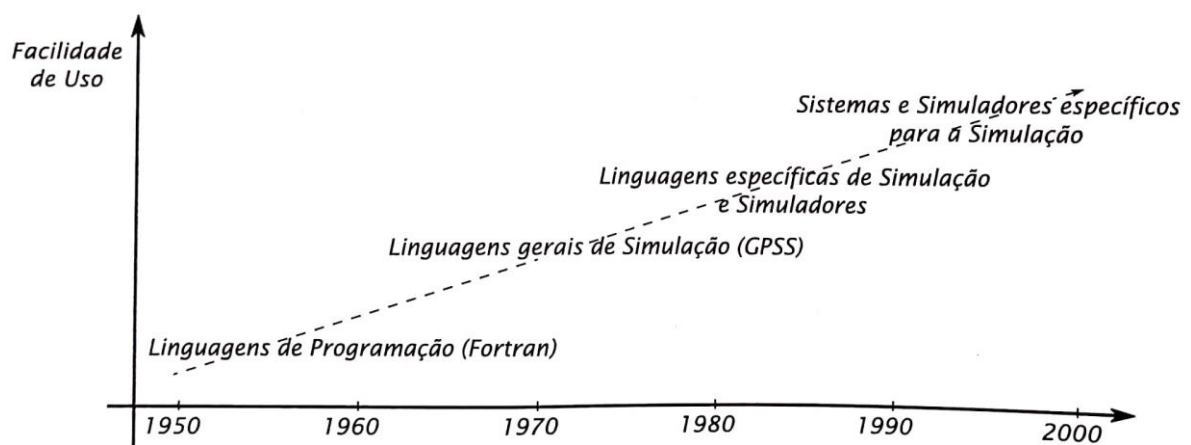
No que se refere à simulação computacional, considera-se como seus precursores dentro do campo de pesquisa operacional: a) a simulação de Monte Carlo, que foi concebido durante o Projeto Manhattan, que tinha como objetivo desenvolver a primeira bomba atômica; e b) a Teoria das Filas, a qual estuda as relações entre as demandas em um sistema e os atrasos sofridos pelos usuários desse sistema, considerando sua capacidade e a aleatoriedade das entradas no sistema (PRADO, 2017; MORABITO e PUREZA, 2018).

De modo geral, Morabito e Pureza (2018) destacam que os avanços teóricos em matemática e estatística e a criação de novas tecnologias em ciências de computação, tais como software e hardware, permitiram o aumento da complexidade das formulações e consolidaram a pesquisa operacional como um importante instrumento de apoio à tomada de decisão gerencial.

Na década de 1980, segundo Prado (2017) deu-se início à técnica de simulação visual, a qual devido sua capacidade de comunicação teve grande aceitação de uso, e tem-se como as principais linguagens conhecidas mundialmente Arena, Promodel, Automod e Siman.

De acordo com Saliby (1997), esses simuladores são softwares com interface própria para minimizar as linhas de programação, sendo que com a evolução das interfaces gráficas dos sistemas operacionais dos computadores, a simulação computacional se tornou muito mais fácil de operar, pois a construção dos modelos ficou mais gráfica e menos textuais. Na Figura 8 é possível verificar esses avanços na linha do tempo.

**Figura 8:** Evolução dos softwares de simulação



Fonte: Adaptado de Harrel e Tumay (1995)

Diante da relação entre os temas, antes da discussão do uso da simulação no setor sucroenergético, torna-se necessário discutir os termos “sistema” e “modelo”, os quais são conceitos fundamentais para a compreensão da modelagem e simulação de processos.

Considera-se como sistema um agrupamento de elementos inter-relacionados, que apresentam interação ou interdependência, e que atuam para atingir um objetivo comum, de modo que esses elementos podem ser pessoas, objetos, máquinas, matérias-primas, que executam atividades e estabelecem processos (PRADO, 2017).

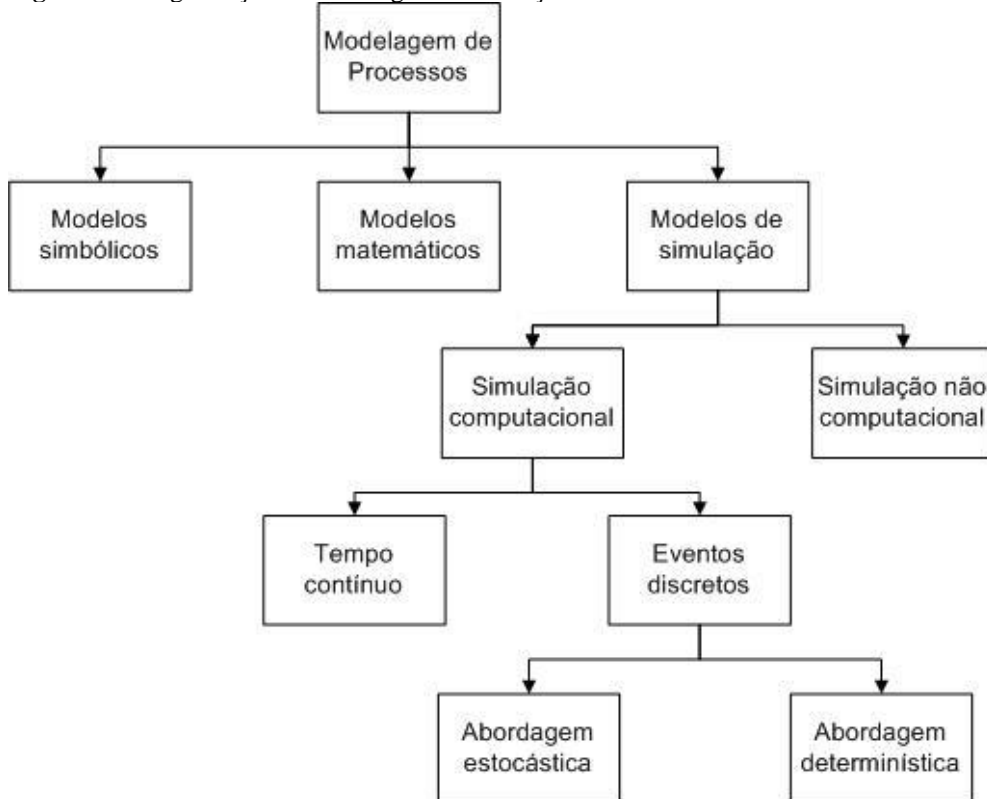
Já o termo modelo, considera-se como uma representação de um sistema, o que requer um grau de abstração e simplificação da organização e do funcionamento do sistema real, de modo que o foco seja sobre os aspectos e peculiaridades de interesse sobre o sistema que está sendo estudado (CHWIF e MEDINA, 2015; PRADO, 2017).

Nesse contexto, de acordo com Bateman *et al.* (2013), a simulação é um processo de experimentação com um modelo detalhado de um sistema real para determinar como esse sistema responderá a mudanças em sua estrutura, ambiente, condições que o cerca ou em algum

elemento que o constitui. Ainda, os mesmos autores destacam que a simulação é uma técnica de modelagem e análise usada para avaliar e aprimorar sistemas.

No que diz respeito às classes da modelagem e simulação de processos, destaca-se que existem algumas categorizações que fazem essa classificação baseada: a) no tipo de modelo; b) no uso de computador; c) na ocorrência durante a linha do tempo; e d) da abordagem dos dados. Essas categorizações podem ser vistas na Figura 9.

**Figura 9:** Categorização da modelagem e simulação



Fonte: Adaptado de Chwif e Medina (2015) e Morabito e Pureza (2018)

No que tange ao tipo de modelo, Chwif e Medina (2015) classificam a modelagem de processos em três classes:

- a) Modelos simbólicos, icônicos ou diagramáticos, os quais são compostos por símbolos e gráficos que representam um sistema de forma estática, de modo que há falta de elementos quantitativos e dificuldade de representar muitos detalhes do sistema. No entanto, apresenta benefícios para documentação e comunicação;
- b) Modelos matemáticos ou analíticos, os quais são identificados como um conjunto de fórmulas matemáticas, sendo em sua grande maioria de natureza estática, não apresentando soluções para sistemas complexos. Porém, quando é possível a solução analítica, sua resposta é rápida e exata;

- c) Modelos de simulação, os quais são poderosos e amplamente utilizados para analisar sistemas complexos, pois conseguem imitar as operações do sistema real à medida que este evolui no tempo. Por outro lado, são modelos que exigem maior esforço para a construção, logo leva-se mais tempo para obter o resultado desejado.

No que se refere à utilização de computador, Chwif e Medina (2015) destacam como uma grande classificação dentro da modelagem e simulação de processos, que apresentam duas classes, a simulação computacional, que necessita de um computador para ser realizada; e a simulação não computacional, que por sua vez, não precisa desse recurso para ser realizada.

Uma terceira forma de categorização refere-se ao comportamento das ocorrências durante o tempo, ou seja, considera as mudanças de estado do sistema ao longo do tempo (CHWIF e MEDINA, 2015).

De acordo com Morabito e Pureza (2018) essas ocorrências podem ser contínuas, em que os modelos buscam reproduzir sistemas cujo comportamento muda continuamente durante o tempo; ou podem ser discretas, em que os modelos devem representar sistemas que as mudanças ocorrem em pontos discretos do tempo. Ainda, de acordo com Pritsker (1995) em alguns casos pode ser necessário construir um modelo híbrido, ou seja, que compreenda simultaneamente a simulação contínua e a simulação discreta.

Por fim, no que se refere à abordagem dos dados, Morabito e Pureza (2018) destacam duas classes de modelos, que se diferenciam a partir da consideração ou não das incertezas nas variáveis do sistema, em que: a) a abordagem determinística é aquela que não considera as variações do sistema, definindo valores exatos no modelo; e b) a abordagem estocástica é aquela que considera as incertezas em torno das variáveis, trazendo a probabilidade de ocorrência para dentro do modelo.

No que se refere à aplicação da modelagem e simulação de processos, Chwif e Medina (2015), destacam sua amplitude e bons resultados tanto em setores da manufatura, como em linhas de montagem, sistemas de movimentação e armazenagem de materiais, células de produção automatizadas e problemas de programação da produção; quanto em setores de serviços, como em portos e aeroportos, bancos, centrais de atendimento, hospitais e supermercados.

Nesse ponto, Slack *et al.* (2009) apontam que a simulação é muito útil no projeto de operações muito complexas, como as operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar que são abordadas neste trabalho, sendo uma das abordagens mais fundamentais para a

tomada de decisão, considerando que os gestores podem explorar as possibilidades e verificar os impactos no sistema.

Ainda, Bertrand e Fransoo (2002) destacam que um dos avanços mais importantes da pesquisa operacional é o desenvolvimento de poderosas técnicas de predição de curto prazo. De modo que, a simulação de sistemas é apontada como uma opção para apoiar a tomada de decisão, também por possibilitar a criação e teste de modelos do sistema de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar.

### **2.2.2. Modelagem e Simulação Computacional de Processos**

Nesta subseção é aprofundado um pouco mais os conceitos de modelagem e simulação computacional de processos, abordando de forma mais específica a definição dos termos, as formas de utilização da modelagem e simulação computacional de processos, assim como suas vantagens e desvantagens.

De acordo com Pidd (1998), um modelo é uma representação externa e explícita de parte da realidade a partir da visão de alguém que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade. Segundo Paim et. al. (2009), para que os modelos possibilitem a tomada de decisão é necessário que a etapa da modelagem seja executada da melhor forma possível, de modo que o modelo reflita a realidade do sistema.

Morabito e Pureza (2018) destacam que um modelo deve ser suficientemente detalhado para captar elementos essenciais e representar o sistema real, ao mesmo tempo que deve ser suficientemente simplificado para possibilitar o tratamento por métodos de análise e resolução conhecidos.

Segundo Vernadat (1996) a modelagem de processos constitui uma maneira de fornecer visão sistêmica dos processos e cita como motivação para seu uso os seguintes pontos: a) gestão de sistemas complexos; b) melhor gestão de todos os tipos de processos; c) explicitação do conhecimento e *know how* organizacional; d) reengenharia de processos; e e) integração empresarial. Paim et. al. (2009) destacam que durante a modelagem do problema, torna-se necessário decidir três aspectos: escopo do modelo e abrangência, nível de detalhamento e escopo do projeto.

Dentre os vários tipos e classificações de modelos, destaca-se para esse trabalho o modelo estocástico, o qual de acordo com Naylor *et al.* (1971) são aqueles compostos por variáveis representadas por uma distribuição de probabilidade, e seu principal objetivo é

reproduzir, da maneira mais precisa possível, o comportamento de uma variável, incorporando a aleatoriedade pertinente a ambientes incertos, às simulações.

No que tange à simulação, Prado (2017) define como a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo simplificado que descreve o comportamento de um processo real.

De acordo com Sakurada e Miyake (2003), a simulação pode ser definida como uma ferramenta de apoio a tomada de decisão, que utiliza modelos para reproduzir um sistema em estudo e resolver problemas cuja solução analítica se mostre inviável. Dessa forma, destaca-se que a simulação reduz a incerteza na tomada de decisão, a partir do aumento da qualidade e confiabilidade das informações e do conhecimento do sistema, os quais, segundo Angeloni (2003) são elementos essenciais para o processo decisório assertivo.

A crescente popularidade dessa ferramenta é atribuída aos avanços da tecnologia computacional, à sua aplicabilidade no estudo de problemas complexos, e à demanda por agilidade e assertividade na tomada de decisão (SAKURADA e MIYAKE, 2003; MORABITO e PUREZA, 2018).

Paim *et al.* (2009) citam que a simulação é uma ferramenta muito poderosa para o planejamento, projeto e controle de sistemas, e a destacam por sua flexibilidade, já que sua utilização permite contemplar a variabilidade do sistema. Tumay (1996), salienta como principal força da simulação, a capacidade de incorporar situações estocásticas aos modelos, ou seja, a capacidade de considerar as incertezas para a tomada de decisão, de modo a gerar resultados dinâmicos e obter soluções viáveis de boa qualidade. Nesse ponto, destaca-se o potencial da ferramenta para processos produtivos, já que segundo Hopp e Spearman (2013, p. 295) “o aumento da variabilidade sempre reduzirá o desempenho de um sistema produtivo”.

Ainda sobre as funções da modelagem e simulação computacional, destacam-se como as principais:

- a) Avaliação, em que determina o grau de desempenho do sistema quando comparado com critérios específicos;
- b) Comparação, onde compara sistemas competitivos que executam funções específicas ou compara várias políticas propostas;
- c) Previsão, em que estima o desempenho do sistema segundo um determinado conjunto de condições;
- d) Análise de sensibilidade, em que determina quais fatores são mais significativos em termos de afetar o desempenho do sistema;
- e) Otimização; onde determina exatamente qual a combinação de fatores que

produzirão a melhor resposta do sistema;

- f) Relacionamento Funcional, em que estabelece a natureza do relacionamento entre um ou mais fatores significativos e a resposta do sistema.

Em relação à utilização da simulação, Shannon (1977) recomenda quando um ou mais fatores listados a seguir ocorrerem:

- a) Formulação completa do problema ou métodos analíticos de resolução do modelo matemático não existem ou ainda não foram desenvolvidos;
- b) Métodos analíticos são disponíveis, mas as hipóteses simplificadoras necessárias para aplicação invalidam a verdadeira natureza do problema;
- c) Existe teoria para métodos analíticos, mas a matemática envolvida é tão complexa que a simulação fornece uma solução mais simples;
- d) Quando se deseja observar a história simulada do processo em um certo período, assim como se deseja estimar certos parâmetros;
- e) A simulação é a única alternativa possível em função da dificuldade de se conduzir experimentos no ambiente em estudo;
- f) A redução de tempo se torna necessária para o estudo de fenômenos ou processos de duração longa, de modo que a simulação permite o controle sobre o tempo e os fenômenos;
- g) Pedagogicamente o uso da simulação reforça o aprendizado de abordagens analíticas e o próprio desenvolvimento do modelo de simulação pode potencializar ganhos de compreensão e conhecimento para gerar as soluções e os aperfeiçoamentos no sistema investigado.

No que se refere às vantagens proporcionadas pela modelagem e simulação computacional de processos Bateman *et al.* (2013) destacam: a) a previsibilidade de resultados; b) a consideração das variâncias do sistema; c) a promoção de soluções totais; d) favorece a criatividade na solução de problemas; e) é financeiramente viável; e f) apresenta grande diversidade de aplicação.

Além dessas vantagens citadas Shannon (1992) e Pegden *et al.* (1995) acrescentam:

- a) Maior versatilidade e simplicidade quando comparado à modelagem matemática convencional;
- b) Possibilidade de se comprimir ou expandir o tempo;
- c) Capacidade de parar um experimento em qualquer ponto para analisar o desempenho do sistema e suas partes, assim como identificar os elementos de estrangulamento;

- d) A possibilidade de testar novos projetos sem o envolvimento de recursos para sua aquisição ou implementação;
- e) A flexibilidade do nível de detalhe na representação do sistema.

Por fim, no que se refere às desvantagens da modelagem e simulação computacional de processos, Shannon (1992) e Pegden *et al.* (1995) apontam:

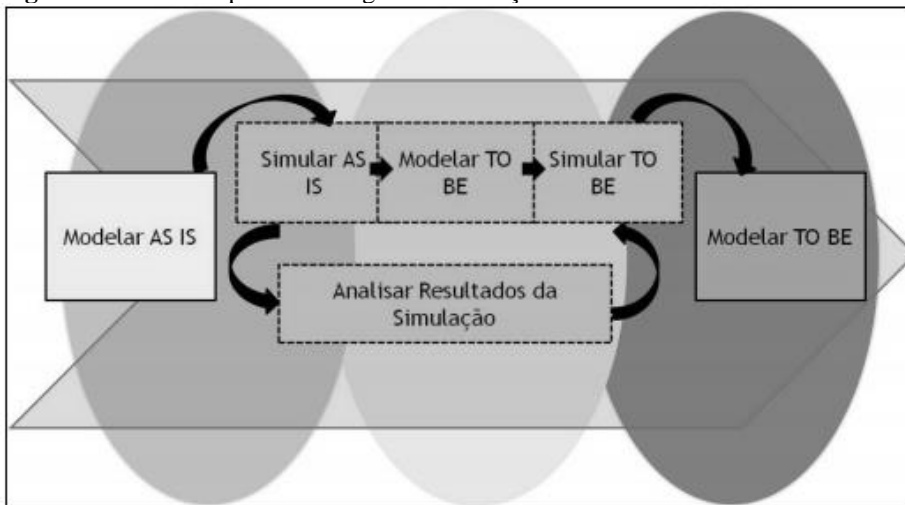
- a) O tempo de execução para obtenção de resultados significativos aumenta proporcionalmente a complexidade do sistema;
- b) A variação aleatória incorporada do sistema em estudo gera componentes aleatórios no resultado que podem levar a análises inconclusivas;
- c) O tempo e os recursos geralmente são restrições e limitam as faixas de valores dos parâmetros que podem ser testados, causando possíveis erros nas extrapolações;
- d) O desenvolvimento pode ser caro, especialmente nos casos da programação computacional, calibração e validação serem mais extensivos, se comparado aos modelos analíticos;
- e) Necessidade de treinamento especial da equipe para uso do simulador.

### **2.2.3. Etapas para a Modelagem e Simulação de Processos**

No que se refere às etapas da modelagem e simulação de processos, Paim et al. (2009) utilizam a Figura 10 para traduzir a utilização da simulação junto à lógica de modelagem de processos, além disso destacam como pontos que devem ser abordados:

- a) o levantamento de novos dados que devem ser incorporados na modelagem;
- b) a inclusão do tempo de execução das atividades no modelo;
- c) o desenvolvimento de uma lista de questões que o modelo deve responder;
- d) o desenvolvimento de medidas de desempenho para comparar as alternativas de modelo.

A partir da Figura 10, nota-se que a lógica começa com a modelagem da situação atual do processo, posteriormente é realizada a simulação dessa situação atual e sua consequente análise de resultados. Após a avaliação da situação atual do processo é realizada a modelagem de como o processo é desejado, realizadas as simulações no novo modelo e analisados os resultados dessas simulações. Nesse ponto, destaca-se que as análises da simulação do modelo atual e do modelo projetado são confrontadas, de modo que o modelo final é definido após os objetivos serem alcançados (PAIN et al., 2009).

**Figura 10:** Processo para Modelagem e Simulação

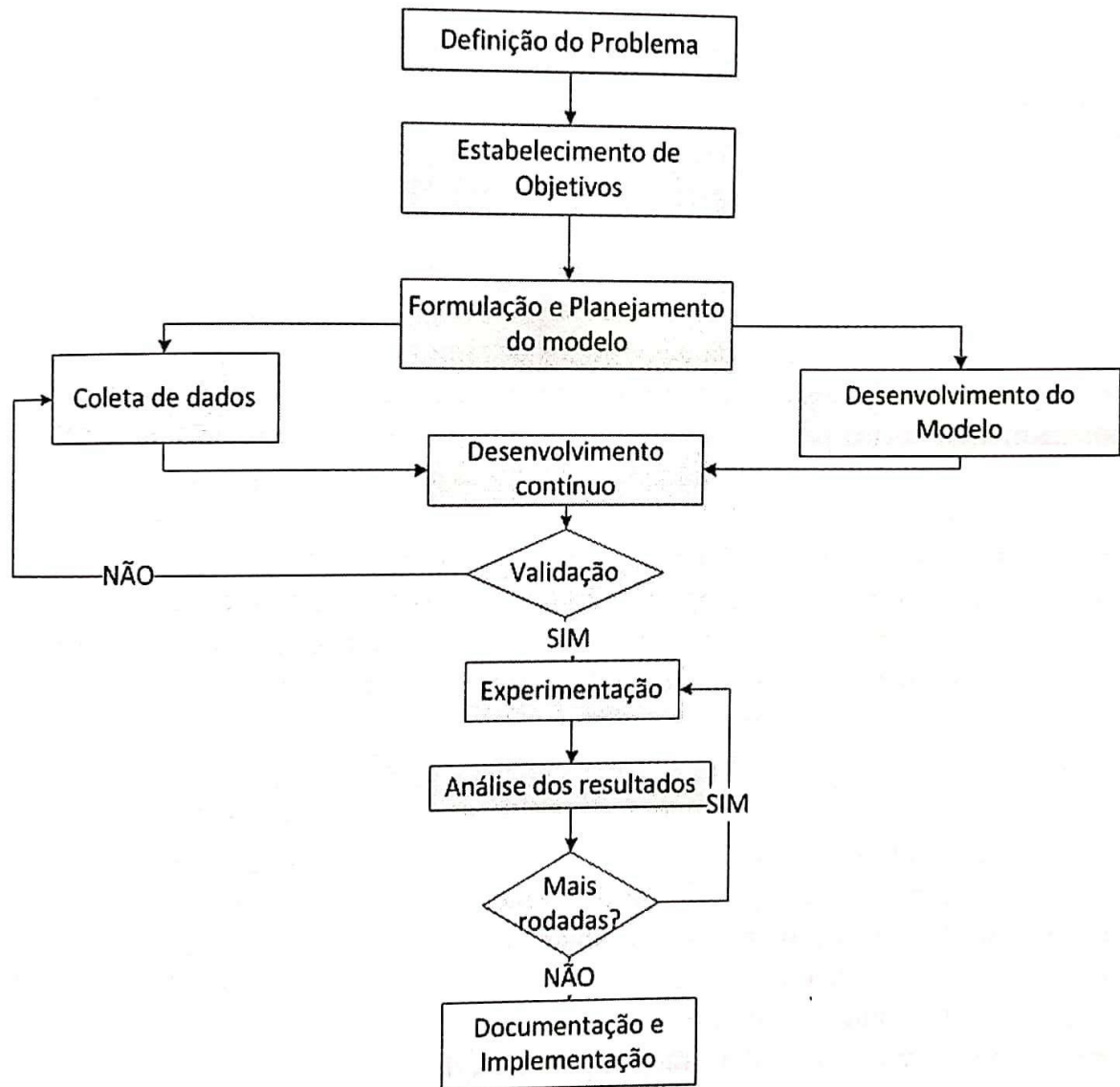
Fonte: Paim *et al.* (2009)

Sob a ótica da pesquisa operacional, Morabito e Pureza (2018) dividem a implantação da modelagem e simulação de processos em cinco fases, a citar:

- a) definição do modelo, em que são definidos o escopo do problema, as decisões de interesse, os objetivos envolvidos e o modelo conceitual do problema;
- b) construção do modelo, formada pela coleta e análise de dados para determinar os parâmetros a serem adotados no modelo;
- c) solução do modelo, onde são utilizados algoritmos e softwares de simulação computacional para solução do modelo e comparação com os objetivos de interesse;
- d) validação do modelo, etapa que é verificado se o modelo proposto descreve adequadamente o comportamento do sistema real;
- e) implementação da solução, etapa responsável por traduzir os resultados do modelo em conclusões e decisões práticas.

Bateman *et al.* (2013) usam o termo projeto de simulação para destacar que a construção do modelo no computador é apenas uma parte do esforço de proporcionar uma ferramenta útil para a tomada de decisão, de modo que utilizam a Figura 11 para explicar as etapas do projeto de simulação computacional.

**Figura 11:** Fluxo com as etapas e inter-relações para a modelagem e simulação de processos



Fonte: Bateman *et al.* (2013, p. 33)

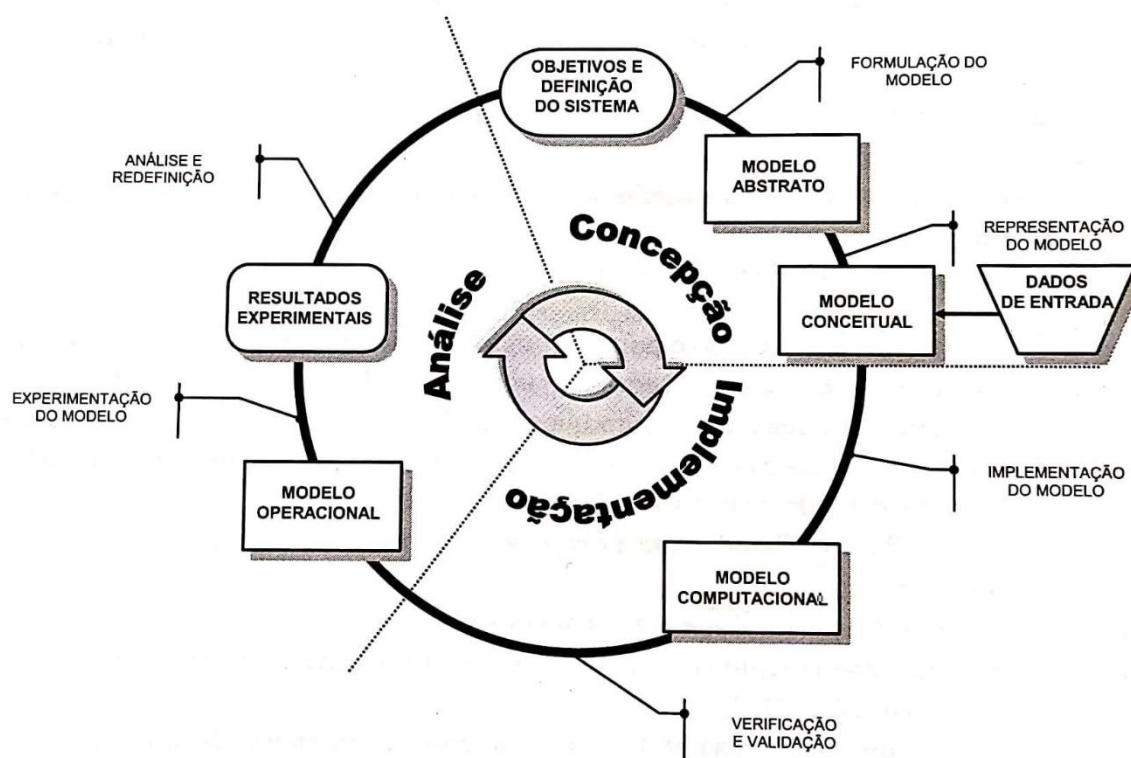
De acordo com Bateman *et al.* (2013) o projeto de simulação começa com a definição do problema e estabelecimento dos objetivos a serem alcançados, dada a necessidade do modelo ter o foco necessário para simplificar o sistema e gerar resultados a partir das análises da simulação. Posteriormente, os mesmos autores sugerem uma etapa de formulação e planejamento do modelo, em que um modelo conceitual poderá ser desenvolvido, contendo os eventos e elementos fundamentais.

Com a formulação e planejamento do modelo concluídos, Bateman *et al.* (2013) sugerem a realização da coleta de dados e o desenvolvimento contínuo do modelo, de modo que as atividades ocorrem de maneira iterativa em virtude de uma etapa de validação do modelo desenvolvido.

Esse ciclo de iterações termina quando a validação ocorre, de forma que o projeto caminha para etapa de experimentação, onde são desenvolvidos procedimentos e testes para analisar e comparar alternativas, de forma que essas análises podem ou não gerar a necessidade de novas rodadas de simulação. No momento em que não há mais necessidade de rodadas de simulação o projeto segue para sua última etapa, em que são realizadas a documentação do que foi desenvolvido e a implementação e modificação do sistema (BATEMAN *et al.*, 2013).

Com etapas muito parecidas, Chwif e Medina (2015) apresentam uma metodologia para a simulação computacional de processos, em que separam em três grandes fases como é apresentado na Figura 12, sendo: concepção ou formulação do modelo; implementação do modelo; e análise dos resultados do modelo.

**Figura 12:** Metodologia de simulação computacional de processos



Fonte: Chwif e Medina (2015, p. 9)

Na primeira fase, Chwif e Medina (2015), apontam a preocupação com: a) o entendimento com clareza do sistema e dos objetivos da simulação; b) a definição do escopo, suas hipóteses e seu nível de detalhamento; c) a coleta e confiabilidade nos dados de entrada; e) definição do modelo abstrato; e f) concretização do modelo conceitual.

Na fase de implementação o modelo conceitual é transformado em um modelo computacional através da utilização de alguma linguagem ou de um simulador comercial.

Posteriormente, o modelo computacional é verificado se atende o que foi construído no modelo conceitual, e por fim, a etapa de validação do modelo computacional ocorre a partir de alguns resultados gerados com foco na representatividade da realidade (CHWIF e MEDINA, 2015).

Na terceira fase o modelo computacional está pronto para realização dos experimentos, dando origem ao modelo operacional, em que são realizadas iterações do modelo, e os resultados da simulação são analisados e documentados. Nesta fase também são feitas as conclusões e recomendações sobre o sistema (CHWIF e MEDINA, 2015).

Chwif e Medina (2015) destacam que as etapas não devem ser interpretadas em uma sequência linear, pois em um estudo prático podem ocorrer diversas iterações e realimentações no processo, à medida que o entendimento do problema muda.

Além dos processos já apresentados, considerando a complexidade de algumas etapas, os próximos parágrafos abordam de forma um pouco mais profundas as etapas de: a) dados de entrada; b) desenvolvimento do modelo conceitual; c) verificação e validação do modelo computacional; e d) avaliação dos resultados experimentais. Salienta-se que a etapa de desenvolvimento do modelo computacional é abordada com maior profundidade na seção subsequente.

No que se refere à entrada de dados, Chwif e Medina (2015) resumem o estudo de modelagem em três etapas: a) a coleta de dados, em que é gasto um esforço para determinação da amostra, com atenção especial para seu tamanho, ordem de observação e considerando sua sazonalidade; b) o tratamento dos dados, em que é avaliada a estatística descritiva dos dados, identificação de outliers e outras análises para identificar possíveis falhas e aumentar nosso conhecimento acerca do fenômeno; e c) a inferência, em que são aplicados cálculos de probabilidade para inferir o comportamento da população a partir da amostra.

Ainda sobre a entrada de dados, no que se refere à coleta, Bateman *et al.* (2013) destacam que deve ocorrer de forma contínua durante o projeto de simulação, de modo que a ênfase inicial deve ser em dados macros e posteriormente em detalhamento, ou seja, nos dados micros. Ainda os mesmos autores relatam que se os dados estão incompletos ou são insuficientes deve-se: a) buscar suporte daqueles mais familiarizados ao sistema; b) reunir informações por si próprio; ou c) assumir determinados pressupostos para a construção do modelo.

Sobre o desenvolvimento do modelo conceitual, Chwif e Medina (2015) apontam que é antecedido pelo modelo abstrato, que considera o escopo, os objetivos e as métricas do projeto de simulação. Os mesmos autores destacam que esses modelos abstratos devem ser colocados

no papel através de alguma técnica adequada de representação de modelos de simulação conceitual e indicam para isso o *Activity Cycle Diagram (ACD)*.

De acordo com Chwif e Medina (2015) os ACDs apresentam forte característica de geração de fila, e apresentam somente dois símbolos para descrever o ciclo das entidades no sistema, sendo uma circunferência que representa uma fila e um retângulo que representa uma atividade. Além dessa ferramenta, os autores também listam: a) a simulação manual e o método das três fases; b) estratégia de evento; c) estratégia de atividade e d) estratégia de processo.

No que se refere à verificação e a validação, Chwif e Medina (2015) diferenciam esses temas relacionando a validação com o modelo conceitual, de modo a confirmar se está sendo desenvolvido o modelo correto; e a verificação com o modelo computacional, de modo a confirmar se está desenvolvendo corretamente o modelo. Nesse sentido, Bateman *et al.* (2013) reforçam que a validação tem o objetivo de garantir que o modelo reflete a operação do sistema, já a verificação tem o objetivo de garantir que o modelo funcione como o modelador desenhou.

Algumas das técnicas usadas para a validação dos modelos são: a) teste de Turing ou validação *black-box*; b) duplicação de modelos; c) comparação com modelos anteriores; d) análise de sensibilidade; e e) validação “face a face”. Já algumas técnicas para a verificação de modelos são: a) implementação ou verificação modular; b) valores constantes ou simplificados versus cálculos manuais; c) utilização do *debugger*, *trace* ou *depurador*; d) simulação manual; e) animação gráfica; e f) revisão em grupo (CHWIF e MEDINA, 2015).

Por fim, no que tange a avaliação dos resultados experimentais, Bateman *et al.* (2013) apontam sua importância para determinar a alternativa que atinge o melhor resultado, além de possibilitar a identificação de tendências que podem sugerir alternativas adicionais a serem consideradas.

Chwif e Medina (2015), apontam as seguintes etapas na análise de dados de sistemas terminais: a) estabelecer as medidas de desempenho adequadas; b) escolher a confiança estatística e a precisão com que se pretende trabalhar; c) definir o tempo de simulação, baseado na observação do sistema real; d) construir a amostra piloto e estimar o intervalo de confiança; e) determinar o número de replicações necessárias; f) rodar o modelo novamente; e g) calcular o novo intervalo de confiança.

No que se refere a sistemas não terminais, Chwif e Medina (2015) acrescentam os seguintes passos: a) começar a simulação em um estado próximo daquele esperado em regime permanente; b) rodar o modelo por um tempo de simulação longo; e c) eliminar dos dados de saída todos os valores gerados durante o período transitório ou de aquecimento.

#### 2.2.4. Softwares para Simulação Computacional de Processos

Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado diversos softwares de simulação computacional de processos, com aplicações nos mais diversos setores, permeando tanto em manufatura, quanto em serviços (SAKURADA e MIYAKE, 2003; PRADO, 2017). Nesse ponto destaca-se o trabalho de alguns autores que buscaram realizar comparação entre esses pacotes de simulação.

Sakurada e Miyake (2003), desenvolveram um trabalho comparando os pacotes de simulação Arena e ProModel. Nesse sentido, constataram que no Arena a construção do modelo é feita através da seleção do módulo que contém as características do processo a ser modelado, de modo que o modelador não precisa necessariamente conhecer a linguagem de programação para construir um modelo, utilizando os *templates* disponíveis o usuário pode extrair um módulo, localizá-lo no sistema analisado e parametrizá-lo de acordo com as características do sistema.

Por sua vez, no ProModel, os mesmos autores destacam que possui características voltadas para a manufatura, mas sua flexibilidade de programação permite aplicações em diversas áreas, além de construir lógicas complexas, a partir de seus recursos de análise estatística e interface simples (SAKURADA; MIYAKE, 2003).

No que se refere ao desempenho e a funcionalidade dos softwares utilizados no estudo, Sakurada e Miyake (2003), relatam similaridade entre os pacotes dado que no que tange aos requisitos para a modelagem de sistemas os softwares apresentaram desempenhos parecidos, a destacar ambos tiveram os mesmos 24% de requisitos não verificados, de modo que o Arena teve 71% verificado e 5% parcialmente verificado, e o ProModel teve 76% verificado.

Nikakhtar *et al.* (2011) também desenvolveram um trabalho comparando softwares de simulação, no entanto usaram os pacotes Arena e Witness 2004 Manufacturing Edition. No mesmo sentido do trabalho de Sakurada e Miyake (2003), constataram que há pouca diferença entre os pacotes, de modo que os softwares produzem quase os mesmos resultados e saídas para um processo de construção de um determinado modelo de simulação computacional.

Nesse sentido, Schriber; Brunner e Smith (2017) relatam que esses pacotes de simulação apresentam abordagens comuns entre si e que suas funcionalidades podem ser identificadas de forma generalizada. Dessa forma, os mesmos autores listam os seguintes termos genéricos:

- a) Entidade: considerada para designar uma unidade de tráfego dentro de um modelo, podendo ser interna (determinada pelo sistema) ou externa (organizada pelo modelador);

- b) Recurso: considerado para designar um elemento do sistema que fornece serviços, e que geralmente têm capacidade limitada;
- c) Elemento de Controle: considerado para designar uma construção que suporta outros tipos de atraso ou alternativas lógicas com base no estado de um sistema;
- d) Operação: considerada para designar uma etapa realizada por uma ou em uma entidade enquanto ela se move através de um sistema;
- e) Estrutura de gerenciamento de entidades: designa como as entidades se transformam dentro do sistema, e é composta pela lista de eventos atuais; lista de eventos futuros, lista de atrasos e lista de gestão do usuário.

Diante dessa abordagem generalizada e das características comuns entre os softwares de simulação, além de considerar o contexto deste trabalho, destaca-se que é importante que a escolha do pacote de simulação seja baseada em sua aplicação em outros trabalhos acadêmicos e na conveniência diante do acesso ao software.

Nesse ponto, considerando a relevância e singularidade do trabalho, foi realizada uma pesquisa na base Scopus, considerando o título, o resumo e as palavras-chave dos artigos, para verificar a quantidade de trabalhos com cada pacote de simulação.

Os pacotes de simulação utilizados na pesquisa foram levantados a partir do que já foi mencionado por Prado (2017) e do trabalho de Alavizadeh, Ortega e Mikhail (2016), em que estudaram sobre a forma de ensino dos cursos de modelagem e simulação de processos e identificaram os softwares com a seguinte pergunta aberta “Qual pacote de simulação você usa?”.

No que tange à forma de busca, foram consideradas duas pesquisas, sendo a primeira sem delimitar o setor econômico, e a segunda delimitando os trabalhos aplicados no agronegócio. Na primeira busca foi considerado o nome do software mais o termo “*simulation*”, e na segunda busca foram acrescentados os termos “*agribusiness*” ou “*agricultural*”.

Nesse ponto, vale destacar que apesar de os processos do agronegócio serem similares a outros da manufatura, a diferença na busca permite identificar uma tendência de utilização nas operações agrícolas, de modo que a escolha de um software ainda não explorado nesses processos pode fornecer *insights* ainda não identificados, suprir *gaps* existentes na utilização da ferramenta, além de contribuir para o ineditismo do trabalho.

O Quadro 3 apresenta a referida pesquisa, demonstrando os softwares considerados, assim como a quantidade de trabalhos encontrados em cada uma das buscas. Como pode ser observado, não foram encontrados trabalhos, considerando os critérios da segunda busca, em

três softwares Flexim, ProModel e Simio. Nesse ponto, de acordo com o segundo critério de seleção, a conveniência e facilidade em relação ao acesso do software, o ProModel é o pacote de simulação que melhor se adequa à realização desse trabalho.

**Quadro 3:** Resultado da pesquisa de pacotes de simulação na base Scopus

Pacotes de simulação computacional	Quantidade de trabalhos - Base Scopus	
	Busca 1*	Busca 2**
Taylor	81.760	465
Arena	2.700	24
Gasp	287	10
Simscrip	210	2
Stella II	41	2
Delmia	170	1
Gpss	752	1
Siman	302	1
Flexim	1	0
ProModel	217	0
Simio	157	0

\* (Nome do pacote de simulação) and "Simulation"  
 \*\* (Nome do pacote de simulação) and "Simulation" and "Agribusiness" or "Agricultural"

Fonte: Próprio autor

De acordo com Bateman *et al.* (2013), o ProModel foi inicialmente direcionado à sistemas de manufatura, no entanto sua flexibilidade possibilitou permear por outras áreas de produção e serviços. Além da sua flexibilidade, os mesmos autores destacam como vantagem em sua utilização: a) abordagem e utilização de termos genéricos de modelagem e simulação computacional; e b) a facilidade de uso diante de ações simples para a definição de locais, recursos e entidades, sequencias e rotas, e construir lógicas de operação.

No que se refere à utilização do ProModel, Bateman *et al.* (2013) descrevem que os modelos são definidos pelos módulos contidos no menu de construção, os quais são abordados com suas definições no Quadro 4. Ainda, os mesmos autores destacam que os módulos Informações Gerais, Locais, Entidades, Processamento e Chegadas são obrigatórios na modelagem, e que os demais são facultativos.

**Quadro 4:** Módulos e Funcionalidades do ProModel

<b>Módulos - ProModel</b>	<b>Descrição do Módulo</b>
Informações Gerais	Utilizada para realizar ajustes para unidades de tempo e distância, além de permitir notas explicativas para descrição do estudo e outros detalhes relevantes.
Locais	Pontos fixos através dos quais as entidades são processadas, de modo que a capacidade de processamento deve ser especificada, assim como a quantidade de equipamentos similares, o tempo de parada e a regra de enfileiramento.
Entidades	Configura os itens processados através do sistema, podendo representar pessoas, documentos de trabalho ou tudo o mais que requer recursos do sistema.
Processamento	Define as operações efetuadas e o roteamento de cada tipo de entidade em cada local no sistema, sendo definido por entidade e local onde sofre alguma ação ou aguarda o acesso ao local subsequente.
Chegadas	Especifica a introdução das entidades no sistema, determinando a frequência que cada entidade chega a um local, podendo ser definido por uma distribuição de probabilidade.
Recursos	É uma pessoa, equipamento ou transportador necessário para efetuar uma ação, podendo ser compartilhado entre locais ou estático.
Redes de Caminho	São os caminhos entre locais, em que as entidades se movimentam sozinhas ou com recursos, podendo ser configurado a partir de tempo ou considerando a relação distância e velocidade.
Turnos	Permite programar turnos de trabalhos para os recursos e locais, inclusive com paradas programadas durante o turno de trabalho.
Imagens de Fundo	Propicia que imagens sejam importadas para o modelo a fim fornecer melhor gestão visual da simulação do sistema.
Variáveis	Pode ser utilizada como um contador, uma chave lógica, um dispositivo de acompanhamento ou qualquer outro propósito adicional, podendo ser valores reais ou inteiros.
Atributos	É uma característica ou rótulo de uma entidade ou local que faz sua distinção das demais, permitindo um tratamento ou análise personalizado entre eles.
Matriz	Conjunto tabulado de valores que pode ser referenciada (a partir de uma linha e uma coluna), de modo que economiza tempo na construção do modelo.
Macros	Utilizada para simplificar a entrada de valores de expressões repetitivas, onde essa expressão é cadastrada em um nome que a assume quando selecionado.
Sub-rotinas	São blocos de códigos computacionais projetados para executar funções especiais ou ativar alguma lógica, podendo funcionar independentemente de outra lógica.
Ciclos de Chegada	Usado quando as entidades não chegam a uma taxa constante, permitindo definir a quantidade ou percentagem que ocorre a cada período de tempo.
Funções de Tabela	O modelo pode transferir valores independentes a uma tabela que retorna um valor dependente correspondente, de acordo com algumas relações definidas pelo usuário.
Distribuições do usuário	Permite o usuário definir distribuições estatísticas que reflita precisamente os dados reais, caso alguma distribuição padrão não atenda ao conjunto real de dados.
Arquivos externos	Os dados podem ser lidos a partir de arquivos externos, de modo que tais arquivos podem conter informações sobre chegada de entidades, tempos de operação ou sub-rotinas.
Ciclos	É uma série independente de números aleatórios entre 0 e 1, usada para determinar o valor selecionado a cada hora em que a simulação é colocada em teste.

Fonte: Adaptado de Bateman *et al.* (2013)

### 2.3. Simulação Computacional Aplicada às Operações Agroindustriais

De acordo com Slack *et al.* (2009), nenhuma operação produtiva existe isoladamente, mas faz parte de uma rede maior, interconectada com outras operações, formando uma rede de relações. Assim acontece com as operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, que são objeto de estudo deste trabalho. Os mesmos autores atestam que a simulação é

especialmente útil no projeto de operações muito complexas, como o sistema citado, sendo uma das abordagens mais fundamentais para a tomada de decisões.

Ripoli *et al.* (2007) ressaltam que para o sucesso dessas operações é necessário investir em eficiência logística, e Bateman *et al.* (2013) colocam a modelagem e simulação como ferramentas essenciais, uma vez que na logística a maioria dos aspectos relacionados à movimentação nas operações, como o tempo ou mudanças de locais, são incertos.

Nesse contexto, esta subseção apresenta trabalhos de modelagem e simulação de processos desenvolvidos em sistemas produtivos agroindustriais. Para melhor organização e abordagem no que se refere ao objetivo deste trabalho, os temas foram divididos em dois grandes grupos: a) modelagem e simulação computacional em processos agrícolas, os quais abordam sistemas de outras culturas e outras operações de produção da cana-de-açúcar; b) modelagem e simulação computacional nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, que abordam somente os trabalhos já realizados nesse sistema.

Destaca-se que em ambos os casos os trabalhos são apresentados em ordem cronológica no que se refere a publicação e são abordadas as informações de maior relevância e maior potencial de contribuição com esta dissertação.

Analisando as publicações, nota-se que há um esforço crescente em desenvolver e aplicar métodos quantitativos para apoiar na tomada de decisão das operações em sistemas agrícolas. No setor sucroenergético o destaque é para os modelos de planejamento da colheita e os modelos de programação do transporte da cana-de-açúcar, ambos relacionados ao sistema de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar.

### **2.3.1. Modelagem e Simulação Computacional em Processos Agrícolas**

Em um dos mais amplos trabalhos sobre sistemas mecanizados agrícolas, Bochtis, Sorensen e Busato (2014) realizaram uma revisão sobre os avanços na gestão de máquinas agrícolas e apresentam as investigações desde o início dos anos 2000 até 2013, totalizando 31 trabalhos. Os autores classificam esses trabalhos em cinco grandes temáticas no âmbito da gestão de sistemas mecanizados: a) planejamento da capacidade, que diz respeito a seleção qualitativa e quantitativa dos componentes de produção em relação a demanda; b) planejamento dos tempos operacionais, que trata da disponibilidade de tempo para realização das operações; c) alocação dos recursos para realização das operações nos períodos definidos; d) otimização dos trajetos das máquinas agrícolas durante as operações; e e) avaliação do desempenho dos

equipamentos no campo, em que comparam, principalmente, os valores planejados com os realizados.

Considerando os desafios de gestão da colheita mecanizada de arroz, Busato (2014) desenvolveu um modelo de simulação dedicado, utilizando a representação matemática para avaliação dos parâmetros de desempenho, além de demonstrar o potencial da ferramenta na gestão desse sistema agrícola. O modelo foi desenvolvido na plataforma ExtendSim, um software focado a modelagem de sistemas discretos, contínuos e mistos. De acordo com o autor, os resultados na validação do modelo foram satisfatórios, com erro na predição dos parâmetros operacionais variando entre 2,59% e 3,12%.

Zhou (2015), com o objetivo de melhorar o desempenho econômico e operacional das máquinas agrícolas na produção de batata, desenvolveu um modelo computacional utilizando o software Matlab, integrado com GPS para aquisição de dados reais. Para validação do modelo, o autor aplicou em 4 campos experimentais e com acompanhamento de 5 operações mecanizadas, de modo que a precisão do modelo foi considerada satisfatória no que diz respeito a previsibilidade das eficiências (com erros entre 0,46% e 4,84%) e as capacidades de campo (com erros entre 0,72% a 6,06%). O autor salienta que o modelo pode ser empregado como ferramenta de apoio no planejamento e dimensionamento operacional e econômico de sistemas mecanizados.

Zakidizaji, Bougari e Khorasani (2016) desenvolveram um modelo para simulação dos custos operacionais da colheita mecanizada de trigo. A estrutura de cálculo foi fundamentada em três partes: a determinação das horas de trabalho, o nível de perdas na colheita e o cálculo econômico. Segundo os autores, o planejamento e escalonamento das operações de colheita são importantes, principalmente, para produções de maior escala, considerando as perdas por pontualidade. Os autores ainda destacam que apesar do custo crescente com o atraso da colheita, não é sempre que se justifica a aquisição de uma nova máquina, de modo que dependendo da escala, o aluguel é uma alternativa mais viável.

Cunha *et al.* (2016) utilizaram a metodologia de superfície de resposta (MSR) e desenvolveu modelos para verificar a influência de variáveis como comprimento médio de entrelinhas, velocidade e declividade das áreas no desempenho operacional de operações mecanizadas na cafeicultura. Dentre as conclusões os autores destacam que a MSR se mostrou como importante ferramenta para verificar o efeito das variáveis nos parâmetros de desempenho, além de que os modelos gerados apresentaram alta significância estatística.

### 2.3.2. Modelagem e Simulação Computacional nas Operações de CTT da Cana

Neste tópico são considerados os trabalhos de modelagem e simulação computacional de processos com foco nas operações de CTT da cana-de-açúcar. Destaca-se que foram, predominantemente, considerados trabalhos com foco na simulação, no entanto alguns trabalhos com outros tipos de modelagem foram avaliados quando havia contribuição no sentido de identificação das variáveis significativas para o sistema.

Desse modo, o Quadro 5, Quadro 6 e Quadro 7 sintetizam os trabalhos selecionados, considerando a descrição do modelo desenvolvido e suas principais contribuições, a partir do viés apresentado neste trabalho.

**Quadro 5:** Modelagem e Simulação de Processos Aplicados ao CTT da Cana-de-Açúcar (continua)

Autores/Ano	Descrição do Modelo	Principais Contribuições
Milan (1992)	Desenvolveu um modelo em linguagem Fortran 77, considerando todas as etapas do sistema de colheita para identificar os fatores críticos e estratégias gerenciais dos equipamentos envolvidos.	A partir de uma análise de sensibilidade o autor destaca que as características relacionadas ao transporte são as de maior impacto no sistema, principalmente em relação à capacidade de carga.
Singh e Pathak (1994)	Desenvolveram um simulador para auxiliar o gerenciamento do sistema mecanizado de cana-de-açúcar na Tailândia. O sistema, denominado "DSS", possibilita a simulação em diferentes cenários que avaliam os custos de colheita.	Apesar do foco em custos, o modelo tem grande contribuição operacional, possibilitando determinar o número de caminhões necessários para atender a colhedora, a partir da velocidade média, tempo de espera para descarregamento e capacidade de carga.
Salassi e Champagne (1998)	Desenvolveram um modelo computacional com o software Quattro Pro 6.01, visando comparar três diferentes sistemas de colheita mecanizada de cana-de-açúcar, considerando dois com colhedora de cana inteira, sendo um com uma fileira e outro com duas fileiras, e um terceiro considerando uma colhedora de cana picada.	O modelo estima a quantidade de máquinas necessárias para cada situação de colheita, e verificam os custos envolvidos na operação, a partir da relação entre demanda de cana e o desempenho dos equipamentos. A simplificação das entradas é uma lacuna do trabalho, porém o modelo contempla todo o sistema de colheita, fato que não é muito comum nos modelos aplicados ao tema.
Barnes et al. (1998)	Desenvolveram um modelo de simulação no software Arena, para analisar o sistema de colheita de cana-de-açúcar, com o objetivo específico de verificar formas de reduzir atrasos na entrega da matéria-prima.	A aplicação e análise do modelo indicaram que reduções nos atrasos de moagem são possíveis através do escalonamento das quantidades de matéria-prima entregues.
Higgins et al. (1998)	Desenvolveram um modelo computacional baseado em programação linear, para otimizar a produção de açúcar e a receita líquida. Considera a capacidade limitada da indústria, que gera a formação de filas e ociosidade da planta, quando os rendimentos máximos são atingidos.	Observaram a possibilidade de 8% de aumento na rentabilidade da atividade, considerando a época e idade de colheita, a variedade da cana, o tamanho das áreas e a capacidade de produção das frentes de colheita.
Diaz e Pérez (2000)	Desenvolveram um sistema de simulação com técnicas de otimização e superfícies de resposta, para identificar gargalos logísticos no transporte da cana-de-açúcar, oferecer soluções e apoiar a tomada de decisão.	Variáveis fundamentais no sistema: a) tempo de desengate do conjunto vazio; b) tempo de entrada e saída do talhão de cana; c) tempo de espera para carregamento; d) tempo de manobra da colhedora; e) indisponibilidade da colhedora; f) tempo de engate do conjunto cheio; g) tempo de deslocamento carregado; h) tempo de espera para a pesagem; i) tempo de pesagem; j) tempo de deslocamento para a área de descarregamento; k) tempo de espera para o descarregamento; l) tempo de transferência para a área de conjuntos vazios; m) tempo de engate do conjunto vazio; n) tempo de deslocamento vazio; o) indisponibilidade do caminhão.
Arjona, Bueno e Salazar (2001)	Desenvolveram um modelo de simulação discreta (SIMACT), considerando o fluxo de matéria-prima, a partir de dados de quantidade e tempo, com o objetivo de reduzir o número de máquinas necessárias e avaliar o impacto econômico da operação mecanizada.	As variáveis consideradas no modelo foram: a) cana disponível para colheita; b) cana colhida; c) cana colhida por colhedora; d) cana carregada por carregadora; e) cana transportada por caminhão; f) tempo de processamento de cana; g) tempo perdidos por condições climáticas; h) tempo de caminhões esperando na lavoura; i) tempo de carregamento dos caminhões; j) tempo de deslocamento dos caminhões do talhão ao pátio da usina; k) tempo de espera dos caminhões no pátio da usina. Os autores relatam que é possível reduzir o número de conjuntos, desde que tenha melhora nas suas eficiências.

Fonte: Próprio Autor

**Quadro 6:** Modelagem e Simulação de Processos Aplicados ao CTT da Cana-de-Açúcar (continuação)

Autores/Ano	Descrição do Modelo	Principais Contribuições
Iannoni e Morabito (2002)	Com o objetivo de analisar a integração entre os processos agrícolas e industriais, desenvolveram um modelo de simulação computacional utilizando o software Arena, para avaliar e propor alternativas de operação ao sistema de recepção de cana, da balança até a moenda.	Os autores destacam que o modelo é capaz de representar de forma satisfatória o sistema, revelando as melhores alternativas, dependendo da ótica operacional desejada.
Higgins e Davies (2005)	Desenvolveram um modelo de planejamento de transporte da cana-de-açúcar na Austrália, em que o principal modal de transporte é o ferroviário, considerando o número de colhedoras, as áreas de colheita, a janela de colheita, o sequenciamento dos ramais de transporte e os pontos de manobra.	Os autores identificaram a melhor jornada de trabalho para melhor eficiência de colheita, estimando: a) o número de locomotivas e mudanças necessárias; b) o número de vagões necessários e; c) os atrasos para a operação de colheita resultante do sincronismo irregular entre colhedoras e vagões de transporte.
Iannoni e Morabito (2006)	Desenvolveram um modelo de simulação no software Arena, com o objetivo de analisar o desempenho dos processos de recepção da cana-de-açúcar e investigar configurações alternativas e políticas para suas operações. As principais variáveis consideradas foram: quantidade e tipo dos equipamentos de transporte; quantidade de frente de colheita; capacidade de produção das frentes de colheita; restrições físicas para alocação de equipamentos; e funcionamento do processo de transporte das áreas agrícolas para a indústria.	Os autores agregaram ao modelo a separação dos equipamentos com especificações diferentes e a utilização de uma abordagem estocástica para contemplar as incertezas do sistema. Assim, observaram que a liberação dos reboques no estoque intermediário, e a configuração do mix de frota proporcionam benefícios aos sistema de fornecimento de cana, aumentando a quantidade média de matéria-prima descarregada.
Silva (2006)	Desenvolveu um modelo de simulação das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar para avaliar cenários de entrega contínua de matéria-prima em jornadas de trabalho inferiores a dez horas por turno com os mesmos equipamentos.	Embora o modelo representa apenas um sistema de colheita de cana inteira, a simulação possibilitou verificar que a alternância de turnos de quatro horas teve o melhor desempenho, de modo a balancear jornadas, além de considerar produções por tipo de cana e risco de falta de matéria-prima.
Grunow, Gunter e Westnner (2007)	Desenvolveram um modelo por meio de programação linear inteira mista, com o objetivo de construir uma hierarquia de decisão para estruturar os problemas táticos e operacionais envolvidos no fornecimento de cana-de-açúcar para uma usina de açúcar da Venezuela.	Dentre as variáveis utilizadas, destacam-se: a) cultivo das áreas de cana; b) colheita; e c) alocação das equipes e equipamentos de colheita. Os autores destacam a flexibilidade do modelo que pode ser facilmente adaptado a qualquer usina, bem como a adequação do modelo hierárquico à estrutura organizacional da indústria açucareira.
Mundim (2009)	Desenvolveu um modelo computacional baseado em simulação estocástica, com o objetivo de representar o envio de caminhões para as frentes de colheita, tanto pelo método estático como dinâmico, cuja diferença está na flexibilidade de viagens entre as frentes de colheita.	A utilização do modelo permitiu o autor concluir que as decisões logísticas afetam a produtividade dos equipamentos e consequentemente, seu custo operacional, de modo que diante das condições propostas os menores custos estão atrelados ao método de envio dinâmico.
Silva, Alves e Costa (2011)	Desenvolveram um modelo de simulação discreta para a determinação de turnos de trabalhos dos operadores de equipamentos agrícolas, com o objetivo de apoiar as tomadas de decisão em torno da logística de entrega de cana, diminuindo os riscos de parada industrial.	Os autores verificaram que dentre os principais fatores, o pátio de cana foi o de maior influência nas operações de CTT, visto que regula o cálculo de cotas de matéria-prima a serem entregues e, consequentemente, as jornadas de trabalho dos operadores.
Silva (2012)	Desenvolveu módulos de roteirização em arco no TransCAD, com o propósito de simular e analisar as etapas de CTT da cana-de-açúcar para o planejamento industrial, visando a otimização do processo de colheita e a redução de custos operacionais.	Os fatores considerados no modelo foram a geometria e o tamanho dos talhões, os pontos de manobra e de transferência de carga e os ciclos operacionais. De acordo com a autora, os resultados obtidos foram satisfatórios, afirmando a utilidade da ferramenta no planejamento operacional de uma planta sucroenergética.
Ramos (2014)	Desenvolveu dois modelos matemáticos para otimizar o planejamento de plantio e colheita da cana-de-açúcar. O modelo inicial preconizava a divisão otimizada da área de plantio em talhões, visando o máximo rendimento da colhedora de cana-de-açúcar, enquanto o segundo tinha por objeto a escolha da variedade para cada talhão, com intuito de se obter a maior produção em quatro cortes por meio da indicação da época de plantio.	O autor destaca que alocação dos talhões gerada pela ferramenta, permitiu uma redução de mais de 40% na quantidade de manobras das colhedoras, além de apresentar uma estimativa de produção de quase 18% a mais que a produção convencional.
Bocanegra-Herrera e Vidal (2016)	Desenvolveram um modelo de simulação de eventos discretos, em linguagem C++ e no ambiente Qt Creator, para o sistema de abastecimento de cana-de-açúcar, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão nas operações de CTT, incluindo as janelas de tempo e as incertezas inerentes ao sistema e as filas de cada operação.	Para considerar os fatores aleatórios e as particularidades do sistema de CTT, os autores utilizaram três cenários, de modo que contemplando os efeitos dos períodos chuvosos, o impacto das frentes de colheita que ficam longe da unidade industrial e o impacto de uma nova configuração de pátio. Destacaram que embora não tenha sido usado um otimizador, o algoritmo interno explora diferentes fatores e pode ajudar a determinar configurações de sistema satisfatórias sob as medidas de desempenho consideradas.

Fonte: Próprio Autor

**Quadro 7:** Modelagem e Simulação de Processos Aplicados ao CTT da Cana-de-Açúcar (conclusão)

Autores/Ano	Descrição do Modelo	Principais Contribuições
Tomazela et al. (2017)	Desenvolveram um modelo de simulação no software Arena, para analisar como o desempenho das operações de CTT da cana-de-açúcar pode ser mensurado com o uso da metodologia de modelagem e simulação de eventos discretos. Os pontos levantados na pesquisa foram: a quantidade e o tipo de corte das frentes de colheita; o parque de equipamentos, incluindo a quantidade, a especificação e a capacidade; o processo de colheita e entrega de cana-de-açúcar na unidade de processamento; o processo interno na unidade industrial; e as informações de moagem.	A aplicação do modelo proporcionou: a) redução da utilização média dos caminhões bate e volta de 97% para 90% e elevação da utilização dos caminhões escravos de 26% para 75%; b) redução média de 6 minutos nos tempos de espera das entidades nos talhões; c) redução de 20,27% das quantidades de cana em processo, que representa 203 toneladas; d) aumento no poder de predição do comportamento do sistema; e) balanceamento da utilização de equipamentos.
Faria et al. (2019)	Desenvolveram um estudo de caso combinando a simulação de eventos discretos com a teoria da utilidade multi-atributo, para avaliar diferentes configurações do sistema de entrega de cana-de-açúcar nas usinas sucroenergéticas.	Os autores avaliaram dezoito alternativas por meio da simulação discreta e, usando a decisão multi-atributo realizou a ponderação e a análise das alternativas. Dentre os resultados, destacaram: a) o custo da frota foi o fator de maior importância; b) as configurações com sistemas externos apresentaram os melhores valores; c) para as configurações do sistema estudado a melhor composição foi com 28 conjuntos rodoviários, 12 conjuntos adicionais e 6 unidades de trator.
Patitad, Watanabe e Wichaisri (2020)	Desenvolveram um modelo de simulação computacional no software Arena, para analisar e propor melhoria na logística de entrada dos caminhões de cana-de-açúcar, visto que o alto tempo de espera para descarregamento devido ao número de caminhões é um problema que causa perda de ATR da cana.	Os autores subdividiram o modelo em cinco grupos, sendo: a) caminhões fora de filas em áreas externas; b) caminhões em fila para os estoques; c) balança; d) área interna; e e) linhas de produção de açúcar. Dentre os resultados da simulação, destacam a redução de tempo de espera dentro e fora das áreas, impactando de forma positiva no número de caminhões que chegam.

Fonte: Próprio Autor

Ainda, vale reafirmar que as operações de CTT da cana-de-açúcar são complexas e ocorrem simultaneamente em diferentes lugares, de modo que os sistemas logísticos estruturados para integrar as operações agrícolas e industriais são importantes para assegurar a eficiência das unidades sucroenergéticas, sendo a modelagem e simulação computacional de processos uma excelente ferramenta para estruturar esse sistema (ARJONA, BUENO e SALAZAR, 2001; IANNONI e MORABITO; 2006; TOMAZELLA *et al.*; 2017).

Diante disso e dos trabalhos avaliados, destaca-se como desafios na modelagem e simulação de processos das operações de CTT da cana-de-açúcar:

- a. a integração de todas as operações da cadeia, desde as frentes de colheita até o início da moagem industrial, considerando as operações de transporte e de recebimento da cana-de-açúcar nas unidades industriais;
- b. a operacionalização do modelo para gerar cenários a tempo de fornecer subsídios para tomada de decisão gerencial nas operações de CTT;
- c. um modelo único que atenda às necessidades de simulação em diferentes horizontes de tempo, seja para o planejamento semanal ou para o planejamento da safra;
- d. um modelo cuja estrutura agrícola atenda mais de uma unidade industrial, atendendo operações que atuam em clusters.

### **3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Neste capítulo objetiva-se caracterizar e apresentar os principais procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa. Para isso foi dividida em duas subseções: a) caracterização da pesquisa, em que são definidos e justificados a natureza, a abordagem e o método de pesquisa que foram utilizados nessa dissertação; e b) pesquisa de campo, em que foram estabelecidos os elementos de pesquisa, as etapas da pesquisa, o roteiro para coleta de dados e a análise dos dados.

#### **3.1. Caracterização da Pesquisa**

A pesquisa foi feita em uma das unidades de negócio de um grupo com atuação no agronegócio, o qual apresenta parte de suas operações voltadas ao setor sucroenergético, sendo suas unidades de processamento de cana-de-açúcar localizadas no interior do estado de São Paulo.

Por motivos de confidencialidade, a empresa estudada será tratada apenas como “empresa”. Nesse ponto, destaca-se o viés ético da pesquisa, que se compromete com a fidelidade das informações e dados coletados, de modo que todo o trabalho foi autorizado pelos responsáveis dos processos estudados, em nome da empresa.

No que tange a caracterização da pesquisa, para atingir o objetivo proposto foi realizada uma pesquisa com abordagem predominantemente qualitativa visando construir um artefato para melhorar o fluxo produtivo entre as operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar e a indústria.

Segundo Godoy (1995b), a pesquisa qualitativa é uma abordagem descritiva, em que o ambiente de pesquisa é a fonte direta de dados e o pesquisador é o instrumento fundamental, de modo que a obtenção dos dados parte do envolvimento direto do pesquisador com o ambiente de pesquisa, ainda após a coleta o pesquisador utiliza o enfoque indutivo na análise de seus dados.

A abordagem qualitativa é focada na identificação das características de eventos e organizações (LLEWELLYN; NORTHCOTT, 2007). Segundo Zanelli (2002, p. 83), o principal objetivo dessa abordagem é “buscar entender o que as pessoas apreendem ao perceberem o que acontece em seus mundos”.

Dada a complexidade, supracitada, das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, a abordagem qualitativa é justificada a partir de Liebscher (1998), que destaca

que essa abordagem é viável quando o fenômeno em estudo apresenta alta complexidade, natureza social e difícil quantificação.

Ainda, segundo Freitas e Jabbour (2011), a abordagem qualitativa apresenta vantagem no que se refere à profundidade e à abrangência do estudo, visto que o valor das evidências que podem ser obtidas e trianguladas por múltiplas fontes e a relação próxima e sistêmica do objeto de estudo permite ao pesquisador detalhes informais e relevantes, que dificilmente seriam alcançados com a abordagem quantitativa.

No que se refere ao método de pesquisa utilizado, destaca-se que foi selecionado o *Design Science Research* (DSR), o qual permite o desenvolvimento de um modelo (artefato) que represente um sistema real e possibilite a avaliação de sua utilização com contribuições teóricas e práticas, corroborando para o propósito do mestrado profissional.

O *Design Science Research* é um conjunto de técnicas analíticas que permitem o desenvolvimento de pesquisas nas diversas áreas, e tem como objetivo estudar, pesquisar e investigar o artificial e seu comportamento, tanto do ponto de vista acadêmico quanto da organização, se constituindo em um processo rigoroso de projetar artefatos para resolver problemas, avaliar o que foi projetado e o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos (BAYAZIT, 2004; ÇAĞDAŞ; STUBKJÆR, 2011; VAISHNAVI e KUECHLER, 2015).

De acordo com Simon (1996), o DSR surgiu pela necessidade de criar uma ciência que se dedique a propor como construir artefatos que possuam certas propriedades desejadas, sendo considerada uma ciência do projeto, que tem como interesse “o quê” e “como” as coisas devem ser, de modo a realizar objetivos.

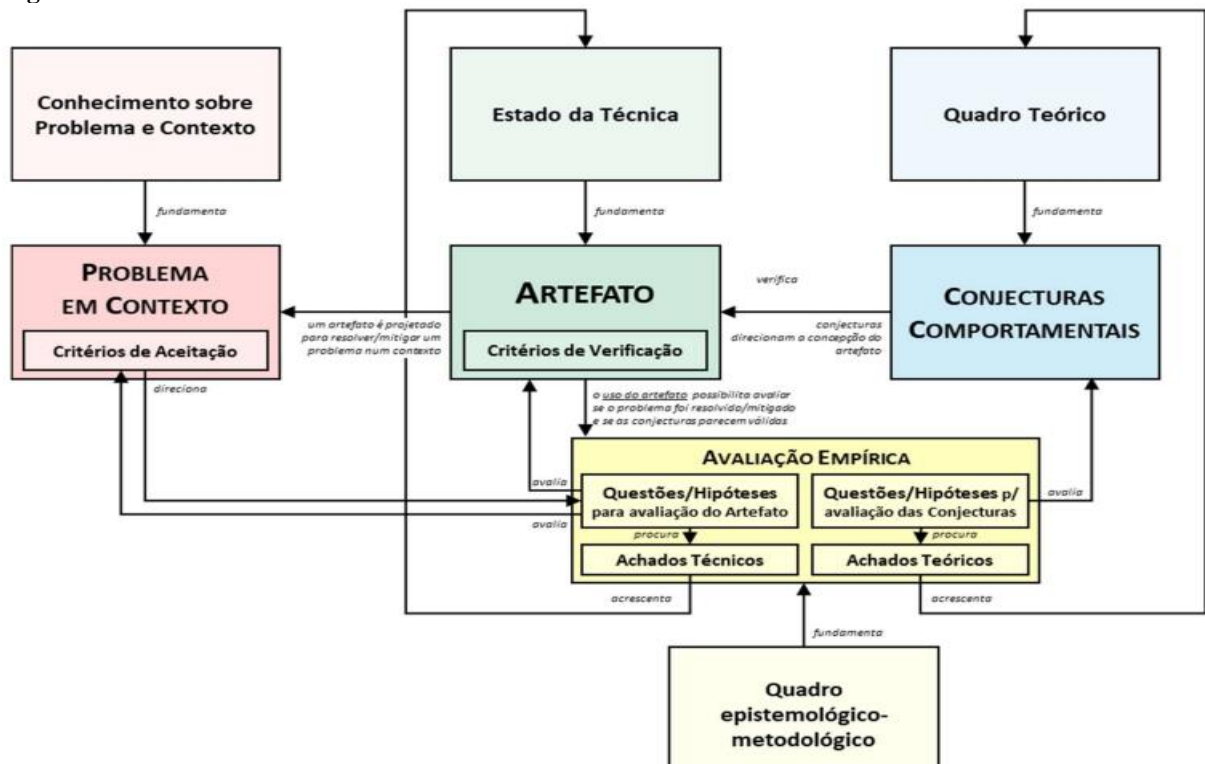
Nesse ponto, Simon (1996) caracteriza um artefato como objetos artificiais que podem ser caracterizados com objetivos, funções e adaptações, em que são normalmente discutidos durante sua concepção, tanto em termos imperativos como descritivos. Ainda destaca que pode ser considerado como uma interface entre um ambiente interno, a organização do próprio artefato e as condições em que ele funciona.

Para March e Smith (1995) os artefatos podem ser tipificados como Constructos, Modelos, Métodos e Instanciações. Nesse ponto, destaca-se que o artefato objeto desta dissertação se enquadra como um Modelo, que segundo os mesmos autores é um conjunto de proposições ou declarações que expressam as relações entre os constructos, de modo a representar situações como problemas e soluções, sendo necessário capturar a estrutura da realidade para ser uma representação útil.

Para Pimentel, Filippo e Santos (2020) o DSR é uma abordagem que tem duplo propósito: a) desenvolver um artefato para resolver um problema prático num contexto organizacional; e b) gerar novos conhecimentos técnicos e científicos para contribuir com a base teórica de determinada classe de problemas. Ainda destacam que para isso são necessários conhecimentos distintos, porém que contribuem para o incremento do conhecimento científico e para o desenvolvimento de tecnologias.

Para Lacerda *et al.* (2013) o DSR é uma alternativa concreta de método para a condução de pesquisas de cunho tecnológico, como tecnologias em gestão de operações, constituindo-se em uma abordagem de rigor científico. Para garantir o rigor científico esta dissertação se apoia no modelo desenvolvido por Pimentel, Filippo e Santos (2020), que apresenta uma síntese de diferentes abordagens de pesquisas DSR. O modelo é apresentado na Figura 13.

**Figura 13:** Elementos do Modelo DSR



Fonte: Pimentel, Filippo e Santos (2020)

No que se refere à organização do método neste trabalho, tem-se que:

- o problema em contexto foi abordado no objetivo e justificativas do trabalho no capítulo 1;
- o conhecimento sobre o problema e o contexto, o estado da técnica e o quadro teórico foram apresentados no Referencial Teórico, no capítulo 2;

- c. o quadro epistemológico-metodológico, com as abordagens de método, coleta e análise de dados foram abordados neste capítulo 3;
- d. as conjecturas comportamentais foram abordadas na seção 4.1, em que foi realizado a descrição e mapeamento do processo;
- e. a construção do artefato foi realizada na seção 4.2, em que apresentou a construção do modelo;
- f. os critérios de aceitação e de validação foram apresentados na seção 4.3;
- g. a avaliação empírica ocorreu em todo o capítulo 4, e na seção 4.4 apresentou maior ênfase com a criação de cenários e avaliação das simulações;
- h. os achados técnicos e teóricos foram consolidados na seção 4.5, em que foram elencadas as implicações gerenciais e no capítulo 5 onde foram tecidas as considerações finais.

Pimentel, Filippo e Santos (2020) enfatizam que a pesquisa com desenvolvimento de artefatos deve: a) realizar revisões de literatura para diferentes propósitos: compreender e caracterizar o problema, as técnicas, as teorias e a epistemologia-metodologia da pesquisa; b) desenvolver conhecimento técnico e conhecimento teórico-científico; e c) realizar uma avaliação empírica com rigor.

Para Pimentel, Filippo e Santos (2020) a avaliação empírica precisa ser projetada levando em consideração procedimentos que garantam rigor científico, que inclua técnicas para levantamento e produção de dados e de análise e interpretação de dados, e que cabe ao pesquisador decidir quais métodos utilizar.

Nesse ponto, destaca-se que esta dissertação utiliza o método de estudo de caso para fazer a avaliação empírica. Segundo Lacerda *et al.* (2013) os estudos de caso podem ser úteis para compreender os artefatos existentes e em funcionamento em um determinado contexto. Van Aken (2004) argumenta, justamente, sobre a possibilidade do uso dos estudos de caso na formalização de artefatos que possam ser entendidos, formalizados e avaliados em diferentes contextos. Além disso, a combinação desses métodos contribui para o rigor científico da pesquisa.

O estudo de caso investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos. Este método baseia-se em várias fontes de evidências e beneficia-se do

desenvolvimento prévio de proposições teóricas para conduzir a coleta e a análise de dados (YIN, 2014).

De acordo com Llewellyn e Northcott (2007, p. 195) o estudo de caso é adequado quando “as circunstâncias são complexas e podem mudar, quando as condições que dizem respeito não foram encontradas antes, quando as situações são altamente politizadas e onde existem muitos interessados”.

No que tange à quantidade de objetos estudados, considerando a repetibilidade das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, o estudo empírico foi realizado baseado em um único caso. Nesse ponto, vale ressaltar que é um caso representativo e que o estudo utiliza de informações e dados reais das operações de uma empresa do setor sucroenergético. Essa escolha se justifica, pois o estudo de um único caso é adequado para conhecer com profundidade todas as variações de um determinado fenômeno organizacional, e são válidos quando envolve caso representativo ou típico, sendo possível realizar generalizações (FREITAS e JABBOUR, 2011; YIN, 2014).

Sendo assim, a escolha do *Design Science Research* como método de pesquisa se justifica pelo fato de apresentar vantagens em relação à outras estratégias de pesquisa, destacando sua capacidade de fornecer contribuições teóricas e práticas, sendo o que melhor se adequa às propostas deste estudo, pois o DSR contribui com o avanço de pesquisas em ambientes multidisciplinares, onde as pesquisas são orientadas em resolver problemas complexos, que consideram o contexto de aplicação (BURGOYNE; JAMES, 2005; LACERDA *et al.*, 2013). Além disso, Lacerda *et al.* (2013) destacam que o DSR apresenta grande potencial para pesquisas nas áreas de Administração e Engenharia de Produção, incluindo a gestão de operações.

### **3.2. Pesquisa de Campo**

Nesta subseção objetiva-se apresentar como foi realizada a pesquisa de campo. Para isso foi dividida em: a) elementos de pesquisa, em que foram estabelecidas, a partir de base teórica, as questões e proposições que orientam o estudo; b) etapas da pesquisa, em que foram definidas as etapas e o que foi feito em cada uma delas; c) coleta de dados, em que foram esclarecidas as ferramentas e métodos utilizados para a coleta de dados do trabalho; e d) análise de dados, que aborda como foi feita a análise dos dados coletados.

### 3.2.1. Elementos de Pesquisa

O trabalho foi sustentado por um referencial teórico, que orientou as questões e proposições do estudo. Dessa forma, a definição dos elementos de pesquisa foi apoiada em estudos já realizados, que foram abordados no capítulo 2.

Destaca-se que a maioria dos estudos de simulação computacional nas operações de CTT, utilizou o software Arena. Nesse ponto ressalta-se que a escolha do software é um fator importante para o estudo, de forma que pode contribuir para o ineditismo do trabalho.

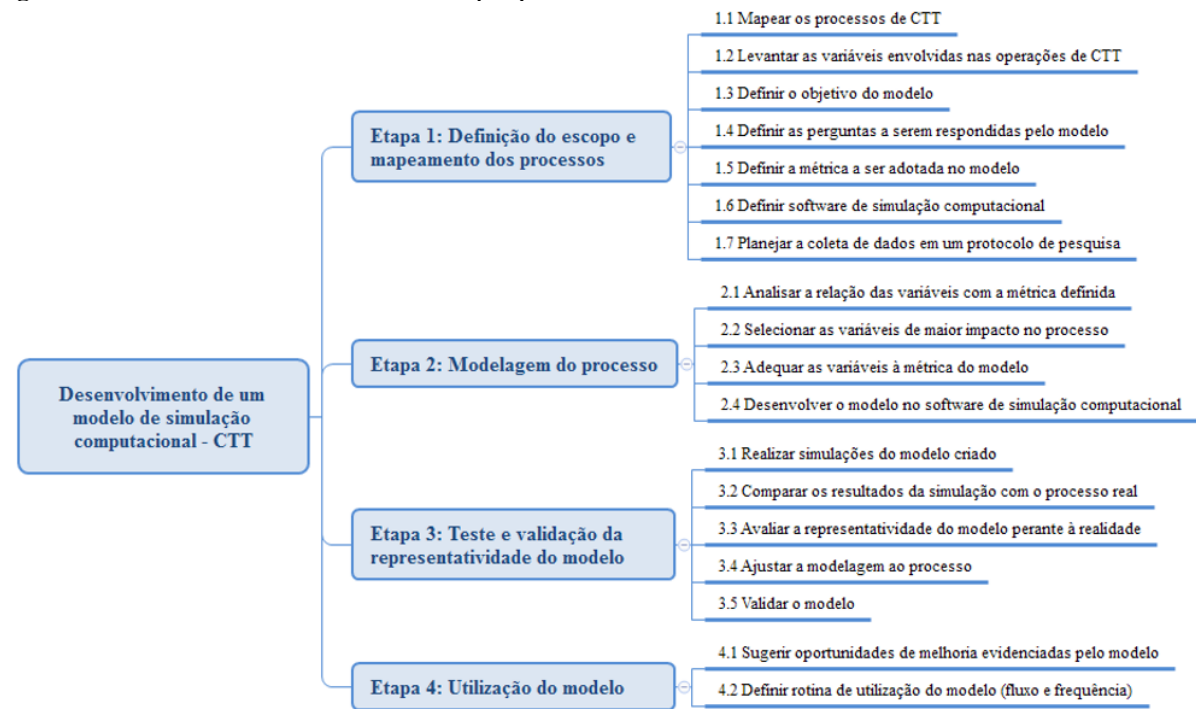
Para orientação desse trabalho, foram definidos os seguintes elementos de pesquisa:

- a. Funcionamento dos processos de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar;
- b. Funcionamento dos processos de descarregamento da cana-de-açúcar na unidade industrial;
- c. Características das frentes de colheita, considerando: localização, capacidade de produção, estrutura alocada e disponibilidade da estrutura de corte e transbordo;
- d. Características da estrutura de transporte, considerando: quantidade de implementos rodoviários, capacidade dos implementos rodoviários, formação dos conjuntos, quantidade de caminhões e disponibilidade da estrutura;
- e. Comportamento do ritmo de moagem industrial;
- f. Funcionamento do planejamento das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, considerando: frequência e informações consideradas.

### 3.2.2. Etapas da Pesquisa

Conforme Figura 14, o desenvolvimento do projeto foi realizado em quatro etapas. Na primeira, é realizada a definição do escopo do modelo e mapeamento dos processos, na segunda é feita a modelagem dos processos definidos, a terceira é a simulação para teste e validação da representatividade do modelo, e a quarta etapa aborda a utilização do modelo para benefício das operações de CTT.

**Figura 14:** Estrutura de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Próprio autor

Na primeira etapa, definição do escopo e mapeamento dos processos, foram realizadas: a delimitação do modelo, a partir da definição do objetivo e das perguntas que devem ser respondidas por ele; a definição da métrica a ser adotada no modelo e do software para desenvolvimento; a construção do protocolo de pesquisa, a partir do planejamento de coleta e análise de dados; e o mapeamento das operações de CTT, a partir da construção de fluxogramas dos processos e levantamento das variáveis envolvidas.

Na segunda etapa, a modelagem do processo, foi criado o modelo, considerando a variabilidade dos processos e a interação entre suas etapas. Para isso, foram realizadas: a análise e seleção das variáveis com maior representatividade no processo.

A terceira etapa consistiu em validar o modelo criado, confrontando o modelo com a realidade, a partir da simulação do modelo e comparação dos resultados com os parâmetros reais do processo, considerando o objetivo definido na primeira etapa. Também fez parte desta etapa os ajustes no modelo.

Por fim, na quarta etapa, utilização do modelo, foram identificadas oportunidades de melhoria nas operações de CTT, a partir da simulação e avaliação de cenários, com foco na linearidade do abastecimento industrial e no dimensionamento da estrutura de equipamentos. Além disso, foi proposto um fluxo de utilização do modelo, na rotina organizacional, para apoiar a tomada de decisão no gerenciamento das operações de CTT.

### 3.2.3. Coleta de Dados

No que se refere a coleta de dados, Turrioni e Mello (2012) apontam uma combinação de diferentes métodos para estudar um mesmo fenômeno, a citar: a observação direta do pesquisador no ambiente do caso, sondagens através de questionamentos aos envolvidos e interpretação dos dados operacionais e análises de documentos.

Neste trabalho, os meios utilizados para coleta de dados foram: entrevistas semiestruturadas com os envolvidos no processo, observação direta dos processos e análise de documentos e base de dados referentes às operações de CTT. Destaca-se que para garantir a confiabilidade dos dados coletados, foram utilizadas múltiplas fontes e técnicas de confronto e triangulação de informações, para evitar enviesamentos, conforme recomenda a literatura da área (YIN, 2014).

De acordo com Marconi e Lakatos (2012), a entrevista apresenta como objetivo principal a obtenção de informações do entrevistado, sobre determinado assunto. Segundo Cervo e Bervian (1996) utiliza-se a entrevista sempre que surge a necessidade de obter dados que não podem ser encontrados em documentos e que podem ser fornecidos por alguém.

Neste estudo utilizou-se a entrevista para obter informações sobre: o funcionamento dos processos de CTT; o funcionamento dos processos de descarregamento na unidade industrial; as características das frentes de colheita; as características da estrutura de transporte; o comportamento do ritmo de moagem industrial; e o funcionamento do planejamento das operações de CTT.

As entrevistas para obtenção das informações agrícolas foram realizadas com o Gerente de Operações Agrícolas, o Gestor de Motomecanização, os Supervisores e o Engenheiro das operações de CTT. Já as informações sobre o comportamento do ritmo de moagem foram coletadas a partir de entrevistas com o Gestor da Extração e o Especialista de Operações Integradas.

No que tange a observação direta, segundo Marconi e Lakatos (2012), é uma técnica de coleta de dados que utiliza os sentidos na obtenção de determinados aspectos da realidade, além de examinar os fatos que se deseja estudar. Uma de suas principais vantagens é que permite meios diretos e satisfatórios para estudar uma ampla variedade de fenômenos.

A técnica de observação foi utilizada para coletar dados sobre: o funcionamento dos processos de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar; o funcionamento dos processos de descarregamento da cana-de-açúcar na unidade industrial; além de algumas características das frentes de colheita e da estrutura de transporte. As observações foram realizadas de forma

interativa, sempre que necessário, porém tiveram três dias específicos para coleta da maior quantidade dos dados, sendo um em cada unidade industrial e o terceiro para observação da dinâmica nas frentes de colheita.

Por fim, apresenta-se a técnica de análise de documentos e base de dados, que segundo Godoy (1995a), é uma valiosa técnica, que pode ser utilizada para complementar informações obtidas de outras fontes, e promover melhor compreensão do fenômeno investigado.

Neste estudo, foi utilizada a análise de documentos e base de dados para coletar informações sobre: o funcionamento dos processos, a partir de fluxos já mapeados; e coletar dados quantitativos sobre os processos, tais como, a distância das frentes de colheita, a taxa de disponibilidade dos equipamentos, a densidade dos canaviais, e o ritmo de moagem, que foram extraídos a partir de softwares de gestão da própria empresa.

Salienta-se que devido a liberdade que a empresa concedeu para a realização do estudo, as entrevistas, as observações e a análise de documentos e base de dados foram realizadas de forma interativa e sempre que houve necessidade, respeitando cada uma das etapas da pesquisa.

A estruturação e detalhamento da coleta de dados deste trabalho encontra-se no Protocolo de Pesquisa e no Roteiro de Pesquisa, que estão, respectivamente no Apêndice B e no Apêndice C.

O Protocolo de Pesquisa contém, além da problemática, do objetivo e da descrição da unidade de análise da pesquisa: a relevância, os resultados esperados, o instrumento de coleta, e a fonte de dado para cada etapa da pesquisa. Já o Roteiro de Pesquisa refere-se ao roteiro da entrevista, considerando questões e entrevistados que devem respondê-las, acrescido das outras necessidades de informações e fontes de dados que foram obtidas.

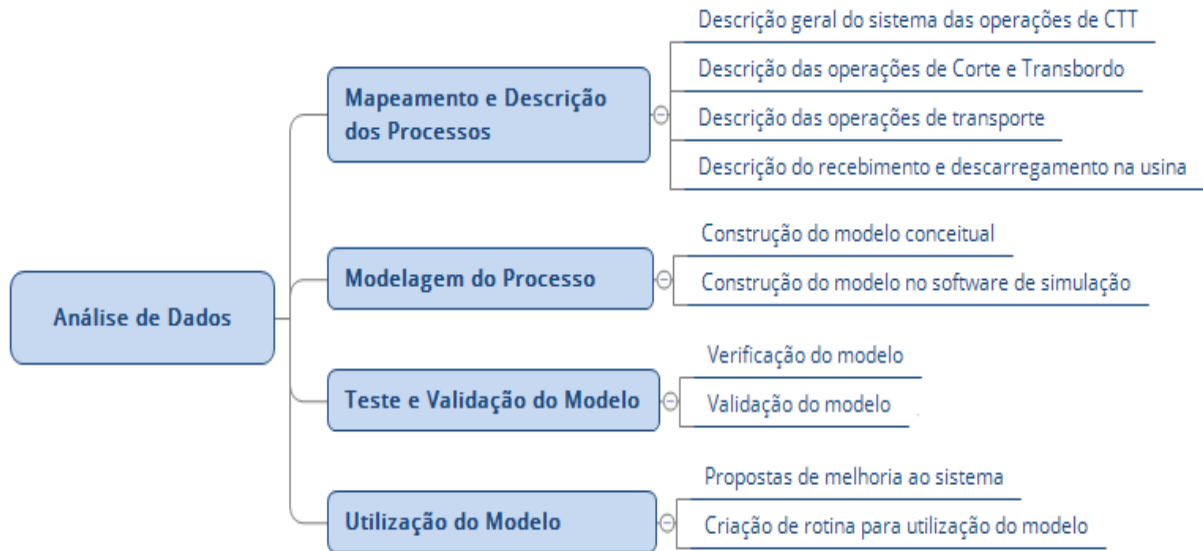
Na presente pesquisa, conforme o Cronograma do Projeto presente no Apêndice D, o período para realização do estudo foi de aproximadamente cinco meses, de maio a outubro de 2021, e os dados utilizados referentes ao período de uma safra.

#### **3.2.4. Análise de Dados**

O presente trabalho desenvolveu um modelo de simulação computacional para as operações de CTT da cana-de-açúcar, dividido em quatro etapas: mapeamento dos processos; modelagem do processo; teste e validação do modelo; e utilização do modelo.

Diante disso, a análise dos dados também foi realizada conforme essa divisão e é apresentada na Figura 15. Dessa forma, nesta seção serão descritos os principais dados utilizados em cada etapa, assim como, a maneira que foram coletados e como foram analisados.

**Figura 15:** Estrutura da Análise de Dados



Fonte: Próprio autor

A etapa de mapeamento e descrição dos processos foi a que apresentou maior quantidade de análise de dados, assim como foi a que forneceu entradas para todas as outras etapas. Nesse ponto, destaca-se que ela é composta pela descrição do sistema das operações de CTT da empresa estudada; pela descrição das operações de Corte e Transbordo; pela descrição das operações de transporte; e pela descrição das etapas de recebimento e descarregamento da cana-de-açúcar na unidade industrial.

Para o mapeamento e descrição dos processos, os principais dados utilizados e analisados foram:

- a) Funcionamento das operações de CTT, que foi necessário para entender todas as operações do CTT e suas configurações em alto nível, tais como a presença de fornecedores e utilização de equipamentos. Foram obtidos a partir da observação do processo e das entrevistas com o Gestor de Motomecanização e o Gerente de Operações Agrícolas;
- b) Variáveis envolvidas nas operações de CTT, importantes para identificar o que interfere em cada etapa das operações, foram consolidadas para construir o mapeamento do processo e garantir que as variáveis relevantes fossem selecionadas para integrar o modelo. Esses dados foram obtidos a partir da observação do processo, das entrevistas com o Gestor de Motomecanização e

os Supervisores de Colheita e de Transporte, e pela análise de documentos com fluxos já mapeados na empresa;

- c) Funcionamento das operações de Corte e Transbordo, foram necessárias para entender com maior profundidade como as operações de colheita ocorrem, e descrever informações importantes para o modelo, tais como o cálculo de colheitabilidade, ou seja, como pode ser simplificada a mensuração da produção de cana-de-açúcar nas frentes de colheita. Para isso, foram feitas análise de documentos com cálculos do planejamento operacional da colheita e entrevistas com o Gestor de Motomecanização e o Engenheiro de CTT;
- d) Funcionamento das operações de Transporte, serviram de base para a construção dos fluxogramas do processo de transporte da cana-de-açúcar, considerando desde as frentes de colheita até o descarregamento na usina. Esses dados foram coletados a partir das entrevistas com o Gestor de Motomecanização e o Engenheiro de CTT, além de observação direta dos processos, desde a frente de colheita até a unidade industrial;
- e) Quantidade e capacidade dos equipamentos envolvidos nas operações de CTT, foram importantes para identificar a estrutura de equipamentos envolvida no sistema assim como suas características de capacidade, a citar: colhedoras, tratores transbordos, caminhões de linha, caminhões bate e volta (ou escravos), e implementos rodoviários (carretas). Nesse ponto, os dados foram coletados a partir de análise de documentos e base de dados da empresa, a citar o ERP e o Solinftec onde as frotas são cadastradas e o documento de dimensionamento de frota. Além disso, os dados foram validados na entrevista com o Gestor de Motomecanização.
- f) Distância entre as frentes de colheita e as usinas, foram importantes para o entendimento do sistema de transporte da cana-de-açúcar das frentes de colheita até as unidades industriais. Esses dados foram coletados a partir de análise de documentos e base de dados da empresa que apresentam o cadastro das frentes de colheita, onde por sua vez, tiveram as distâncias cadastradas com apoio de sistemas GPS.
- g) Funcionamento do processo de recebimento e descarregamento da cana-de-açúcar na usina, foram necessárias para a construção do fluxograma das etapas desde a chegada da cana-de-açúcar na unidade industrial até o descarregamento para moagem. Esses dados foram coletados a partir da observação direta do processo, das entrevistas com o Gestor de Extração e Especialista de Operações

Integradas, e da análise de base de dados com as informações de entrada de cana-de-açúcar no ERP da empresa.

A etapa de modelagem do processo foi a responsável pela construção do modelo, tanto conceitual, quanto no software de simulação, dessa forma são utilizados bastante *inputs* da etapa anterior e coletados novos dados se necessário. Nesse ponto, os principais dados utilizados e analisados foram:

- a) Variáveis selecionadas para o modelo, as quais foram embasadas nos *inputs* da etapa de mapeamento e descrição dos processos, com o objetivo de contemplar todo o sistema das operações de CTT de forma simplificada para criação do modelo. As variáveis selecionadas e o modelo construído foram validados a partir da observação do processo e as entrevistas com o Gestor de Motomecanização, o Engenheiro de CTT e o Gerente de Operações Agrícolas;
- b) Tempos das atividades que estão no modelo, que foram importantes para mensurar o tempo de algumas etapas do processo e adicionar ao modelo, tais como o tempo da operação de pesagem na balança, o descarregamento no hilo e outras operações de recebimento da cana-de-açúcar na usina. Além disso, considerou-se a velocidade média do transporte, vazio e carregado, para calcular o tempo de deslocamento considerando a distância entre as frentes de colheita e a usina. Os dados de tempo foram coletados a partir da observação de campo, com ajuda de um cronometro para medir o tempo de cada etapa, já os dados de velocidade foram coletados a partir do software Solinftec e da análise de documentos do planejamento operacional.

A etapa de teste e validação do modelo é responsável por garantir que o modelo esteja aderente à realidade do processo e compreende a verificação e validação do modelo, sendo assim, o sistema é simulado no modelo e os resultados são comparados com o processo real. Dessa forma, novos dados foram coletados para fazer esse comparativo, de modo que os principais dados utilizados e analisados foram:

- a) Dados de produção das frentes de colheita, que representam o volume de cana-de-açúcar produzido pelas frentes de colheita própria e serviram para serem comparados com o valor simulado. Esses dados foram coletados a partir do sistema ERP da empresa e dos relatórios gerenciais
- b) Dados de entrada de cana-de-açúcar na usina, que se referem ao volume de cana-de-açúcar que chegou nas usinas nos dias de validação, considerando a produção própria e de fornecedores, e serviram para serem comparados com o

valor simulado. Esses dados foram coletados a partir do sistema ERP da empresa e dos relatórios gerenciais;

- c) Dados de moagem nos dias de validação, os quais representam o volume de cana-de-açúcar que as usinas moeram e serviram para serem comparados com o valor simulado. Esses dados foram coletados a partir do sistema ERP da empresa e dos relatórios gerenciais;
- d) *Outputs* da simulação do modelo construído, que foram importantes para a verificação e validação do modelo, e considerou-se os dados de moagem e de produção das frentes de colheita própria, e de produção total de cana-de-açúcar, ou seja, entrada de cana-de-açúcar na usina. Para isso foram simulados 5 dias de operação, com as configurações de momento do sistema real, de modo que em cada um dos dias selecionou-se o resultado desses indicadores para comparativo entre o modelo simulado e o sistema real e cálculo da taxa de variação. Destaca-se que esse comparativo foi suficiente para validar as três etapas do modelo construído, sendo a produção nas frentes de colheita própria, o transporte de cana-de-açúcar e o ritmo de moagem das unidades industriais.

Por fim, a etapa de utilização do modelo aborda as propostas de melhoria ao sistema, a partir da simulação de cenários gerados pelo modelo, além da proposta de uma rotina para utilização do modelo para o gerenciamento operacional das operações de CTT. Nesse ponto, os principais dados utilizados e analisados foram:

- a) *Outputs* da simulação do modelo construído, que foram necessários para elencar e sustentar as oportunidades de melhoria no sistema de CTT da empresa estudada. Esses dados são provenientes do relatório de simulação, e forneceram informações para identificação de oportunidades a partir da formação de filas, ou capacidades não aproveitadas. Destaca-se que para ter uma discussão de oportunidades embasada no sistema real, foram feitas 3 rodadas de simulação, considerando configurações de momentos distintos dentro da safra.
- b) Funcionamento do planejamento das operações de CTT, o qual foi importante para entender como é feito o planejamento operacional dessas operações e construir uma sugestão de fluxo para utilização do modelo de simulação criado para contribuir com a tomada de decisão gerencial nas operações de CTT. Esses dados foram coletados a partir da observação da reunião semanal de planejamento das operações agrícolas e das entrevistas com o Gestor de Motomecanização e o Engenheiro de CTT.

## 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão dos dados obtidos com a pesquisa. Para isso foram organizados em cinco subseções, sendo:

- a) Descrição e Mapeamento dos Processos: em que são abordados a contextualização da empresa e ambiente que o processo estudado está inserido, além da descrição dos processos de corte, transbordo, transporte e recebimento e moagem da cana-de-açúcar;
- b) Modelagem do Processo: onde são apresentados o desenvolvimento do modelo conceitual e como foi construído o modelo no software de simulação;
- c) Teste e Validação do Modelo: etapa em que é verificado se o modelo é representativo diante da realidade do processo;
- d) Utilização do Modelo: onde são abordadas sugestões de utilização do modelo, a partir de propostas de melhoria ao sistema estudado e de uma proposta de utilização do fluxo dentro do planejamento operacional;
- e) Discussão e Implicações Gerenciais: em que são descritos os impactos do modelo para o gerenciamento das operações de CTT, além de apresentar as discussões frente as teorias já existentes.

### 4.1. Descrição e Mapeamento dos Processos

Essa subseção foi dividida em quatro etapas: a) contextualização do sistema das operações de CTT, em que são descritos o cenário em que o sistema analisado está inserido; b) operações de corte e transbordo, onde são aprofundadas as análises nas operações das frentes de colheita; c) operações de transporte, em que são descritas as atividades que envolvem o deslocamento da cana-de-açúcar da frente de colheita até a unidade industrial; e d) operações de recebimento e moagem da cana-de-açúcar, a qual envolve as etapas do processo desde o momento que a cana chega na usina até a entrada no processo industrial, ou seja, na moagem.

Destaca-se que o mapeamento e a descrição dos processos são de grande importância para garantir a qualidade dos *inputs* para a construção do modelo, logo foi a etapa de maior quantidade de dados analisados. Diante disso, destaca-se que as discussões chegaram ao nível de entender e simplificar as entradas para a construção do modelo.

#### 4.1.1. Contexto do sistema das operações de CTT

A empresa em que foi aplicado este estudo é uma multinacional com forte atuação no agronegócio no Brasil atuando, predominantemente, no setor sucroenergético, sendo uma das líderes do setor no país.

Destaca-se que a empresa se posiciona como uma das maiores produtoras mundiais de açúcar. Além de ampla presença na indústria de alimentos, também produz em larga escala o etanol e a energia elétrica, proveniente da cogeração do bagaço de cana-de-açúcar.

Suas unidades industriais se concentram no interior do estado de São Paulo, apresentando capacidade de processamento próximo a 20 milhões de toneladas, o que reflete em produções superiores a 650 milhões de litros de etanol e 1,6 milhão de toneladas de açúcar.

Dentre as unidades industriais da empresa, foram escolhidas duas para o desenvolvimento deste estudo. Nesse ponto, é importante salientar que essas usinas apresentam suas operações industriais independentes. No entanto, a estrutura agrícola é compartilhada. Destaca-se que a escolha foi embasada na maior complexidade que essa configuração gera ao sistema e na oportunidade de aplicar o estudo para absorver uma lacuna na literatura, que é um modelo cuja estrutura agrícola atenda mais de uma usina, favorecendo a operação em clusters.

Diante disso, no que tange a estrutura das operações de CTT, a Figura 16 apresenta um modelo referente ao fluxo de matéria-prima da empresa que será aplicado o estudo. Destaca-se que as informações que compõem o fluxo foram levantadas a partir de entrevistas e grupos de trabalho com o Gerente de Operações Agrícolas e o Gestor de Motomecanização; da observação do processo nas frentes de colheita e entradas das usinas; e de análise de documentos, considerando os relatórios gerenciais e dados do ERP da empresa.

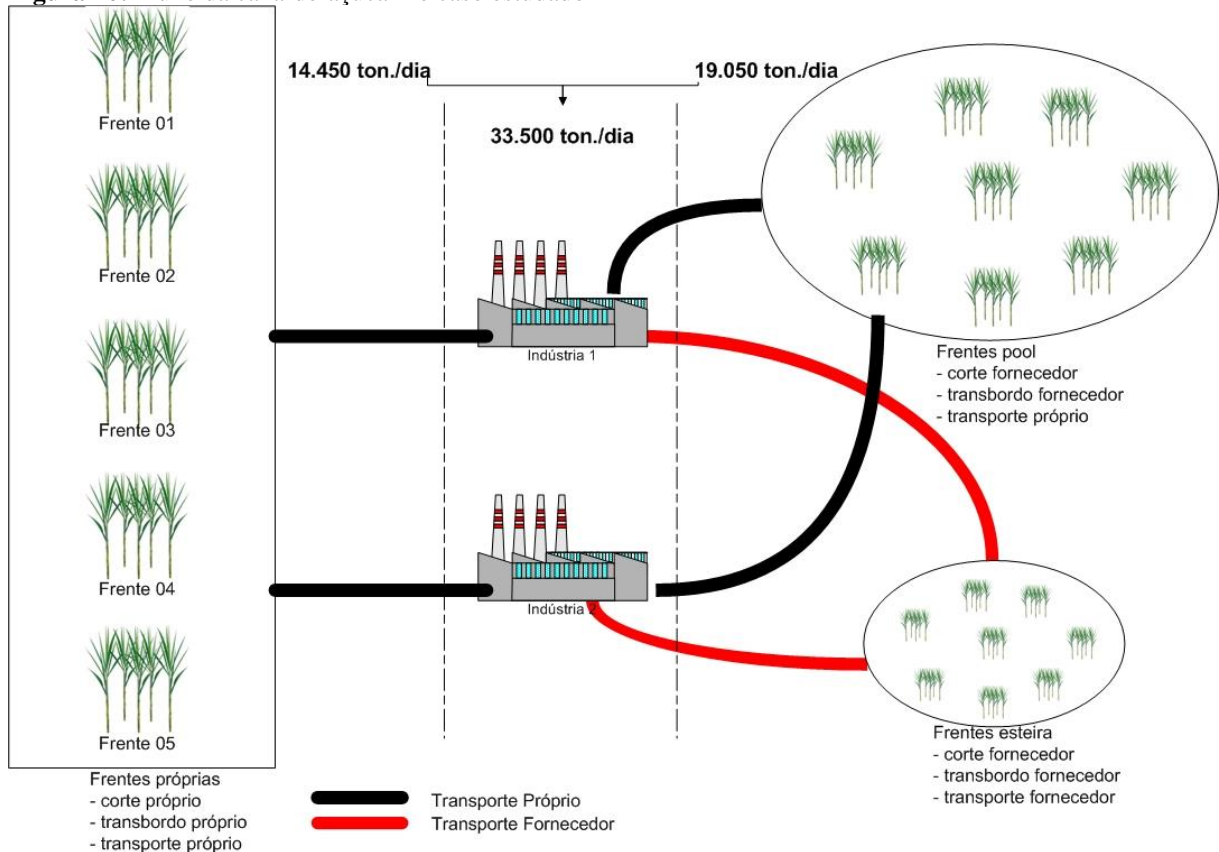
Nota-se, a partir da Figura 16, que o sistema apresenta capacidade de moagem de 33.500 toneladas de cana-de-açúcar por dia, dividida em duas unidades de processamento industrial, sendo a Indústria 1 com capacidade de 21.000 toneladas e a Indústria 2 com a capacidade de 12.500 toneladas.

Sobre a fonte da matéria-prima, observa-se que existem duas classes, a cana-de-açúcar advinda das frentes de colheita próprias e a das frentes de colheita de fornecedores, representando, respectivamente 14.450 e 19.050 toneladas por dia. No que tange à Safra 21/22, estima-se que essas unidades processarão aproximadamente 5.958 Kton de cana-de-açúcar, o que representa uma área de 69.933 ha.

No que se refere às frentes de colheita próprias, destaca-se que são divididas em cinco frentes, de modo que as operações de colheita, transbordo e transporte são realizados por equipamentos da estrutura própria da empresa.

Já as frentes de colheita de fornecedores, são divididas em duas classes, sendo uma chamada de *pool* e outra chamada de esteira. Na primeira as operações de corte e transbordo são de responsabilidade dos fornecedores e o transporte é realizado por estrutura própria, e na segunda todas as operações são de responsabilidade dos fornecedores.

**Figura 16:** Fluxo da cana-de-açúcar no caso estudado



Fonte: Próprio autor

Vale destacar que tanto a Indústria 1 quanto a Indústria 2 recebem cana-de-açúcar das frentes próprias e de fornecedores (*pool* e esteira), no entanto existem dois pontos que devem estar claros: a) para qual usina determinada frente vai enviar a cana; e b) como serão considerados no modelo essa diferença nas operações das frentes.

No que se refere à distribuição de cana-de-açúcar das frentes de colheita para as duas usinas, destaca-se que são consideradas as localizações geográficas dos blocos. Tomando o menor deslocamento, as capacidades de produção e o ritmo de moagem como referências, determinada frente de colheita entrega, predominantemente, para uma usina.

Cada um dos tipos de frente de colheita foi incorporado ao modelo pela ótica gerencial dos processos estudados, ou seja, pelo escopo de atuação dos responsáveis das operações de CTT. Dessa forma, como consta na Figura 17, nas frentes próprias foram consideradas as produções nas frentes de colheita e o transporte da cana até a usina, nas frentes de fornecedores *pool* foram considerados apenas a etapa de transporte da cana-de-açúcar; por fim nas frentes de fornecedores esteira foram consideradas apenas as etapas a partir da cana entregue na usina.

**Figura 17:** Relação tipos de frente de colheita e atuação gerencial

Tipo de Frentes de Colheita	Etapas do Processo		
	Corte e Transbordo	Transporte	Recebimento e Moagem
Frentes Próprias			
Frentes de Fornecedores - Pool			
Frentes de Fornecedores - Esteira			

Fonte: Próprio autor

Ainda, para uma visão geral das operações de CTT, no Apêndice E é apresentado o mapeamento das variáveis de cada etapa do processo de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, incluindo o recebimento da matéria-prima e as variáveis industriais relacionadas à demanda de cana-de-açúcar, considerando a etapa de moagem da indústria.

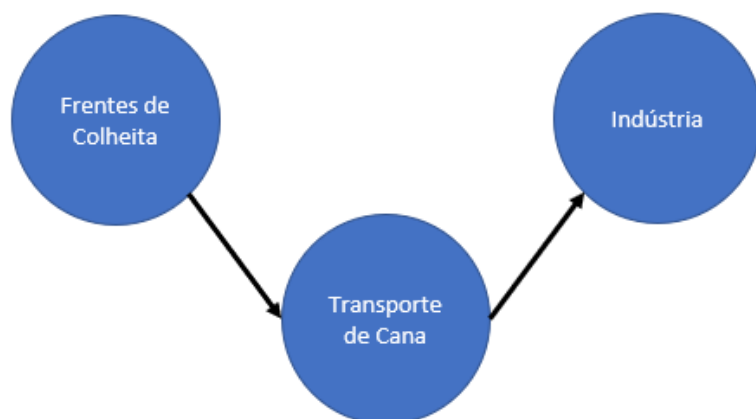
Destaca-se que esse mapeamento foi realizado por etapa do processo e considerando suas inter-relações, a partir de entrevistas e grupos de trabalho com o Gestor de Motomecanização, o Supervisor e o Engenheiro das operações de CTT. Também foi feita a análise de documentos, considerando os dados dos softwares operacionais Logtrac e Solinftec, os fluxogramas de processos já existentes e os dados do ERP da empresa; além de observações realizadas nas operações que agregaram para a consolidação do levantamento.

Para simplificação do sistema, na Figura 18, é apresentada uma forma de segmentação das operações de CTT que facilita a estruturação e entendimento dos processos. Nota-se que são divididas em três etapas, sendo:

- a) as frentes de colheita, que representam as operações de corte e transbordo e tem como principal saída uma taxa de produção de cana-de-açúcar cortada e picada;
- b) o transporte da cana-de-açúcar das frentes de colheita para as usinas, o qual apresenta como variáveis de maior importância para o sistema o tempo de deslocamento e o volume de cana transportado;

- c) a indústria, que representam os processos de recebimento da cana-de-açúcar e a moagem, tendo como principais variáveis os tempos dos processos de recebimento e o ritmo de moagem de cana-de-açúcar pela usina.

**Figura 18:** Simplificação do sistema em estudo



Fonte: Próprio autor

Sendo assim, os próximos tópicos dessa subseção abordam com maior profundidade e detalhamento cada uma dessas etapas representadas na Figura 18.

#### 4.1.2. Descrição das Operações de Corte e Transbordo

As operações de corte e transbordo são as responsáveis pela produção de cana-de-açúcar nas frentes de colheita. A etapa de corte é realizada pela colhedora, a qual corta, pica, limpa, e deposita a cana picada na unidade de carga do transbordo, que por sua vez é responsável por conduzir a cana até o ponto de carregamento e depositar (transbordar) a cana na carreta (unidade de carga do transporte).

De modo geral, a produção de cana-de-açúcar nas frentes de colheita está exposta a variáveis que são gerenciáveis e outras que não são gerenciáveis. No primeiro caso pode-se citar os tempos operacionais, tais como parada para manutenção, e deslocamentos improdutivos. Já no segundo caso, os não gerenciáveis, temos as variações de tempo decorrentes de condições climáticas, sendo o principal ofensor o índice de chuvas, pois causa dificuldade na operação dos equipamentos e danos ao canavial se mantida a operação.

Outro ponto relevante na operação de corte e transbordo, e que impacta no desempenho operacional das frentes de colheita, é a relação entre colhedoras e tratores transbordos. Nesse ponto, destaca-se que a configuração das frentes da empresa em estudo apresenta uma relação de 2 transbordos para cada colhedora, com exceção de uma das frentes de colheita que tem uma

colhedora que faz o corte em duas linhas de cana simultaneamente (conhecida por colhedora de duas linhas), que aumenta a capacidade de produção, exigindo que seja ajustada a relação entre transbordo e colhedora, como pode ser visto no tópico da estrutura de equipamentos.

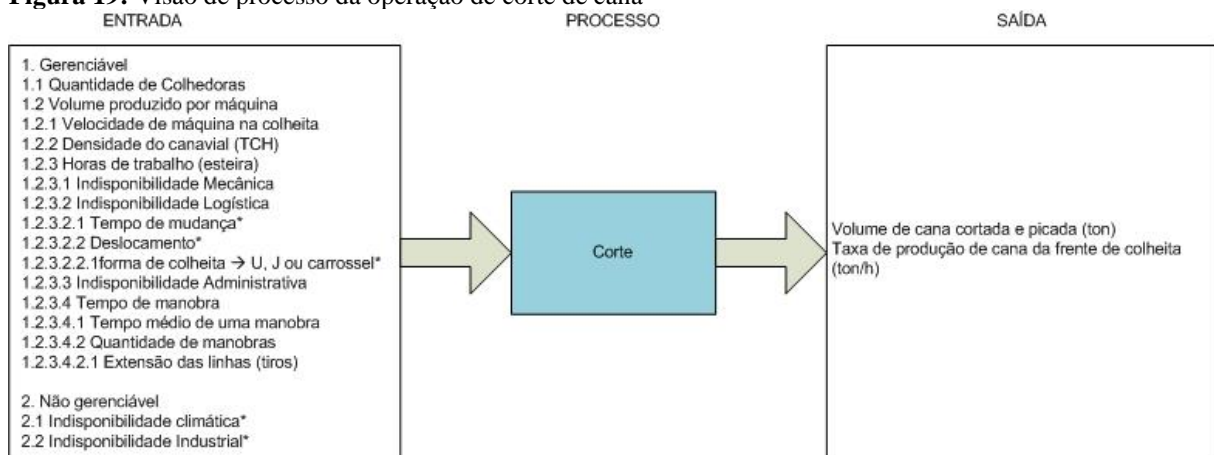
Diante disso, a partir da entrevista com o Engenheiro de CTT e análise das planilhas de cálculo de produção das frentes de colheita, entende-se que na relação de 2 transbordos para cada colhedora, os tratores não são gargalo no sistema, podendo o ritmo de produção das frentes de colheita serem calculados a partir da produção das colhedoras, que são os gargalos do sistema de corte e transbordo.

#### 4.1.2.1. Variáveis que impactam na produção de cana das frentes de colheita

As variáveis que impactam a produção de cana das frentes de colheita foram levantadas a partir de entrevistas e grupos de trabalho com o Gestor de Motomecanização, o Supervisor e o Engenheiro das operações de CTT; de análise de documentos, considerando os dados dos softwares operacionais Logtrac e Solinftec, os fluxogramas de processos já existentes e os dados do ERP da empresa; além de observações realizadas nas operações.

Na Figura 19, tem-se a visão de processo da operação de corte da cana-de-açúcar, em que no campo de entrada pode-se notar as variáveis que impactam na produção da frente de colheita, interferindo no volume de cana produzido e, conseqüentemente, na taxa de produção da cana-de-açúcar.

**Figura 19:** Visão de processo da operação de corte de cana



Fonte: Próprio autor

Além dos elementos apontados na Figura 19, nas entrevistas foram abordados outros pontos mais qualitativos, tais como: a) mudanças de frente devido a incêndios nos blocos; b) tempo gasto com manutenção; c) tempo para abastecimento de diesel; d) tempo de deslocamento para o caminhão oficina; entre outros.

Nesse ponto, destaca-se que o desafio é como fazer com que o modelo considere o impacto dessas variáveis, mas ao mesmo tempo como entradas podem ser simplificadas. Diante disso, o próximo tópico relata o processo de simplificação.

#### **4.1.2.2. Simplificação da produção de cana**

Conforme descrito anteriormente, existem muitas variáveis que impactam na produção de cana-de-açúcar das frentes de colheita. No entanto, essas variáveis podem ser categorizadas, sugerindo uma simplificação para o modelo.

O primeiro nível de categorização pode ser feito entre as variáveis gerenciáveis e não gerenciáveis. As não gerenciáveis se resumem à indisponibilidade climática, que é dada pelo índice de chuvas, impossibilitando a produção nas frentes de colheita, ou seja, gerando uma parada na produção.

Já no que tange à categoria gerenciável, o primeiro ponto dessa categorização é o tempo de corte ou tempo de elevador, que é o tempo que a colhedora passa cortando a cana-de-açúcar, ou seja, o tempo que ela está realizando as atividades que agregam valor no ponto de vista do cliente.

Destaca-se que esse tempo é determinado a partir do tempo total planejado para utilização das colhedoras, e decrescido as indisponibilidades por motivos de manutenção, logísticos e administrativos, além do tempo gasto com as manobras no final das linhas de colheita. Por sua vez, essas categorias que compõem o tempo de corte absorvem muitos outros elementos, tais como:

- a) Indisponibilidade mecânica: refere-se, entre outros, aos tempos gastos com manutenção preventiva, manutenção corretivas, e qualquer reparo ou inspeção da colhedora;
- b) Indisponibilidade logística: refere-se, entre outros, aos tempos de mudança de frente, seja qual for o motivo, os tempos de deslocamento improdutivos dentro da frente de colheita, abastecimento, entre outros;
- c) Indisponibilidade administrativa: refere-se, entre outros aos tempos relacionados a troca de turno, parada para refeição;
- d) Manobra: resume-se à quantidade de manobras e o tempo médio de duração de cada manobra. No entanto, intrinsecamente, contempla o comprimento das linhas de cana e a forma de colheita, como consta nas Equações 1 (quantidade de manobras) e 2 (tempo de manobra).

$$\text{Quantidade de manobra} = \frac{\text{Horas motor (h)} \times \text{Velocidade média (Km/h)}}{\text{Comprimento médio de linha (Km)}} \quad (1)$$

$$\text{Tempo de manobra(h)} = \frac{\text{Tempo médio de manobra(min)} \times \text{Quantidade de manobras}}{60} \quad (2)$$

Dessa forma, pode-se resumir as horas de corte ou horas de elevador, conforme mostrado na Figura 20.

**Figura 20:** Configuração das horas de corte/elevador

Horas planejadas/ gerenciáveis			
Decréscimos	Indisp. Mecânica		
	Indisp. Logística		
	Indisp. Administrativa		
	Tempo de Manobra		
Horas de corte/ elevador			

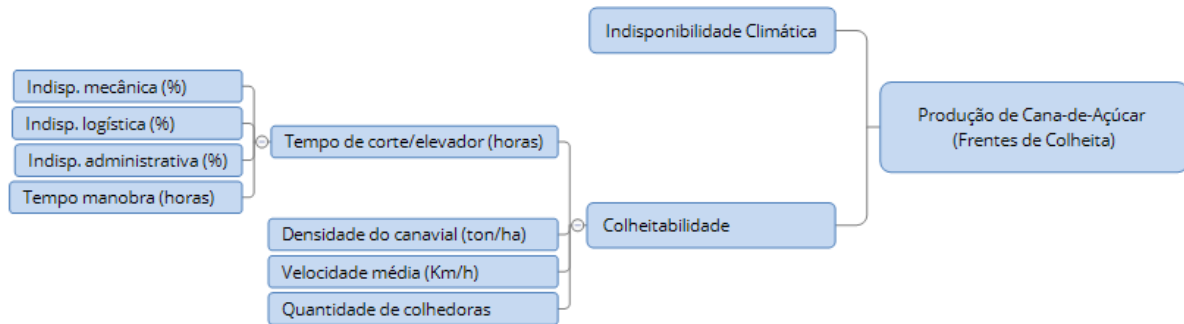
Fonte: Próprio autor

Nesse ponto, destaca-se que se agregarmos ao tempo de corte as variáveis de densidade do canavial (ton./ha); velocidade média de colheita (km/h); e a quantidade de colhedoras na frente de colheita, conseguimos calcular a taxa de produção de cana-de-açúcar por unidade de tempo de uma frente de colheita, conhecida como índice de colheitabilidade, forma pela qual é tratada pela empresa e como será referenciada neste trabalho.

No que se refere à utilização no modelo, é importante que o índice de colheitabilidade, ou a taxa de produção de cana-de-açúcar seja dado em horas. Ainda, para melhor entendimento desse índice, são abordados nos próximos tópicos o detalhamento de cálculo e as variáveis que compõem a taxa de produção das frentes de colheita.

Por fim, no que tange a simplificação do sistema de produção de cana-de-açúcar das frentes de colheita, a Figura 21 resume como será abordado no modelo. Destaca-se que as entradas no modelo de simulação computacional serão apenas a indisponibilidade climática e o índice de colheitabilidade, de modo que os cálculos que compõem essa taxa são realizados fora do modelo de simulação. Porém é considerada a variabilidade do processo e a inter-relação entre as variáveis, a partir do cálculo probabilístico do índice de colheitabilidade.

**Figura 21:** Simplificação da produção de cana das frentes de colheita



Fonte: Próprio autor

#### 4.1.2.2.1. Cálculo do índice de colheabilidade

O índice de colheabilidade é uma operação matemática que descreve a produção da frente de colheita a partir do tempo de corte (ou elevador), da densidade do canavial (ton./ha), da velocidade média (km/h) que a colhedora se desloca para cortar a cana-de-açúcar, e da quantidade de colhedoras da frente de colheita. Nesse ponto destaca-se que o cálculo é formado por algumas equações.

A Equação 3 é responsável por converter a densidade do canavial, inicialmente dada por toneladas de cana por hectare, em toneladas de cana por metros lineares (TCML). Nesse ponto, destaca-se que quando dividimos por 10.000 transformamos hectares em metros quadrados, e posteriormente, dividimos por 1,5, que se refere a largura das linhas de colheita, em metros, que a colhedora realiza o corte no seu deslocamento.

$$TCML (ton./m) = \frac{\text{Tonelada de cana por hectare (ton./ha)}}{10.000(m^2)/ 1,5(m)} \quad (3)$$

A Equação 4 realiza a conversão da velocidade, a qual é inicialmente dada em quilômetros por hora, mas a partir da multiplicação por 1.000 é transformada em metros por hora (VM corte (m/h)). Logo, junto com a Equação 3, tem-se uma taxa de produção de cana-de-açúcar a partir da velocidade de corte, dada em toneladas de cana por hora.

$$VM \text{ corte (m/h)} = \text{Velocidade média (Km/h)} \times 1000 \quad (4)$$

No entanto, como já visto, a colhedora não tem a totalidade do seu tempo para cortar cana. Diante disso é necessário descontar os tempos improdutivos, que são as indisponibilidades mecânica, logística e administrativa, além do tempo de manobra que é

tratado de forma diferente na fórmula, pois é dependente do tempo de produção e retrata outras variáveis como o comprimento de linha e a forma de colheita, como foi abordado no tópico anterior. Destaca-se que as Equações 5 (Tempo gerenciável), 6 (Indisponibilidade Mecânica), 7 (Indisponibilidade Logística), 8 (Indisponibilidade Administrativa) e 9 (Manobra) formam o fator da disponibilidade para corte, representado pela Equação 10.

$$\text{Tempo gerenciável (h)} = \text{Tempo total(h)} - \text{Tempo improdutivo por motivos climáticos (h)} \quad (5)$$

$$\text{Indisp. mecânica (\%)} = \frac{\text{Tempo improdutivo por motivos de manutenção (h)} \times 100}{\text{Tempo Gerenciável (h)}} \quad (6)$$

$$\text{Indisp. logística (\%)} = \frac{\text{Tempo improdutivo por motivos logísticos (h)} \times 100}{\text{Tempo Gerenciável (h)}} \quad (7)$$

$$\text{Indisp. adm (\%)} = \frac{\text{Tempo improdutivo por motivos administrativos (h)} \times 100}{\text{Tempo Gerenciável (h)}} \quad (8)$$

$$\% \text{ de manobra (\%)} = \frac{\text{Tempo de manobra (h)} \times 100}{\text{Tempo Gerenciável (h)}} \quad (9)$$

$$\text{Disp. corte(\%)} = (100\% - (\text{Indisp. Mec.} + \text{Indisp. Log.} + \text{Indisp. Adm})) \times (100\% - \% \text{manobra}) \quad (10)$$

Além disso, deve-se considerar a quantidade de colhedoras existentes na frente de colheita para gerar a taxa de produção consolidada da frente. Dessa forma, a Equação 11 apresenta como é feito o cálculo do índice de colheitabilidade, que é representado pela taxa de produção de cana das frentes de colheita, nesse caso, dada em toneladas de cana por hora.

$$\text{Tx. Prod. FC (ton./h)} = \text{TCML(ton./m)} \times \text{VMcorte(m/h)} \times \text{Disp. corte(\%)} \times \text{Qnt. Colhedoras} \quad (11)$$

Destaca-se que nos próximos tópicos são abordados de forma breve o comportamento de cada um dos inputs para cálculo do índice de colheitabilidade.

#### 4.1.2.2.2. Densidade dos canaviais (TCH)

A densidade dos canaviais, também conhecida como TCH, é uma variável com impacto significativo na taxa de produção de cana de uma frente de colheita. No entanto, no momento da colheita já não se tem muita gestão sobre esse elemento, de modo que deve ser aceito e a operação deve se adequar à característica do canavial.

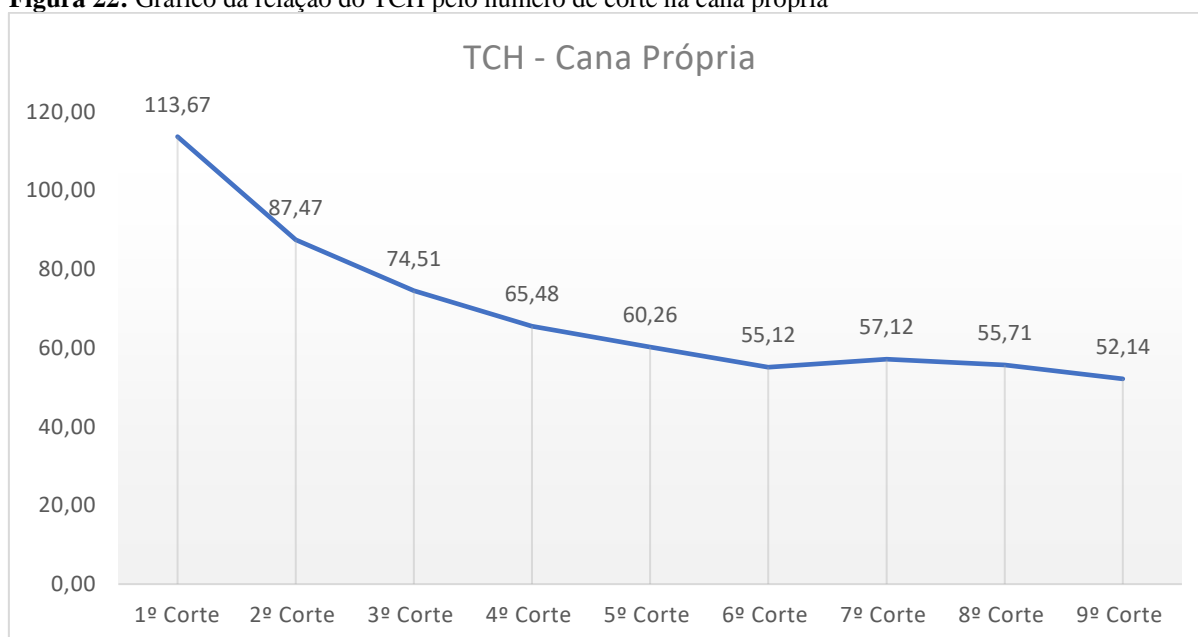
Destaca-se que o TCH apresenta grande variação entre os blocos de colheita, apresentando como principais fontes dessa variação: a) manejo e operações anteriores a colheita; b) variedades de cana-de-açúcar; e c) quantidade de cortes que já existiram no canavial. Nesse ponto, a Tabela 1 apresenta a densidade do canavial em relação a quantidade de cortes em que já foi submetido, e a Figura 22 ilustra de forma gráfica o decréscimo do TCH da cana própria em virtude do número de cortes.

**Tabela 1:** TCH por corte do canavial

Corte	TCH - Cana Própria	TCH - Cana Fornecedor	TCH - Total de Cana
1º Corte	113,67	112,23	112,93
2º Corte	87,47	92,90	90,32
3º Corte	74,51	78,28	75,91
4º Corte	65,48	66,82	66,06
5º Corte	60,26	68,17	62,56
6º Corte	55,12	67,79	61,40
7º Corte	57,12	71,81	57,12
8º Corte	55,71	70,27	66,16
9º Corte	52,14	73,07	70,73
<b>Total</b>	<b>77,04</b>	<b>84,30</b>	<b>80,38</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

**Figura 22:** Gráfico da relação do TCH pelo número de corte na cana própria



Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Ainda, nota-se que tanto a Tabela 1 quanto a Figura 22 apresentam apenas uma fonte de variação do TCH. De modo que é importante uma visão geral do TCH de todos os blocos, que considere as outras fontes de variação, para entender sobre a configuração dessa variável no sistema estudado.

Diante disso, a Tabela 2 apresenta o comportamento do TCH do sistema estudado, de modo que contempla as fontes de variação do processo. No entanto, para ser tratado no modelo, deve-se considerar o horizonte de tempo da simulação, de modo que para períodos curtos, em que é possível saber quais blocos serão colhidos, é importante inserir as informações de TCH desses blocos.

**Tabela 2:** Comportamento do TCH do sistema estudado

Tipo de Bloco	Cana Própria	Cana Fornecedor	Cana Total
<b>Localização</b>			
Média	81,8	84,3	83,3
Mínimo	42,0	30,0	30,0
Máximo	132,3	129,0	132,3
<b>Percentis</b>			
1%	43,0	40,0	41,0
3%	46,9	48,3	47,6
5%	50,9	51,6	51,0
8%	52,0	56,0	54,0
10%	54,0	56,9	56,0
15%	58,7	60,5	60,0
20%	63,0	65,0	64,0
25%	66,0	66,8	66,1
30%	69,0	70,0	70,0
35%	71,3	73,0	73,0
40%	74,0	75,1	75,0
45%	77,0	80,0	79,0
50%	80,0	84,0	82,0
55%	82,0	88,7	84,0
60%	83,0	92,0	87,6
65%	87,0	96,0	91,9
70%	89,0	99,0	95,1
75%	94,0	99,0	99,0
80%	102,0	101,2	102,0
85%	110,0	108,0	109,0
90%	117,0	114,0	116,0
92%	118,2	119,0	119,0
95%	122,2	121,4	122,0
97%	126,1	123,0	124,0
99%	132,0	129,0	129,0

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

#### 4.1.2.2.3. Velocidade de corte

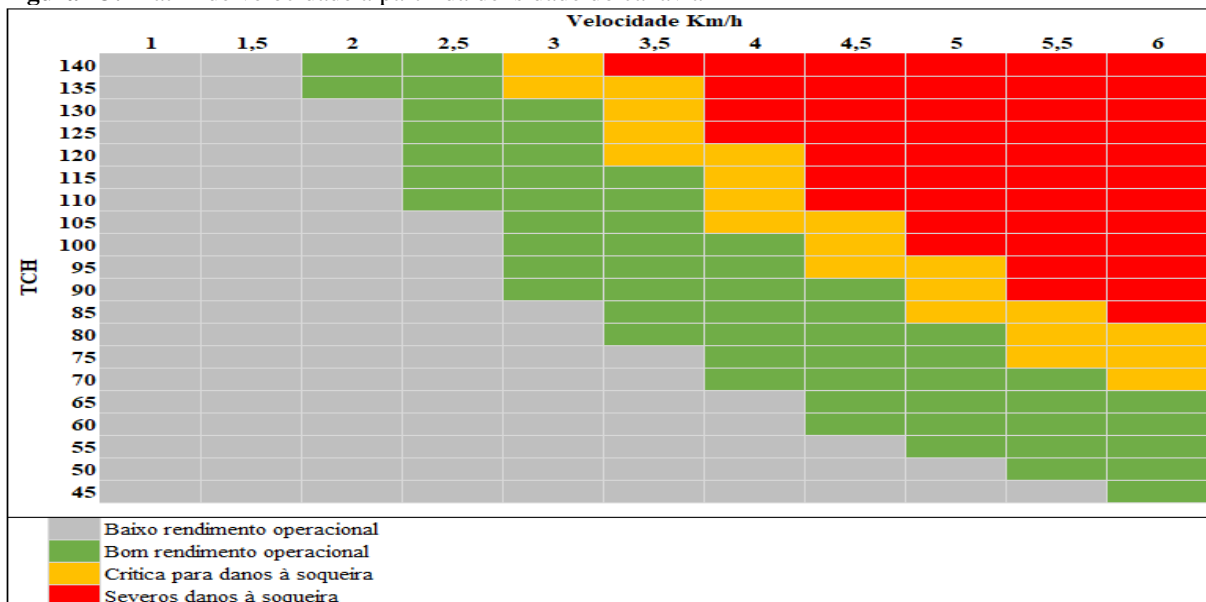
No que tange à velocidade das colhedoras para o corte da cana-de-açúcar, é importante salientar que é uma variável crítica e muito controlada devido o *trade off* existente na sua operacionalização. Nesse ponto, como já visto no cálculo da colheitabilidade, quanto mais

rápido a colhedora andar maior será sua taxa de produção de cana-de-açúcar, contudo há um elemento técnico que limita essa velocidade, a qualidade do canavial.

Destaca-se que a operação em velocidades superiores ao limite de especificação pode causar danos ao canavial com o arranque de soqueiras, de modo a prejudicar a produtividade do canavial nos cortes subsequentes (ou seja, redução de sua densidade – TCH).

Diante disso, em conformidade com as orientações do setor técnico agrônomo da própria empresa é fundamental que a matriz de velocidade, presente na Figura 23, seja respeitada. Nesse ponto, ressalta-se que a matriz relaciona o TCH dos blocos de colheita com a velocidade de corte, sendo assim, a velocidade é dependente da densidade do canavial.

**Figura 23:** Matriz de velocidade a partir da densidade do canavial



Fonte: Empresa - Excelência Agronômica

No que se refere a utilização da matriz, aceita-se que as velocidades estejam de acordo com os campos verdes e amarelos, para que sejam atendidos bons níveis de rendimento operacional sem impactos significativos no canavial. Ainda, segundo as entrevistas com o Gestor de Motomecanização e os Supervisores de CTT as velocidades não apresentam distribuição normal entre os limites de especificação, de modo que para elevar o rendimento os operadores são orientados a operarem próximos ao limite superior. Logo, na construção do modelo, esse comportamento deve ser respeitado.

#### 4.1.2.2.4. Tempo de corte

No que se refere ao tempo de corte, vale salientar que é o que apresenta maior foco operacional, considerando que é onde há oportunidades de eliminação de desperdícios, pois é

o tempo disponível após o decréscimo das horas improdutivas por motivos logísticos, administrativos e de manutenção, além do desconto do tempo de manobra.

Como visto na Figura 21 para tratar o tempo de corte ou de elevador, também é necessário considerar as indisponibilidades logística, administrativa e mecânica, e o tempo de manobra. A Tabela 3 apresenta a configuração dos tempos gerenciáveis por frente de colheita.

**Tabela 3:** Distribuição dos tempos gerenciáveis das colhedoras

Frentes de Colheita Própria	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Manobra	Corte de Cana
Frente de Colheita 1	3,67%	16,66%	9,94%	11,84%	57,89%
Frente de Colheita 2	2,52%	20,45%	7,93%	12,42%	56,68%
Frente de Colheita 3	2,76%	16,60%	8,54%	13,82%	58,28%
Frente de Colheita 4	3,36%	15,45%	6,81%	11,60%	62,79%
Frente de Colheita 5	2,24%	14,00%	8,51%	12,62%	62,64%
<b>FC Própria</b>	<b>2,95%</b>	<b>16,74%</b>	<b>8,37%</b>	<b>12,41%</b>	<b>59,53%</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Nota-se que a tabela foi dividida nas classes de tempos já mencionadas, e que todas elas apresentam diferenças entre as frentes de colheita, algumas classes com pouca dispersão como a indisponibilidade administrativa, e outras com maior dispersão como as indisponibilidades logística e mecânica.

Nesse ponto, destaca-se que essa diferenciação por frente agrega ao modelo, pois essas diferenças nos valores são reflexos dos cenários de operação das frentes de colheita, que entre outras variáveis contemplam: a idade das colhedoras; as condições de topografia do bloco; as configurações das linhas de colheita; e de modo geral, toda a dinâmica da frente de colheita.

No que tange ao tempo de corte, destaca-se que é importante que seja configurado no modelo conforme o horizonte de tempo desejado na simulação, de modo que se for simular em um horizonte de uma ou duas semanas deve-se inserir o parâmetro que está acontecendo próximo àquele período. No entanto, de modo geral pode-se usar as distribuições que estão na Tabela 4 e no Apêndice F.

**Tabela 4:** Distribuição de probabilidade do tempo de corte nas frentes de colheita

Tempo de Corte			
Frentes de Colheita Própria	Distribuição	Parâmetros	
		Média	Desvio-padrão
Frente de Colheita 1	Normal	59,80%	5,44%
Frente de Colheita 2	Normal	58,21%	4,86%
Frente de Colheita 3	Normal	60,94%	7,02%
Frente de Colheita 4	Normal	64,23%	5,08%
Frente de Colheita 5	Normal	63,00%	5,44%
<b>FC Própria</b>	<b>Normal</b>	<b>61,27%</b>	<b>6,00%</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Destaca-se que a construção da Tabela 3, da Tabela 4 e do Apêndice F foram baseadas nos dados extraídos do software Solinftec, considerando a primeira metade da Safra 21/22.

#### 4.1.2.3. Estrutura de equipamentos para corte e transbordo

Como exposto, as frentes de colheita são compostas pelas colhedoras e pelos tratores transbordos, que transportam a cana do local de corte até as carretas. Diante disso, a Tabela 5 apresenta a estrutura de equipamentos das cinco frentes de colheita do sistema estudado.

**Tabela 5:** Estrutura de equipamentos das frentes de colheita

Estrutura - Frentes de Colheita		
Frete de Colheita	Colhedoras	Tratores transbordos
FC 1	4	8
FC 2	4	9
FC 3	4	7
FC 4	4	7
FC 5	3	6
<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>37</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Quanto às especificações dos equipamentos, destaca-se que as frentes FC1, FC3, FC4 e FC5 apresentam somente colhedoras de uma linha, já a frente FC2 apresenta três colhedoras de uma linha e uma colhedora de duas linhas, que deve ser considerada no cálculo de colheitabilidade. No que se refere aos transbordos, como não são gargalo da operação, não influenciam na colheitabilidade.

#### 4.1.3. Descrição da Operação de Transporte

A operação de transporte é responsável por levar a cana-de-açúcar cortada e picada das frentes de colheita até as unidades de processamento industrial. Esse deslocamento é realizado por caminhões e carretas (também conhecidas por unidade de carga). Os caminhões buscam as carretas nas frentes de colheita e levam até a usina, já as carretas, além da movimentação da carga são responsáveis pela acomodação do estoque intermediário tanto nas frentes de colheita quanto nas unidades industriais.

Destaca-se que as unidades de carga podem assumir diferentes configurações para formação dos conjuntos, de modo que sua capacidade é alterada. No sistema estudado existem conjuntos com duas carretas, um reboque e um semi-reboque, chamados rodotrem; e conjuntos com três carretas, normalmente dois reboques e um semi-reboque, conhecidos como treminhados.

Para entender de forma mais detalhada a operação de transporte da cana-de-açúcar, nos próximos tópicos são apresentados os fluxogramas dessa operação, assim como as principais variáveis que impactam o processo e a estrutura de equipamentos e sua disponibilidade para o transporte da cana-de-açúcar.

#### **4.1.3.1. Fluxo das operações de transporte**

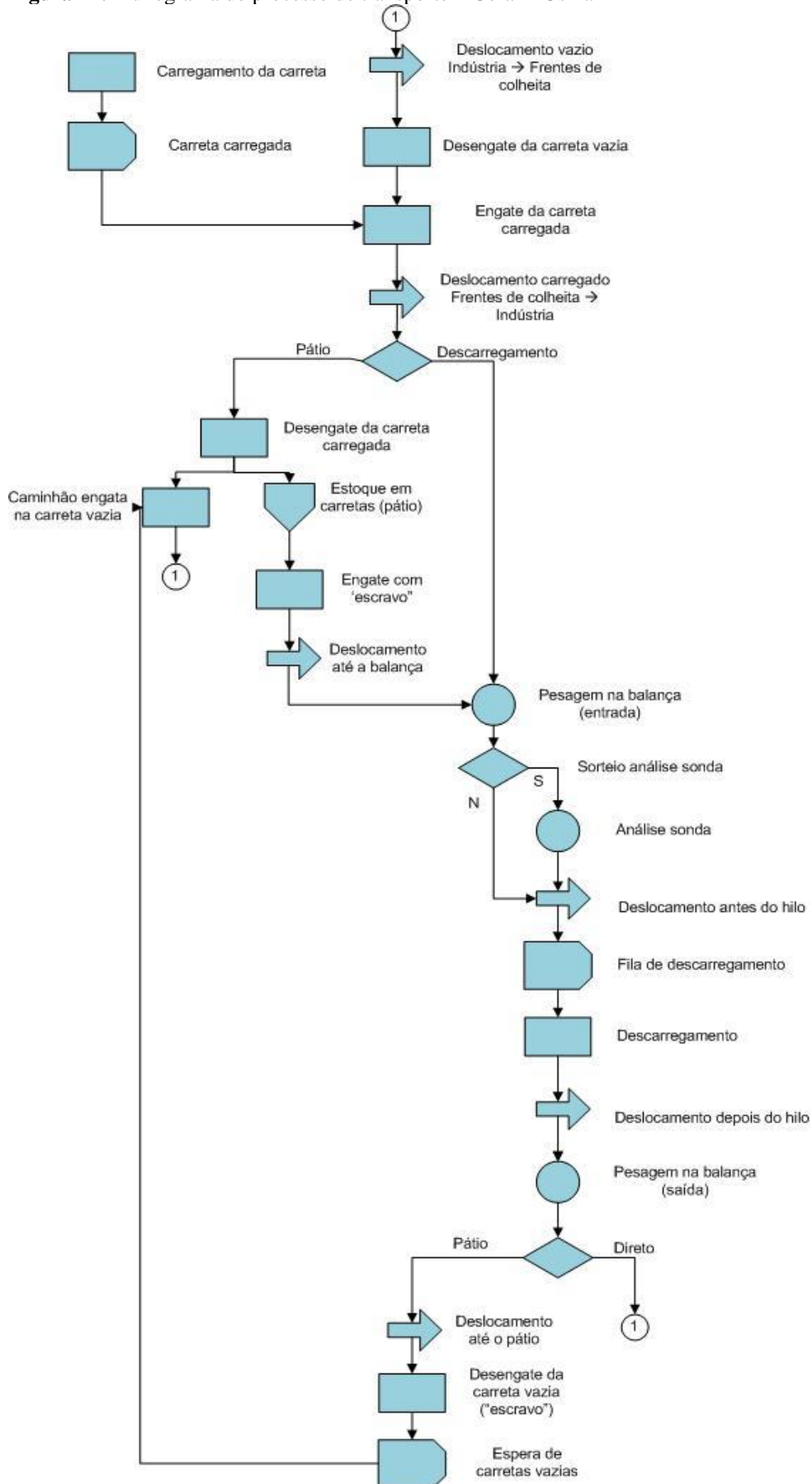
Os fluxos da operação de transporte foram construídos a partir de entrevistas e grupos de trabalho com o Gerente de Operações Agrícolas, o Gestor de Motomecanização e o Engenheiro das operações de CTT; de análise dos fluxogramas de processos já existentes na empresa; e de observações das operações nas frentes de colheita, no pátio de recebimento da cana-de-açúcar e nos processos internos à usina para descarregamento da matéria-prima.

Esse mapeamento foi dividido pela ótica de equipamento, segmentando em caminhões, carretas e geral, que contempla ambos. Ainda, destaca-se que pela diferença das operações de recebimento de cana-de-açúcar em cada uma das unidades industriais do sistema os fluxos foram divididos entre a Indústria 1 e a Indústria 2.

Dessa forma, foram construídos seis fluxos. A Figura 24 apresenta o fluxograma geral das operações de transporte e recebimento da cana-de-açúcar da usina 1; a Figura 25 considera apenas o fluxo dos implementos rodoviários no processo da usina 1; a Figura 26 considera o fluxo com foco nos caminhões na usina 1; a Figura 27 apresenta o fluxograma geral das operações de transporte e recebimento da usina 2; a Figura 28 considera o fluxo dos implementos rodoviários no processo da usina 2; e a Figura 29 considera o fluxo com foco nos caminhões da usina 2, além da legenda com os elementos usados para construção de todos os fluxogramas.

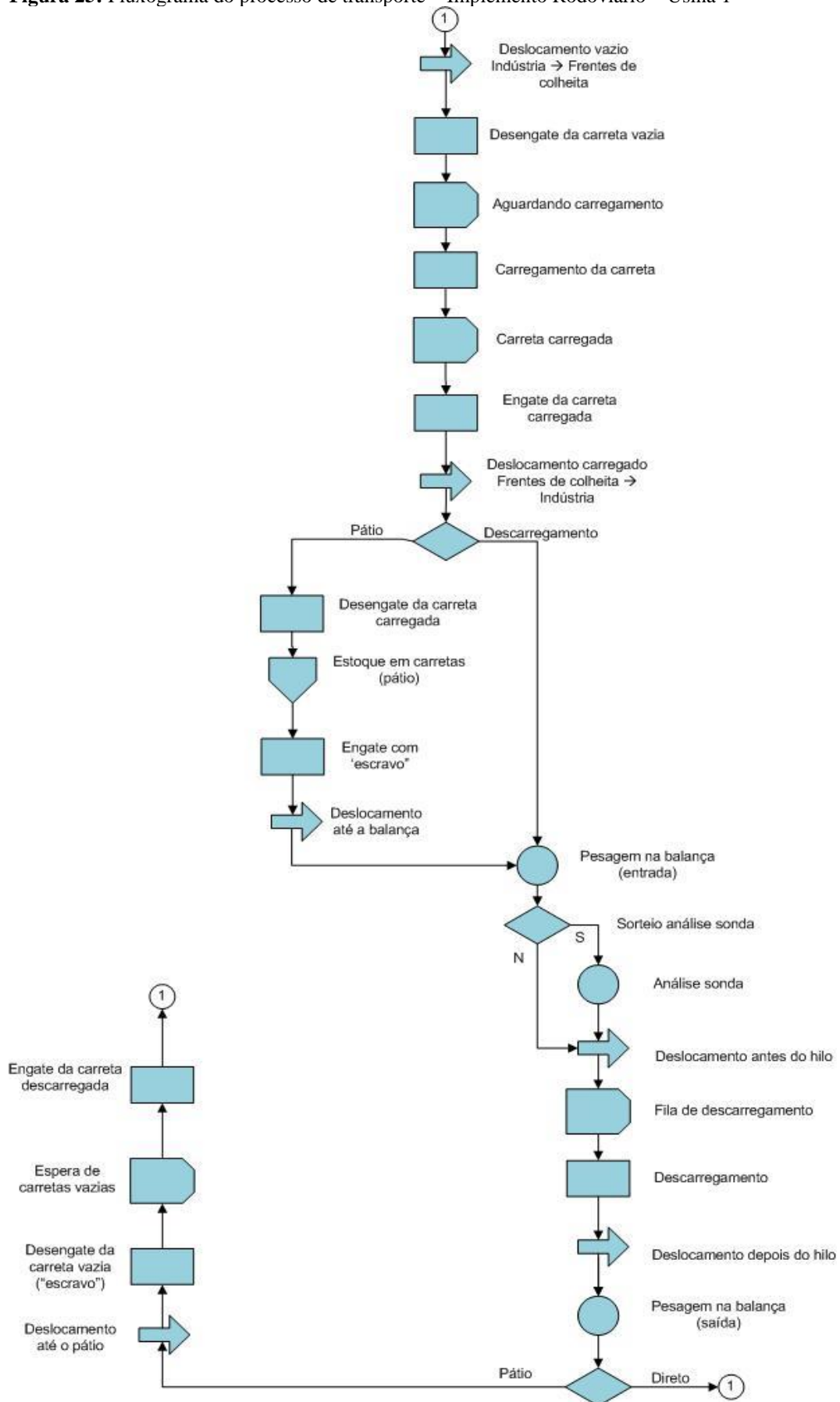
Os fluxogramas das referidas figuras são autoexplicativos, e consideram as etapas de carregamento nas frentes de colheita; transporte da cana-de-açúcar por estradas e rodovias; recebimento da cana-de-açúcar nas unidades industriais, seja a partir do descarregamento direto ou com a utilização do pátio; e o retorno dos equipamentos para as frentes de colheita. Destaca-se que os fluxogramas já permitem a identificação de possíveis etapas que geram filas de espera no processo.

Figura 24: Fluxograma do processo de transporte – Geral – Usina 1



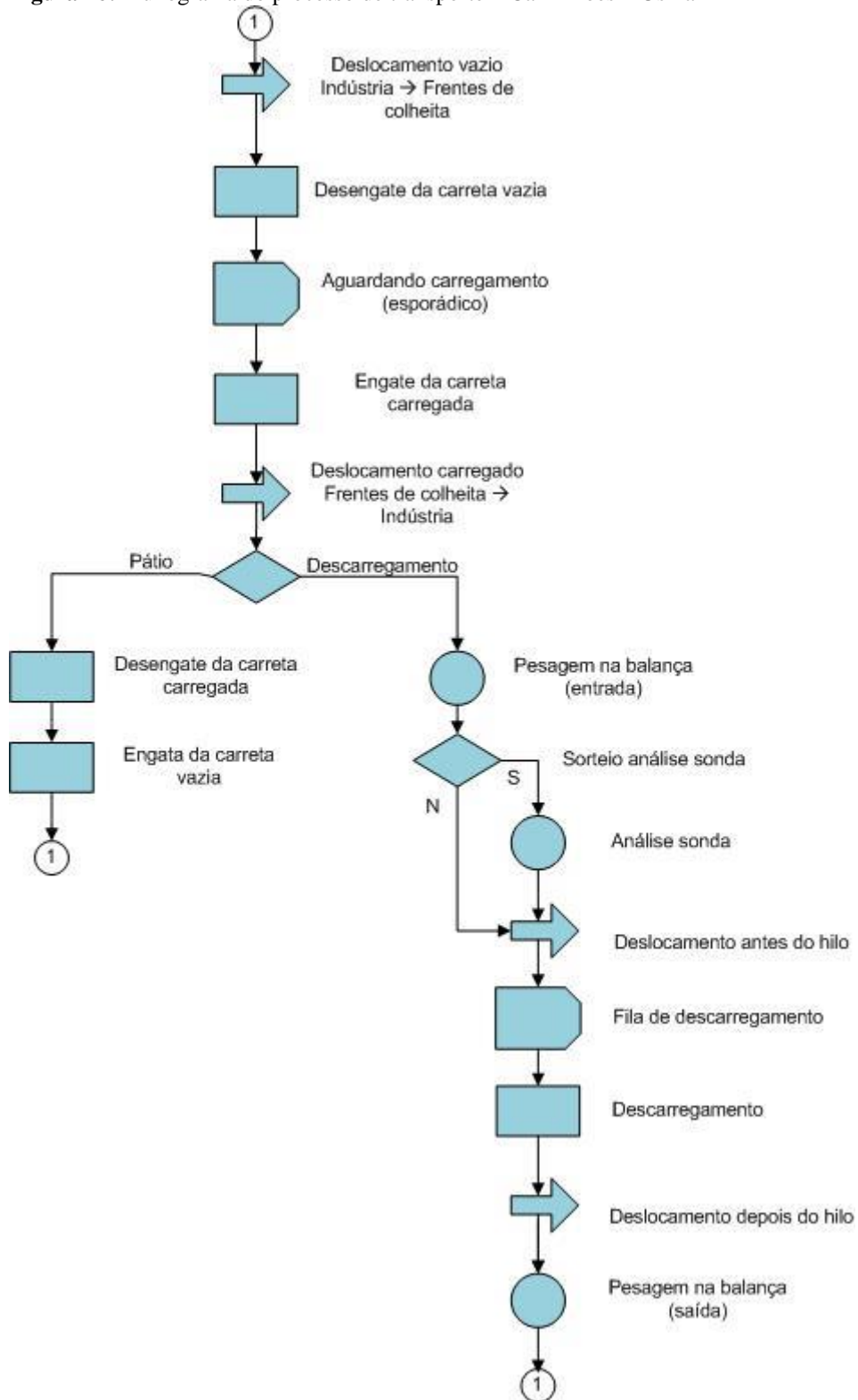
Fonte: Próprio autor

Figura 25: Fluxograma do processo de transporte – Implemento Rodoviário – Usina 1



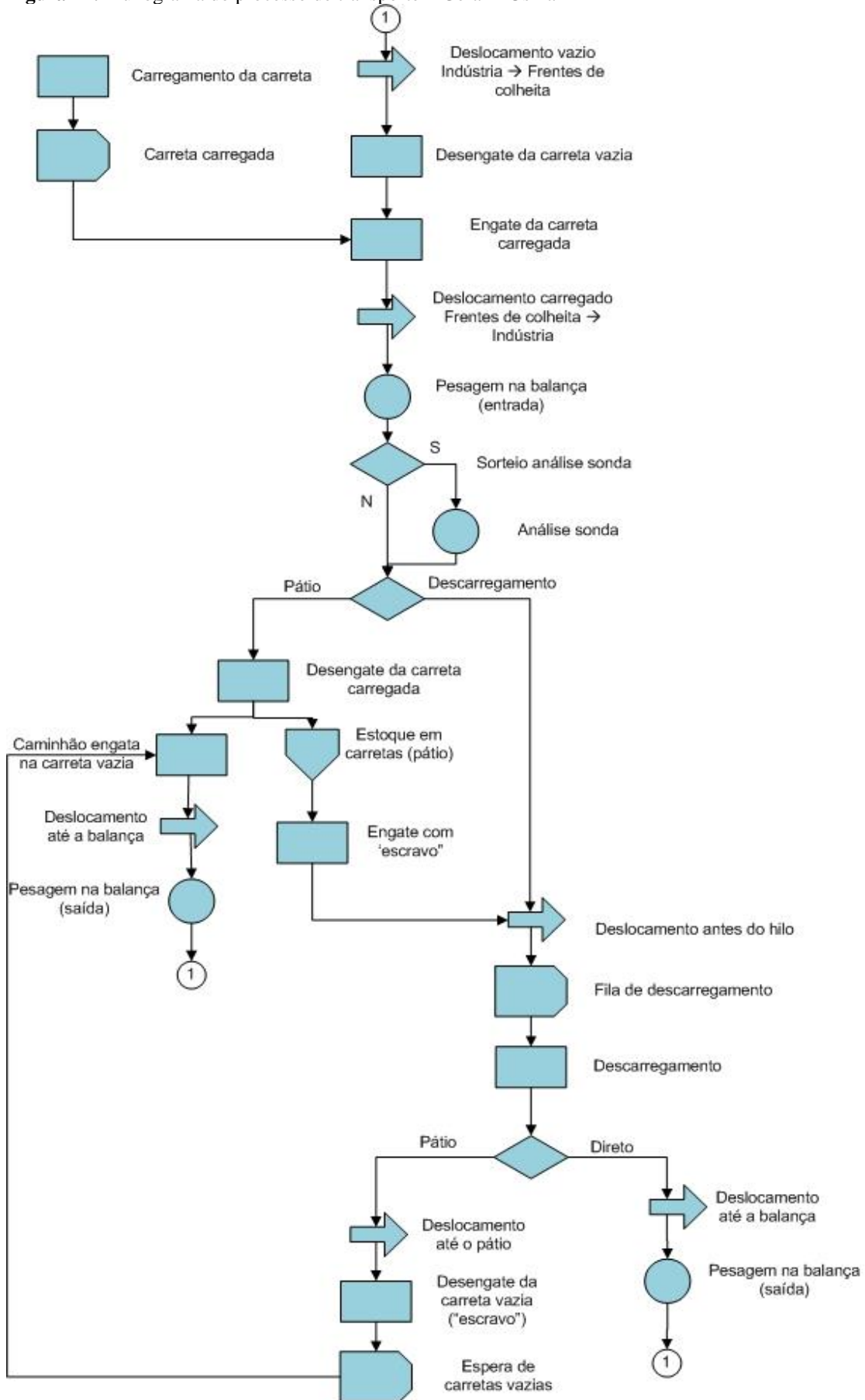
Fonte: Próprio autor

**Figura 26:** Fluxograma do processo de transporte – Caminhões – Usina 1



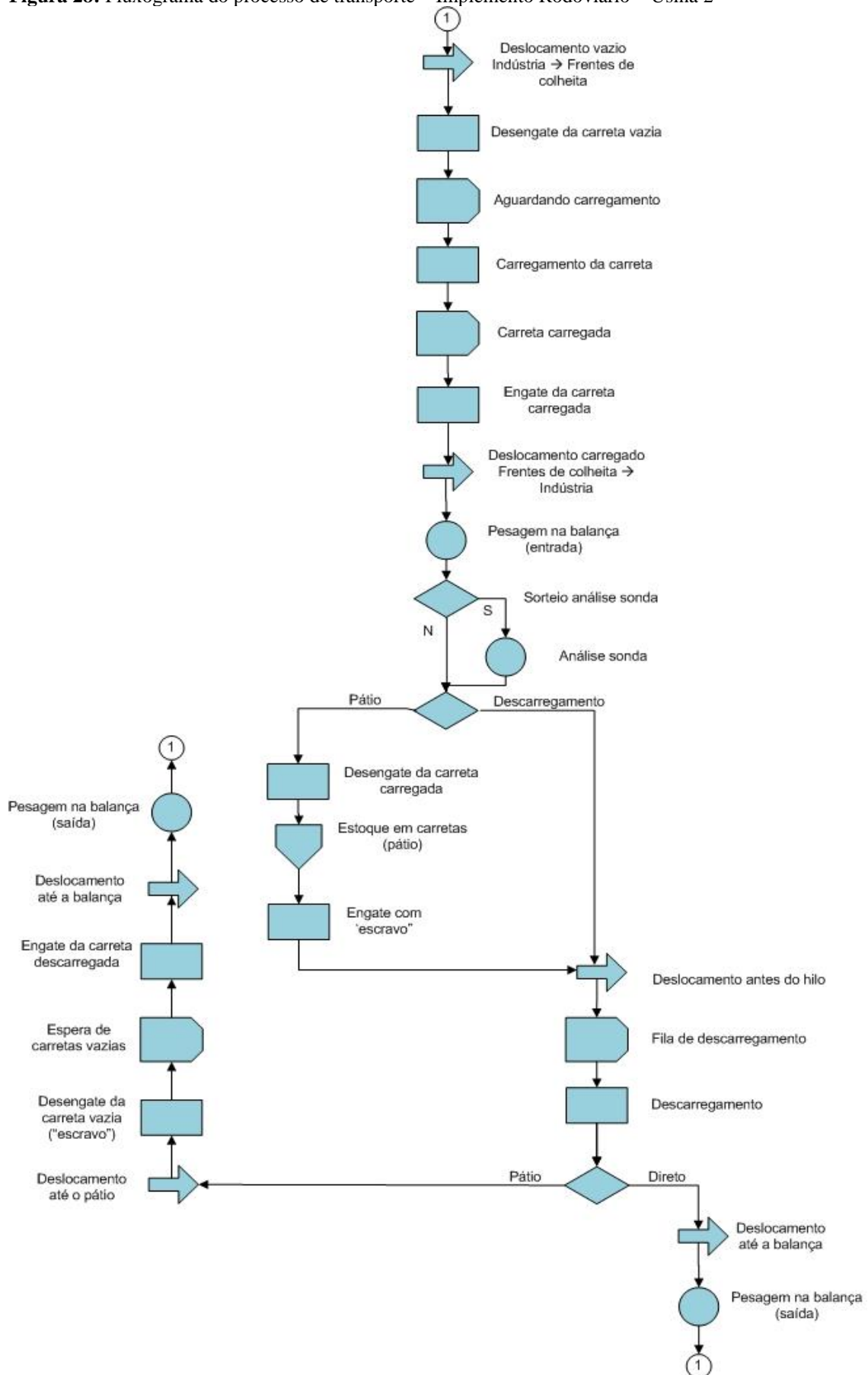
Fonte: Próprio autor

Figura 27: Fluxograma do processo de transporte – Geral – Usina 2



Fonte: Próprio autor

Figura 28: Fluxograma do processo de transporte – Implemento Rodoviário – Usina 2



Fonte: Próprio autor

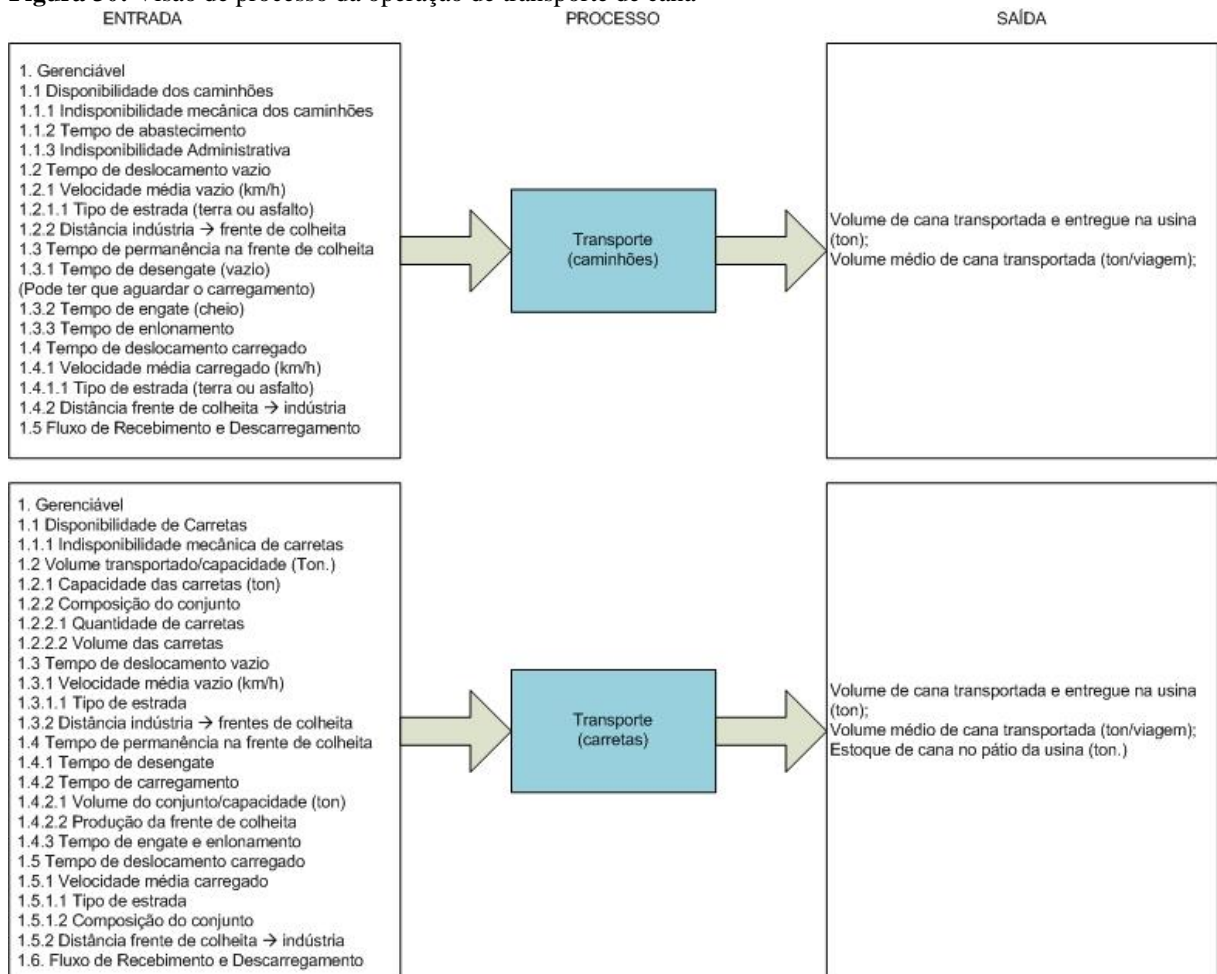


#### 4.1.3.2. Variáveis que impactam no transporte da cana-de-açúcar

As variáveis que impactam nas operações de transporte da cana-de-açúcar das frentes de colheita às usinas de processamento foram levantadas a partir de entrevistas e grupos de trabalho com o Gestor de Motomecanização, o Supervisor e o Engenheiro das operações de CTT; de análise de documentos, considerando os dados dos softwares operacionais Logtrac e Solinftec, os fluxogramas de processos já existentes e os dados do ERP da empresa; além de observações realizadas nas operações.

Na Figura 30, tem-se a visão de processo da operação de transporte da cana-de-açúcar, divididas pela operação realizada pelos caminhões e outra realizada pelas carretas. Apesar de terem entradas e saídas que se sobrepõem, optou-se por separá-las pois apresentam pequenas diferenças que são importantes para a análise. Nota-se que no campo entrada são apresentadas as variáveis que impactam no volume de cana-de-açúcar transportado.

**Figura 30:** Visão de processo da operação de transporte de cana



Fonte: Próprio autor

Além dos elementos apontados na Figura 30, nas entrevistas foram abordados outros pontos mais qualitativos, tais como a qualidade das vias e a necessidade de mudança de trajeto por algum motivo de interdição ou condições desfavoráveis. No entanto, essas condições refletem na velocidade média de deslocamento e no raio das frentes de colheita.

Além desses pontos, foram identificados como elementos importantes: a) configuração dos conjuntos (rodotrem ou treminhado); b) tempo de carregamento nas frentes de colheita; e c) disponibilidade dos equipamentos.

Diante disso, nos próximos tópicos são abordadas com maior profundidade as características de velocidade do transporte, raio das frentes de colheita e tempo de carregamento na frente de colheita do sistema em estudo.

#### **4.1.3.2.1. Raio das frentes de colheita**

Como já apresentado a produção da cana-de-açúcar é descentralizada em relação à usina de processamento industrial, considerando a grande área demandada para seu cultivo, além da competição com outras ocupações como estradas, cidades e áreas de preservação permanente.

Diante disso, as frentes de colheita apresentam diferentes distâncias até as usinas, fator que deve ser considerado na dinâmica dos processos de CTT, dado que a etapa de transporte é responsável por levar a cana-de-açúcar das frentes de colheita até as unidades industriais.

Nesse ponto, destaca-se que no sistema estudado devem ser avaliados os raios das frentes de colheita em relação às duas unidades de processamento industrial, além de considerar a alocação nas unidades a partir da localização geográfica e capacidade de processamento industrial.

Diante disso, a Tabela 6 apresenta a distribuição das distâncias entre as frentes de colheita e as unidades industriais. Nota-se que o raio médio entre as frentes de colheita e a Indústria 1 é de 20,6 km, enquanto o raio médio entre as frentes de colheita e a Indústria 2 é de 21,8 km.

No entanto, vale ressaltar que a dispersão desses dados é elevada. Existem frentes de colheita próximas às unidades industriais, com distâncias inferiores a 1 km e frentes de colheita mais distantes, com distâncias que ultrapassam os 70 km.

Nesse ponto, vale destacar a complexidade que essa variável traz ao sistema, e ao modelo. É importante o horizonte de tempo simulado, ou seja, para simular a safra toda usa-se os valores da Tabela 6, porém para horizontes menores deve-se reavaliar as distâncias das frentes para aquele período.

**Tabela 6:** Distância das Frentes de Colheita

Distância - Km (Usina --> FC)	Indústria 1	Indústria 2
<b>Localização</b>		
<b>Média</b>	20,6	21,8
<b>Mínimo</b>	0,7	1,2
<b>Máximo</b>	74,5	71,0
<b>Percentis</b>		
<b>1%</b>	2,0	2,0
<b>3%</b>	4,8	3,5
<b>5%</b>	5,9	5,0
<b>8%</b>	7,3	6,1
<b>10%</b>	8,1	7,2
<b>15%</b>	10,0	9,0
<b>20%</b>	11,4	10,2
<b>25%</b>	12,8	11,7
<b>30%</b>	14,7	13,0
<b>35%</b>	16,3	14,0
<b>40%</b>	17,2	15,1
<b>45%</b>	18,5	17,0
<b>50%</b>	19,7	18,2
<b>55%</b>	21,2	20,0
<b>60%</b>	22,6	22,4
<b>65%</b>	24,0	25,3
<b>70%</b>	25,2	27,4
<b>75%</b>	27,0	29,0
<b>80%</b>	28,0	31,0
<b>85%</b>	30,9	35,0
<b>90%</b>	33,1	39,1
<b>92%</b>	35,4	40,0
<b>95%</b>	39,3	42,2
<b>97%</b>	43,8	45,9
<b>99%</b>	59,2	57,9

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

#### 4.1.3.2.2. Velocidade média do transporte

A velocidade média do transporte é a variável que, em conjunto com a distância da frente de colheita, determina o tempo que a cana-de-açúcar leva para ser deslocada das frentes de colheita até as unidades industriais.

Cabe salientar que há diferença entre as velocidades de transporte da ida à frente de colheita para o transporte de volta da frente de colheita. Isto acontece em virtude da carga do conjunto, considerando que na ida o caminhão está vazio e na volta o caminhão está carregado, exigindo maior energia para o deslocamento. Logo para a construção do modelo deve ser considerada essa diferença.

Com base na avaliação dos relatórios do sistema Logtrac, considerando os dados da Safra 20/21 e do início da Safra 21/22, tem-se na Tabela 7 parâmetros que indicam o

comportamento da velocidade média do conjunto vazio e do conjunto carregado dentro do subsistema de transporte.

**Tabela 7:** Velocidade média do transporte

Velocidade média (km/h)	Velocidade vazio	Velocidade carregado
<b>Localização</b>		
<b>Média</b>	32,9	29,6
<b>Mínimo</b>	5,0	5,0
<b>Máximo</b>	80,0	80,0
<b>Percentis</b>		
<b>1%</b>	9,4	9,0
<b>3%</b>	13,4	12,3
<b>5%</b>	15,8	14,2
<b>8%</b>	18,2	16,2
<b>10%</b>	19,4	17,2
<b>15%</b>	21,8	19,1
<b>20%</b>	23,6	20,6
<b>25%</b>	25,2	22,0
<b>30%</b>	26,5	23,2
<b>35%</b>	27,8	24,4
<b>40%</b>	29,1	25,6
<b>45%</b>	30,3	26,8
<b>50%</b>	31,6	28,0
<b>55%</b>	32,8	29,3
<b>60%</b>	34,2	30,5
<b>65%</b>	35,7	32,0
<b>70%</b>	37,5	33,6
<b>75%</b>	39,5	35,5
<b>80%</b>	41,8	37,6
<b>85%</b>	44,6	40,5
<b>90%</b>	48,3	44,2
<b>92%</b>	50,2	46,3
<b>95%</b>	54,0	50,6
<b>97%</b>	58,2	55,4
<b>99%</b>	66,5	66,6

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

A velocidade média varia de 5 km/h a 80 km/h em ambos os tipos de deslocamento. Porém no que se refere a média dos valores, observa-se que a velocidade média do conjunto vazio é consideravelmente superior à velocidade média do conjunto carregado, sendo a primeira 32,9 km/h e a segunda 29,6 km/h.

Ainda, no que tange os elementos qualitativos levantados, destaca-se que a velocidade média está exposta à outras variáveis do sistema. De modo que a partir das entrevistas e da observação do processo, notou-se alguns impactos, tais como:

- a) a proporção do percurso formado por estrada de terra e formado por rodovia, dado que a velocidade nas estradas rurais é menor que nas rodovias;

- b) o impacto das conversões de trânsito, tais com manobras e travessias de trevos no tempo total de deslocamento;
- c) o tempo para atingir o pico de velocidade, ou tempo para aceleração do conjunto, considerando sua representatividade no tempo total de deslocamento;

Nesse ponto, com o objetivo de considerar esses elementos no modelo, mas ao mesmo tempo simplificar o sistema real, construiu-se classes para avaliar as velocidades médias, a partir das distâncias das frentes de colheita.

Destaca-se que essa classificação foi realizada a partir da premissa que quanto maior a distância das frentes de colheita maior é o percurso realizado em rodovias, e menor é o impacto das conversões e da aceleração no tempo total do trajeto.

A Tabela 8 evidencia essa diferença de nível da velocidade média quando está classificada por distância das frentes de colheita. Nota-se que a premissa assumida é comprovada, quando a velocidade média do transporte, tanto vazio quanto carregado, aumenta conforme a distância das frentes de colheita aumentam.

**Tabela 8:** Relação velocidade média e distância da FC

Classe por distância	Velocidade média vazio (km/h)	Velocidade média carregado (km/h)
Até 10 km	22,3	25,1
De 10 km a 30 km	31,6	28,4
De 30 km a 50 km	41,0	34,5
Acima de 50 km	48,0	40,4
<b>Total</b>	<b>32,9</b>	<b>29,6</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Ainda, mesmo que essa diferença possa ser percebida pela tabela, o Apêndice G apresenta o teste de hipótese que comprova estatisticamente a diferença das médias entre as classes de distância, proporcionando confiabilidade e simplificação para utilização no modelo.

#### **4.1.3.2.3. Tempo de carregamento na frente de colheita**

O tempo de carregamento na frente de colheita se refere ao tempo necessário para que um conjunto seja carregado de cana-de-açúcar nas frentes de colheita. Destaca-se que esse valor pode ser calculado a partir da taxa de produção da frente de colheita (abordado no tópico 4.1.2.2) e da capacidade de carga do conjunto.

A capacidade de carga do conjunto é tratada no sistema estudado como densidade de carga das carretas, a qual mede o volume de cana-de-açúcar transportado por cada unidade de

carga em uma viagem, sendo um elemento importante não só para medir o tempo de carregamento, mas também para fornecer o volume de cana transportado por um conjunto.

A Tabela 9 apresenta a distribuição da densidade de carga média realizada na Safra 20/21 e início da Safra 21/22. Observa-se que esse elemento tem variação entre 25 toneladas por unidade de carga e 45,2 toneladas por unidade de carga, e apresenta seu valor médio próximo de 35 toneladas por unidade de carga.

**Tabela 9:** Densidade de carga das carretas

Densidade de carga	ton./unidade de carga
<b>Localização</b>	
<b>Média</b>	34,9
<b>Mínimo</b>	25,0
<b>Máximo</b>	45,2
<b>Percentis</b>	
1%	27,0
3%	28,6
5%	29,5
8%	30,5
10%	30,9
15%	31,8
20%	32,5
25%	33,0
30%	33,5
35%	33,9
40%	34,3
45%	34,7
50%	35,1
55%	35,5
60%	35,8
65%	36,2
70%	36,6
75%	37,0
80%	37,5
85%	38,0
90%	38,7
92%	39,1
95%	39,7
97%	40,4
99%	41,6

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Os valores presentes na Tabela 9 representam o volume de cana transportado por apenas uma unidade de carga, sendo necessária a transformação para o volume transportado pelo conjunto, de modo a multiplicar por três quando treminhado, ou por dois quando rodotrem.

Dessa forma, quando é feita a divisão de 60 minutos por essa quantidade tem-se o tempo para carregamento de uma unidade de carga, e quando realizada a multiplicação pela quantidade de unidades de carga no conjunto, tem-se o tempo de carregamento do conjunto.

A Equação 12 apresenta o cálculo do tempo de carregamento dos conjuntos, de forma que a razão entre a taxa de produção da frente de colheita e a densidade de carga, resulta na

quantidade de unidades de carga necessárias por hora para atender a produção da frente de colheita.

$$T. \text{ carreg. (min/conjunto)} = \frac{60x \text{ Qnt. carretas}}{(Tx. \text{ Prod. FC(ton./h)}) / (\text{Densidade de carga(ton./carreta)})} \quad (12)$$

O tempo de palhada é o tempo que o caminhão de linha fica na frente de colheita. Refere-se ao tempo necessário para que as operações de desengate da carreta vazia, e engate da carreta carregada sejam realizadas, além da espera quando o conjunto ainda não foi carregado de cana-de-açúcar.

A Tabela 10 apresenta o comportamento do tempo de palhada, considerando a Safra 20/21 e início da Safra 21/22. Nota-se que, por ser uma etapa exposta a fontes de variação do processo, tais como a espera do carregamento, o tempo varia entre 5 e 90 minutos. Destaca-se que o tempo médio de palhada é de 22 minutos.

**Tabela 10:** Tempo de palhada

	<b>Tempo de palhada</b>
<b>Localização</b>	
<b>Média</b>	00:22
<b>Mínimo</b>	00:05
<b>Máximo</b>	01:30
<b>Percentis</b>	
<b>1%</b>	00:05
<b>3%</b>	00:06
<b>5%</b>	00:07
<b>8%</b>	00:08
<b>10%</b>	00:08
<b>15%</b>	00:10
<b>20%</b>	00:10
<b>25%</b>	00:10
<b>30%</b>	00:11
<b>35%</b>	00:12
<b>40%</b>	00:14
<b>45%</b>	00:15
<b>50%</b>	00:16
<b>55%</b>	00:18
<b>60%</b>	00:20
<b>65%</b>	00:21
<b>70%</b>	00:24
<b>75%</b>	00:27
<b>80%</b>	00:31
<b>85%</b>	00:38
<b>90%</b>	00:46
<b>92%</b>	00:51
<b>95%</b>	01:00
<b>97%</b>	01:09
<b>99%</b>	01:21

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Para utilização no modelo, a produção da frente de colheita e a capacidade das carretas determinam o tempo de carregamento e, conseqüentemente, as esperas geradas. De modo que o *input* necessário para determinar o tempo do caminhão na frente de colheita, se restringe apenas a acrescentar o tempo de engate e desengate.

#### 4.1.3.3. Estrutura e disponibilidade de equipamentos para o transporte

A estrutura para a operação de transporte é composta por caminhões e carretas, ou unidades de carga. O sistema estudado é composto por 23 caminhões de terceiros e 26 caminhões próprios, somando 49 caminhões. No que se refere as carretas, o sistema estudado é composto por 232 unidades de carga, sendo 108 reboques e 124 semi-reboques.

No que tange a formação dos conjuntos, levantou-se que 13% das unidades de carga são para conjuntos treminhados, de modo que a estrutura é composta por 102 conjuntos rodotrem e 10 conjuntos treminhados.

No que se refere a disponibilidade da estrutura de transporte, tem-se na Tabela 11 a indisponibilidade mecânica dos caminhões canavieiros, e na Tabela 12 a indisponibilidade das unidades de carga. Nesse ponto, destaca-se que outras classes de indisponibilidades são dadas pelos parâmetros configurados no modelo de simulação, tal qual os tempos de engate e desengate.

**Tabela 11:** Indisponibilidade dos caminhões canavieiros

Indisponibilidade Mecânica	Caminhões
<b>Localização</b>	
<b>Média</b>	4,57%
<b>Mínimo</b>	1,08%
<b>Máximo</b>	14,51%
<b>Percentis</b>	
<b>1%</b>	-
<b>3%</b>	1,42%
<b>5%</b>	1,56%
<b>8%</b>	1,82%
<b>10%</b>	1,97%
<b>15%</b>	2,20%
<b>20%</b>	2,45%
<b>25%</b>	2,79%
<b>30%</b>	3,01%
<b>35%</b>	3,33%
<b>40%</b>	3,47%
<b>45%</b>	3,59%
<b>50%</b>	3,99%
<b>55%</b>	4,08%
<b>60%</b>	4,28%
<b>65%</b>	4,60%
<b>70%</b>	4,90%
<b>75%</b>	5,27%
<b>80%</b>	5,86%
<b>85%</b>	7,03%
<b>90%</b>	8,48%
<b>92%</b>	9,65%
<b>95%</b>	10,49%
<b>97%</b>	13,48%
<b>99%</b>	-

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Nota-se a partir da Tabela 11 que a indisponibilidade dos caminhões varia de 1,08% a 14,51% nos dias de safra com média de 4,57%. Como 80% dos dados são menores que 5,87%, vale destacar que há presença de causa especiais.

Já na Tabela 12, observa-se que a indisponibilidade das unidades de carga é crescente durante a safra, isto porque a quantidade e a severidade de quebras são maiores, sendo causadas, entre outros fatores, por desgaste e as condições do solo onde são realizados os transportes.

Nesse ponto, destaca-se que as indisponibilidades devem ser atualizadas no modelo conforme o horizonte de simulação, de modo que suas médias são satisfatórias para a simulação do período safra.

**Tabela 12:** Indisponibilidade das unidades de carga

<b>Período</b>	<b>Indisponibilidade Implementos Rodoviários</b>
Abril	2,90%
Mai	4,76%
Junho	5,41%
Julho	7,06%
Agosto	7,86%
Setembro	8,54%
Outubro	8,18%
<b>Total Safra</b>	<b>6,80%</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

#### **4.1.4. Descrição das Operações de Recebimento e Moagem da Cana-de-Açúcar**

As operações de recebimento da cana-de-açúcar são as que vão do momento de chegada da cana na usina até a entrada no processo industrial, que é dado pela moagem da cana-de-açúcar. As operações de recebimento da cana-de-açúcar podem ser divididas em quatro etapas, a citar:

- a) pátio bate e volta, que é responsável pelo estoque intermediário entre as operações agrícolas e as operações industriais, de modo que é importante para absorver as variações de produção agrícola e de consumo industrial;
- b) balança, que é o local onde é medido o peso de cana-de-açúcar que está entrando na usina, sendo pesado o conjunto carregado na entrada e vazio na saída;
- c) análise sonda (PCTS), onde são coletadas as amostras de cana-de-açúcar das carretas para serem feitas as análises do teor de sacarose, que por sua vez

são importantes para o pagamento da cana-de-açúcar e identificação do potencial de produção de açúcar daquela cana;

- d) descarregamento, que é o momento que a cana-de-açúcar é transferida das carretas para o processo industrial.

A operação de moagem é o primeiro processamento industrial da cana-de-açúcar e dita o ritmo de consumo de cana pela usina.

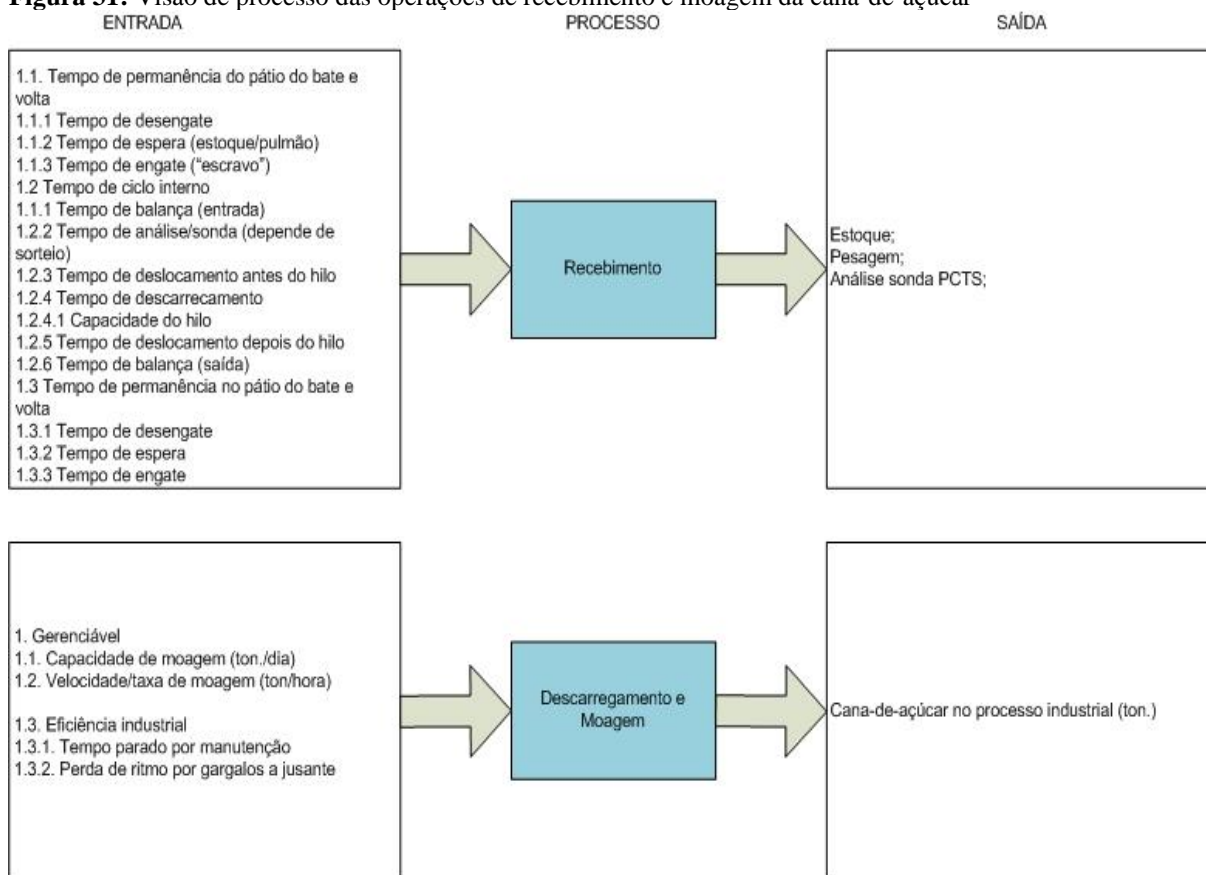
No sistema estudado, composto por duas unidades industriais, essas operações apresentam configurações diferentes. Sendo que na Indústria 1 o pátio bate e volta é localizado antes da entrada da usina, e na Indústria 2 é dentro da usina.

Para entender de forma mais detalhada as operações de recebimento e da moagem da cana-de-açúcar, inclusive evidenciando os impactos dessa diferença entre as unidades industriais, nos próximos tópicos são apresentadas as variáveis que impactam nessas operações, assim como o fluxo das operações de recebimento e descarregamento da cana-de-açúcar e o detalhamento de cada etapa.

#### **4.1.4.1. Variáveis que impactam no recebimento e na moagem**

As variáveis que impactam nas operações de recebimento e moagem da cana-de-açúcar foram levantadas a partir da observação direta dos processos, da análise de documentos, considerando os fluxogramas de processos já existentes, além das entrevistas com a equipe das operações de CTT, o Especialista de Operações Integradas e o Gestor da Extração, área que é realizada a moagem.

Na Figura 31, tem-se a visão de processo das operações de recebimento e moagem da cana-de-açúcar. Pela ótica das operações de CTT, o recebimento e descarregamento apresentam como principais variáveis de entrada os tempos de deslocamento e os tempos de cada operação. Na moagem a principal variável é a taxa de moagem, medida pelo volume de cana-de-açúcar que a unidade industrial consome por hora. Nesse ponto, destaca-se que essas variáveis foram confirmadas nas entrevistas realizadas com os envolvidos no processo, que já foram mencionados.

**Figura 31:** Visão de processo das operações de recebimento e moagem da cana-de-açúcar

Fonte: Próprio autor

#### 4.1.4.2. Fluxo das operações de recebimento e descarregamento da cana

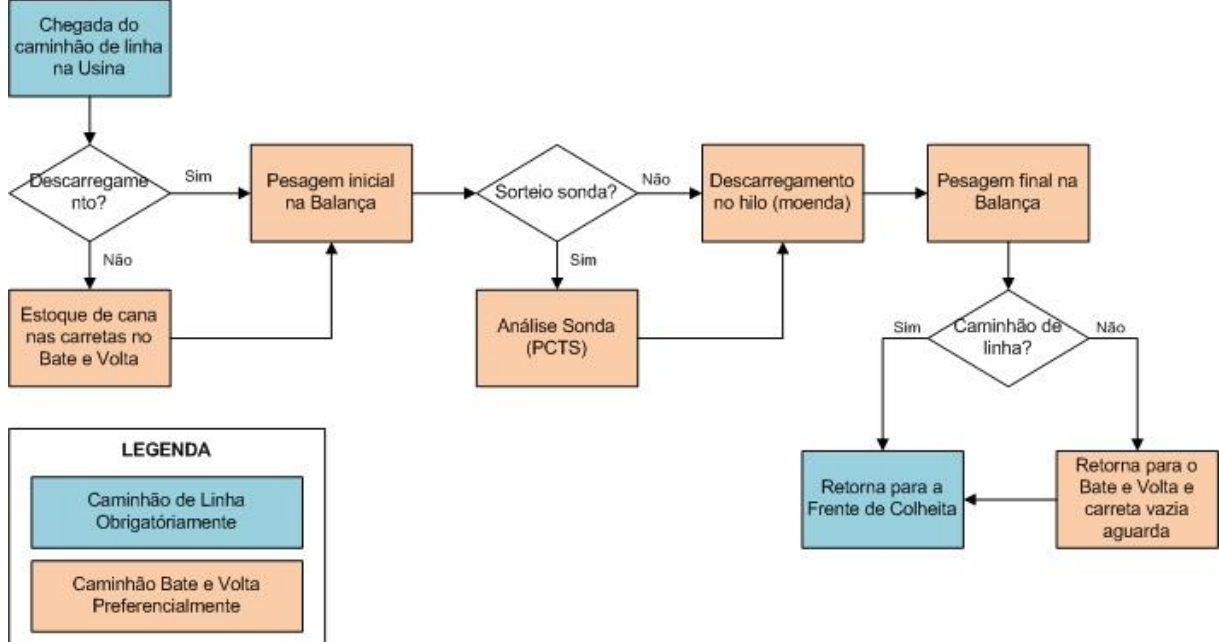
As diferenças entre as Indústrias 1 e 2 mencionadas refletem nas operações realizadas pelos caminhões de linha e pelos caminhões bate e volta (escravos), e conseqüentemente, nos seus tempos de ciclo e quantidade de equipamentos em cada função dentro do sistema. A Figura 32 se refere ao fluxo de recebimento de cana da Indústria 1, e a Figura 33 ao fluxo de recebimento da Indústria 2.

Destaca-se que em ambas as figuras as operações realizadas pelos caminhões de linha estão em azul, e as operações realizadas pelo caminhão bate e volta (escravo) estão em vermelho.

Na Indústria 1 o caminhão de linha se restringe a chegada ao bate e volta e retorno à frente de colheita, e o caminhão bate e volta é responsável pelas pesagens (entrada e saída), pela análise na sonda e pelo descarregamento no hilo. Já na Indústria 2, o caminhão de linha além da chegada à usina e retorno às frentes de colheita, realiza as operações de pesagem

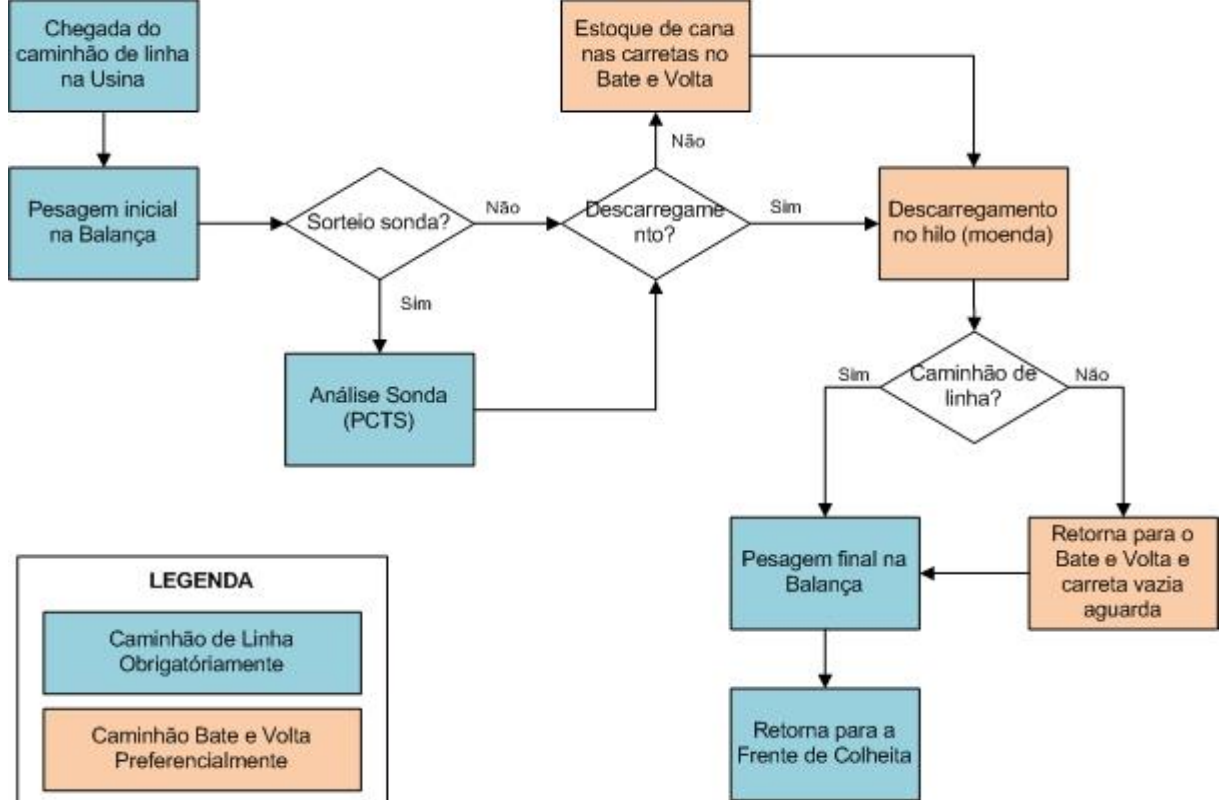
(entrada e saída) e análise na sonda PCTS, de modo que o caminhão bate e volta realiza apenas o descarregamento no hilo.

**Figura 32:** Fluxo de recebimento de cana da Indústria 1



Fonte: Próprio autor

**Figura 33:** Fluxo de recebimento de cana da Indústria 2



Fonte: Próprio autor

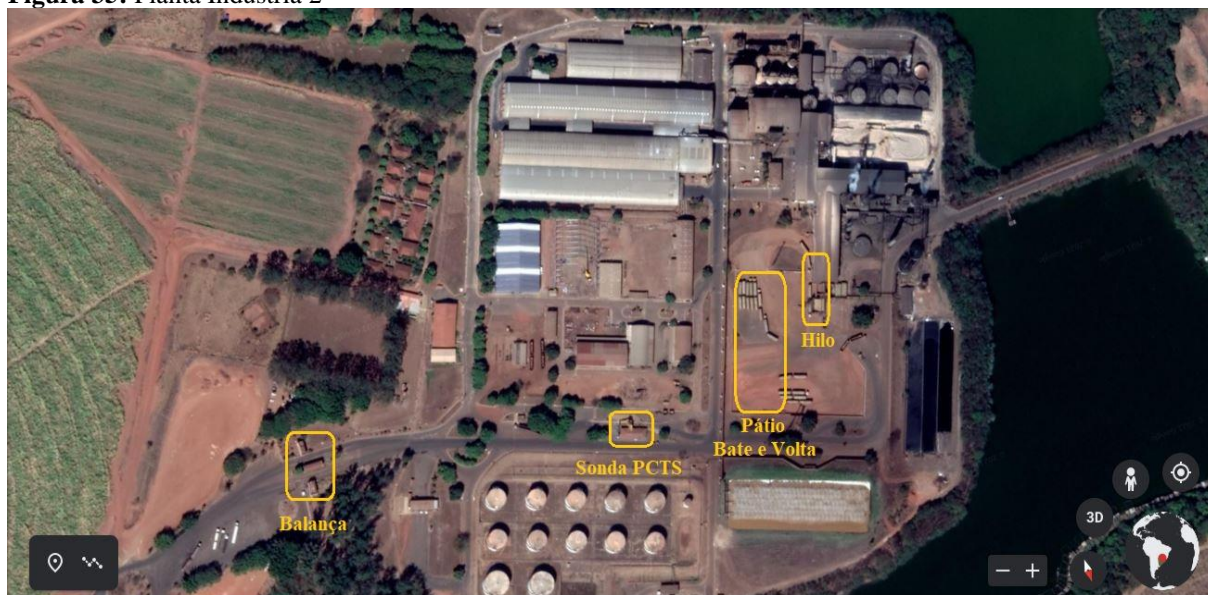
Para entender essas localizações nas unidades industriais, a Figura 34 apresenta a planta da Indústria 1, além da identificação de cada etapa de recebimento da cana-de-açúcar, e a Figura 35 refere-se à planta da Indústria 2 e suas localizações.

**Figura 34:** Planta Indústria 1



Fonte: Adaptado Google Earth

**Figura 35:** Planta Indústria 2



Fonte: Adaptado Google Earth

As variáveis que impactam o sistema são o tempo de deslocamento e o tempo para realização de cada operação. Com apoio da Figura 34 e da Figura 35 foram calculadas as distâncias para esse deslocamento.

Foi identificada a velocidade média de deslocamento dentro da planta industrial, definida a partir da observação e acompanhamento dos caminhões, sendo limitada pelo limite de velocidade da planta, pelo curto espaço de deslocamento entre as etapas, e pela capacidade de potência e carga dos caminhões.

Para simplificação no modelo foi adotada a velocidade média de 15 km/h como a velocidade de deslocamento de dentro da planta. Desse modo também é possível calcular o tempo de deslocamento.

As informações de distância de deslocamento, velocidade média e tempo de deslocamento, assim como o sentido desse deslocamento podem ser vistos na Tabela 13 para a Indústria 1 e na Tabela 14 para a Indústria 2.

**Tabela 13:** Deslocamento interno da Indústria 1

Indústria 1				
Origem	Destino	Deslocamento (m)	Velocidade média (km/h)	Tempo estimado pela velocidade média (min)
Pátio Bate e Volta	Balança	413	15	01:39
Balança	Sonda PCTS	148	15	00:36
Sonda PCTS	Hilo	541	15	02:10
Hilo	Balança	412	15	01:39
Balança	Pátio Bate e Volta	413	15	01:39

Fonte: Adaptado Google Earth

**Tabela 14:** Deslocamento interno da Indústria 2

Indústria 2				
Origem	Destino	Deslocamento (m)	Velocidade média (km/h)	Tempo estimado pela velocidade média (min)
Balança	Sonda PCTS	308	15	01:14
Sonda PCTS	Pátio Bate e Volta	223	15	00:54
Pátio Bate e Volta	Hilo	157	15	00:38
Hilo	Pátio Bate e Volta	86	15	00:21
Pátio Bate e Volta	Balança	709	15	02:50

Fonte: Adaptado Google Earth

No que tange ao tempo de cada etapa das operações de recebimento da cana-de-açúcar, serão abordados com maior detalhamento nos próximos tópicos, sendo destacados os dois pontos a seguir:

- a) tanto os tempos de deslocamento quanto os tempos operacionais do recebimento de cana apresentam somente as variações naturais do processo, não estando expostos à impactos sazonais. Dessa forma podem ser utilizados de uma única maneira nos modelos de simulação, sem influência do horizonte de tempo simulado;
- b) apesar de existirem diferenças na ordem das operações de recebimento, as operações em si são semelhantes. Diante disso notou-se que tanto na

indústria 1 quanto na indústria 2 as durações médias das operações são as mesmas. Logo as avaliações nos tópicos subsequentes são realizadas para ambas as unidades industriais.

#### 4.1.4.2.1. Pátio bate e volta (estoque)

No bate e volta, local do estoque intermediário, existem as seguintes operações que devem ser consideradas no modelo do sistema de CTT: a) tempo de desengate do caminhão de linha das carretas cheias; b) tempo de engate do caminhão bate e volta nas carretas cheias; c) tempo de desengate do caminhão bate e volta das carretas vazias; e d) tempo de engate do caminhão de linha nas carretas vazias.

A partir de observação direta do processo com auxílio de um cronometro foram coletados os tempos de cada uma dessas operações, os quais são apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15:** Tempo das operações no Bate e Volta

<b>Tempo das operações no bate e volta (min)</b>				
<b>Medição</b>	<b>Carreta cheia</b>		<b>Carreta vazia</b>	
	<b>Tempo de desengate</b>	<b>Tempo de engate</b>	<b>Tempo de desengate</b>	<b>Tempo de engate</b>
1	02:10	01:45	02:42	04:01
2	01:40	02:47	01:50	03:33
3	01:21	02:55	01:35	05:31
4	01:35	01:57	02:13	06:27
5	02:30	02:38	02:04	04:10
6	01:19	01:38	01:51	05:42
7	01:15	02:10	01:43	04:07
8	01:20	02:15	01:54	03:57
9	02:11	02:52	02:14	03:57
10	02:44	02:49	01:43	04:38
11	02:42	01:54	01:22	03:37
12	01:50	02:36	01:32	03:55
13	01:35	01:38	02:23	03:35
14	02:13	02:12	01:29	06:23
15	02:04	02:15	01:27	06:17
<b>Média</b>	<b>01:53</b>	<b>02:17</b>	<b>01:52</b>	<b>04:39</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>00:30</b>	<b>00:27</b>	<b>00:23</b>	<b>01:05</b>

Fonte: Próprio autor

Os tempos de desengate são parecidos, tanto do caminhão de linha com a carreta cheia quanto com o caminhão bate e volta com a carreta vazia. O mesmo não acontece com os tempos de engate, não pelo fato de a ocupação da carreta influenciar, mas porque atividades de inspeção de pneus e parte elétrica são realizadas quando os caminhões de linha engatam nas carretas vazias para retornarem às frentes de colheita.

Dada a diferença de localização dos pátios bate e volta entre as duas unidades desse estudo, a necessidade de caminhões bate e volta também são diferentes. Desse modo, na Indústria 1 são alocados 13 caminhões para esta atividade, enquanto na Indústria 2 são alocados apenas 3.

Outro elemento relevante, no que tange as operações no bate e volta, para modelagem do sistema de CTT é a ordem que as carretas são alocadas para engatarem e seguirem para a próxima etapa do processo. Nesse ponto, foi levantado a partir de entrevista e observação que as primeiras carretas que chegam ao bate e volta são as primeiras a serem engatadas pelos caminhões escravos para seguirem no processo, ou seja, é usada a lógica *First in First out* (FIFO).

#### 4.1.4.2.2. Balança

Na balança são realizadas as operações de pesagem na entrada do caminhão carregado na unidade industrial e a pesagem do caminhão vazio na saída. Nesse ponto, destaca-se que, na entrada, além da pesagem é realizado o cadastro de informações da cana-de-açúcar que está na carreta, logo o tempo medido na entrada é maior. A Tabela 16 apresenta os tempos de entrada e saída da balança.

**Tabela 16:** Tempo das operações na Balança

Tempo de pesagem na balança (min)		
Medição	Tempo - pesagem entrada	Tempo - pesagem saída
1	02:45	01:12
2	02:52	01:07
3	02:31	01:13
4	02:22	01:10
5	02:54	02:24
6	03:05	00:53
7	03:00	02:20
8	03:06	00:56
9	02:41	01:04
10	02:07	01:08
11	02:27	01:09
12	02:26	01:07
13	02:18	01:34
14	02:36	01:07
15	02:42	01:05
<b>Média</b>	<b>02:39</b>	<b>01:17</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>00:17</b>	<b>00:27</b>

Fonte: Próprio autor

#### 4.1.4.2.3. Análise sonda (PCTS)

Para a análise do teor de sacarose é necessário realizar a coleta da amostra, a qual é realizada direto do conjunto que está entrando na usina. No que se refere a definição da amostra, de acordo com a entrevista com o responsável pelo Laboratório de Sacarose, são considerados os parâmetros da Consecana, de modo que há um sorteio dos caminhões que vão passar pela sonda, e outro sorteio para a quantidade de unidades de carga que serão analisadas.

No que se refere ao sorteio dos caminhões que passam pela sonda, a Tabela 17 apresenta como a taxa de carretas sorteadas para a coleta na Sonda PCTS se comporta diariamente nas duas unidades industriais, além de apresentar o cálculo da média desses valores.

**Tabela 17:** Taxa de carreta sorteadas para coleta na Sonda PCTS

Taxa Coleta PCTS	Indústria 1	Indústria 2
<b>Localização</b>		
<b>Média</b>	39,87%	41,84%
<b>Mínimo</b>	31,72%	31,44%
<b>Máximo</b>	55,76%	60,70%
<b>Percentis</b>		
<b>1%</b>	-	-
<b>3%</b>	32,24%	32,29%
<b>5%</b>	33,30%	32,90%
<b>8%</b>	33,69%	34,27%
<b>10%</b>	34,46%	34,65%
<b>15%</b>	35,55%	35,17%
<b>20%</b>	35,97%	35,60%
<b>25%</b>	36,76%	36,03%
<b>30%</b>	37,11%	36,98%
<b>35%</b>	37,88%	38,00%
<b>40%</b>	38,12%	38,39%
<b>45%</b>	38,57%	38,84%
<b>50%</b>	39,09%	39,39%
<b>55%</b>	39,39%	40,23%
<b>60%</b>	39,47%	41,26%
<b>65%</b>	39,83%	43,09%
<b>70%</b>	40,97%	45,80%
<b>75%</b>	41,37%	46,97%
<b>80%</b>	43,92%	47,90%
<b>85%</b>	45,24%	51,53%
<b>90%</b>	46,73%	53,66%
<b>92%</b>	48,40%	53,75%
<b>95%</b>	49,82%	55,18%
<b>97%</b>	53,24%	56,19%
<b>99%</b>	-	-

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

Sobre os tempos de coleta, destaca-se que estão expostos ao segundo sorteio que refere-se à quantidade de unidades de carga que terão amostras coletadas. Logo o tempo apresenta variação quanto a quantidade de unidades de carga analisadas. No entanto, conforme pode ser observado na Tabela 18, que apresenta o tempo de coleta no PCTS, os tempos por unidade de

carga são muito próximos, já que o processo da sonda é automático e apresenta um tempo de ciclo padrão.

**Tabela 18:** Tempo de coleta na Sonda PCTS

<b>Tempo de coleta no PCTS (min)</b>			
<b>Medição</b>	<b>Tempo de coleta das análises</b>	<b>Quantidade de unidade de carga coletada</b>	<b>Média por unidade de carga coletada</b>
1	03:39	1	03:39
2	05:31	2	02:45
3	06:28	2	03:14
4	06:01	2	03:00
5	03:01	1	03:01
6	03:07	1	03:07
7	05:55	2	02:57
8	03:29	1	03:29
9	06:25	2	03:12
10	03:20	1	03:20
11	03:32	1	03:32
12	03:03	1	03:03
13	03:15	1	03:15
14	05:59	2	02:59
15	06:07	2	03:03
<b>Média</b>	<b>04:35</b>	<b>1,47</b>	<b>03:10</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>01:26</b>	<b>0,52</b>	<b>00:14</b>

Fonte: Próprio autor

Nesse ponto, considerando que esse segundo sorteio é aleatório e que a coleta de dados demonstra uma distribuição igual entre as análises em duas ou em uma unidade de carga, para a construção do modelo, pode-se assumir o tempo médio de coleta.

#### **4.1.4.2.4. Descarregamento**

O descarregamento no hilo é realizado de forma muito semelhante entre as unidades. Sobre as diferenças, vale destacar que a Indústria 1 apresenta dois hilos que funcionam simultaneamente, enquanto a Indústria 2 opera somente com um hilo. No entanto, no que se refere ao tipo de operação e a sua duração são iguais entre todos os hilos.

A fonte de variação no tempo de descarregamento é a formação do conjunto, de modo que, por ter uma unidade de carga a mais, o conjunto treminhado demora mais para ser descarregado. No entanto, essa diferença de tempo é proporcional à quantidade de unidades de carga que o conjunto é formado.

A Tabela 19 apresenta os tempos coletados de cada conjunto descarregado, assim como a formação do conjunto descarregado e o tempo médio por unidade de carga. Nota-se que, independente do tamanho do conjunto, os tempos médio de descarregamento por unidade de carga são semelhantes.

**Tabela 19:** Tempo de descarregamento no hilo

<b>Tempo de descarregamento no hilo (min)</b>			
<b>Medição</b>	<b>Tempo de descarregamento</b>	<b>Formação do conjunto</b>	<b>Média por unidade de carga</b>
1	14:46	Treminhado	04:55
2	09:16	Rodotrem	04:38
3	09:14	Rodotrem	04:37
4	14:02	Treminhado	04:40
5	10:32	Rodotrem	05:16
6	09:12	Rodotrem	04:36
7	08:28	Rodotrem	04:14
8	09:49	Rodotrem	04:54
9	08:55	Rodotrem	04:27
10	09:57	Rodotrem	04:58
11	09:02	Rodotrem	04:31
12	10:05	Rodotrem	05:02
13	09:46	Rodotrem	04:53
14	07:47	Rodotrem	03:53
15	08:47	Rodotrem	04:23
<b>Média</b>	<b>09:58</b>		<b>04:40</b>
<b>Desv. Padrão</b>	<b>01:55</b>		<b>00:20</b>

Fonte: Próprio autor

#### **4.1.4.3. Ritmo de moagem**

No que tange a taxa de cana-de-açúcar demandada pela unidade industrial, foi levantado o funcionamento do processo de mensuração desse dado, que segundo entrevista com o Coordenador de Operações Integradas e o Gestor da Extração foi evidenciado que o volume é identificado a partir da entrada das carretas na balança e o horário de moagem é dado pelo horário que a carreta é descarregada no hilo.

Em termos de relatório, destacaram que esses dados são consolidados a cada duas horas no ERP da empresa, onde foi possível acessar todo o histórico da safra, identificando e expurgando os momentos que estavam expostos a eventos aleatórios, que não devem ser considerados como o comportamento normal de ritmo de moagem.

Destaca-se também que os valores médios e seus desvios-padrão apresentam variações ao decorrer da safra, sendo explicado, entre outras coisas, pela característica da matéria-prima em detrimento do clima. A Tabela 20 apresenta o valor médio e o desvio padrão do ritmo de moagem da Indústria 1 e da Indústria 2 entre os meses da safra.

Além das informações de moagem reais, vale considerar os volumes de cana-de-açúcar utilizados para o planejamento de cada usina. Nesse ponto, destaca-se que para a Indústria 1 considera-se a moagem de 21.000 toneladas por dia, apresentando uma taxa de 875 ton/hora; já para a Indústria 2 considera-se a moagem de 12.500 toneladas por dia, apresentando uma taxa de 521 ton/hora.

**Tabela 20:** Ritmo de moagem mensal (ton/hora)

Período	Ritmo de moagem (ton/hora)			
	Indústria 1		Indústria 2	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Abril	-	-	516	36
Mai	903	57	512	34
Junho	888	49	547	27
Julho	904	52	534	32
Agosto	887	51	524	35
Setembro	881	45	513	40
Outubro	889	43	516	32
<b>Safra</b>	<b>892</b>	<b>51</b>	<b>526</b>	<b>36</b>

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

No que se refere à utilização no modelo, vale destacar que o ritmo de moagem é exposto a variáveis não controladas, e que deve ser considerado o horizonte de tempo da simulação para maior assertividade do modelo.

Ainda dentre as informações levantadas nas entrevistas com os responsáveis pelo setor de extração, destaca-se o relato dos entrevistados no que se refere a falta de cana-de-açúcar para ser descarregada em determinados momentos e o excesso de carretas, formando filas no hilo, em outros momentos. De modo a evidenciar um desnivelamento entre os processos agrícola e industrial.

## 4.2. Modelagem do Processo

Essa subseção foi dividida em duas etapas, sendo: a) a construção do modelo conceitual, que aborda a seleção das variáveis para o modelo, além do fluxograma com o modelo que será criado; e b) a construção do modelo de simulação computacional, onde é elaborado o modelo no software de simulação computacional Promodel.

Destaca-se que a discussão e avaliação das variáveis que fazem parte do modelo, além das simplificações foram abordadas na subseção de mapeamento de processos, sendo utilizados apenas como *inputs* nessa subseção, tanto na modelagem conceitual, quanto na modelagem do sistema.

### 4.2.1. Construção do Modelo Conceitual

Para a construção do modelo conceitual, inicialmente foram levantadas as variáveis do processo a serem utilizadas no modelo, a partir das entrevistas, da observação do processo e do corpo teórico do trabalho. Posteriormente foi elaborado um fluxo que retrata o modelo

conceitual, o qual é apoiado por um quadro descritivo de cada etapa do modelo, que por sua vez foram validados pelo Gestor de Motomecanização e pelo Engenheiro de CTT.

#### 4.2.1.1. Seleção de variáveis

Como já visto, no Apêndice E é apresentado o mapeamento das variáveis de cada etapa do processo de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, incluindo o recebimento da matéria-prima e as variáveis industriais relacionadas à demanda de cana-de-açúcar, considerando a etapa de moagem da indústria.

Além do mapeamento das variáveis do sistema, destaca-se que a base para a seleção das variáveis também contemplou a subseção 4.1 e o referencial teórico que aborda sobre os processos e indicadores de desempenho das operações de CTT.

Dentre todas as variáveis mapeadas e considerando a necessidade de simplificação para construção do modelo, ao mesmo tempo que ele seja satisfatório para representar o sistema, considerou-se as seguintes variáveis para construção do modelo:

- a) Velocidade/ taxa de moagem da unidade industrial;
- b) Capacidade de produção das frentes de colheita própria, considerando estrutura de equipamentos e suas capacidades; TCH das áreas de colheita; tempos disponíveis dos equipamentos;
- c) Capacidade de produção das frentes de colheita dos fornecedores;
- d) Tempo de deslocamento entre as frentes de colheita e a unidade industrial, considerando a distância e a velocidade dos conjuntos vazio e carregado;
- e) Capacidade de transporte, considerando a estrutura de equipamentos, suas capacidades e a formação de conjuntos; além dos tempos disponíveis desses equipamentos;
- f) Tempo dentro da usina, considerando todas as etapas após a chegada da cana-de-açúcar na unidade industrial, inclusive com as lógicas envolvidas no recebimento da cana-de-açúcar;
- g) Impacto das variáveis climáticas nas operações de colheita da cana-de-açúcar.

Nesse ponto destaca-se que a capacidade de produção das frentes de colheita dos fornecedores, tanto denominados como esteira quanto como *pool*, e o índice de indisponibilidade climática, ainda não foram abordados nesse trabalho. Dessa forma são descritos nesse tópico para a construção do modelo conceitual.

No que se refere a capacidade de produção das frentes de colheita de fornecedores, vale ressaltar que são planejados e negociados a partir de contrato com os fornecedores. Destaca-se que a consolidação dos contratos gera um documento de entrada para o planejamento operacional que está apresentado na Tabela 21.

Nota-se que os fornecedores classificados como esteira apresentam uma entrega média na safra de 1.750 ton/dia ou 73 ton/h, já os fornecedores *pool*, ou seja, aqueles que o transporte é por conta da empresa estudada, apresentam uma entrega média na safra de 17.300 ton/dia ou 721 ton/h.

**Tabela 21:** Produção das frentes de colheita de fornecedores

Produção FC de Fornecedor									
Fornecedor	Unidade de Medida	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Média Safra
Fornecedor Esteira	ton/dia	1.640	1.450	1.450	250	1.421	2.340	3.290	1.750
Fornecedor Pool	ton/dia	16.050	16.050	16.050	18.050	18.050	18.050	18.050	17.300
Fornecedor Esteira	ton/h	68	60	60	10	59	98	137	73
Fornecedor Pool	ton/h	669	669	669	752	752	752	752	721

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

No que se refere a indisponibilidade climática, destaca-se que é o tempo que as operações de CTT são limitadas em virtude da chuva. Nesse ponto, vale ressaltar que a equipe agrônômica da empresa, a partir de técnicas e históricos dos índices pluviométricos, fazem a estimativa para a safra, a qual é apresentada na Tabela 22. Como esperado, observa-se que o índice de indisponibilidade climática é variável entre os meses, apresentando uma média de 10% para a Safra 21/22.

**Tabela 22:** Indisponibilidade climática

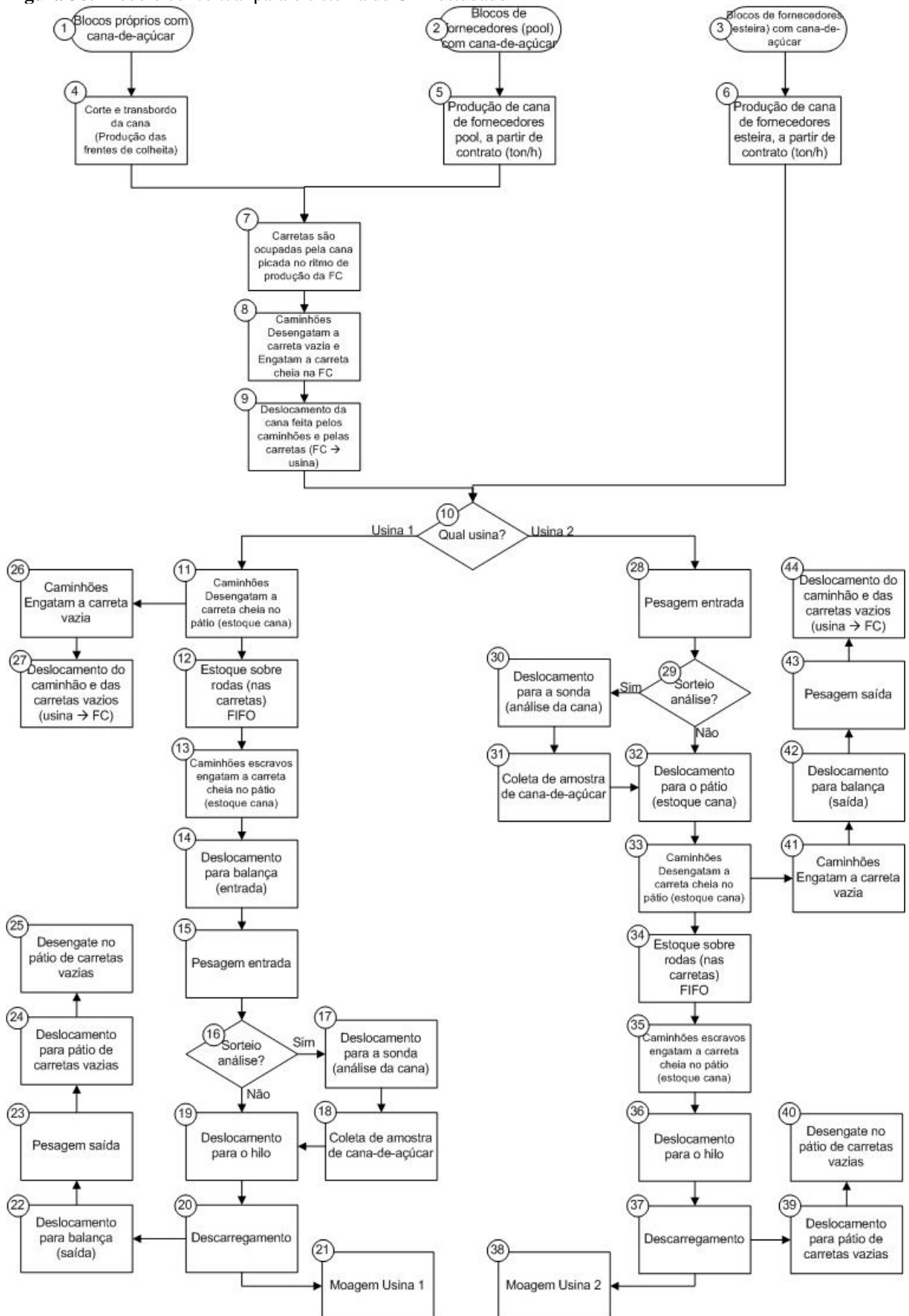
Indisponibilidade Climática (%)							
Safra	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
10%	15%	12%	5%	3%	3%	14%	18%

Fonte: Autor com dados fornecidos pela empresa pesquisada

#### 4.2.1.2. Modelo conceitual

O modelo conceitual é formado desde as frentes de colheita próprias e de fornecedores, passando pela operação de transporte da cana-de-açúcar, assim como as operações de recebimento, relacionadas ao bate e volta, à pesagem, à coleta de amostra no PCTS e ao descarregamento, além do ritmo de moagem industrial. Nesse ponto, destaca-se que a Figura 36, que apresenta o fluxograma do modelo, e o Quadro 8 e o Quadro 9 com a descrição das etapas do modelo, são autoexplicativas e suficientes para descreverem o modelo conceitual.

Figura 36: Modelo conceitual para o sistema de CTT estudado



Fonte: Próprio autor

**Quadro 8:** Descrição das etapas do modelo conceitual (continua)

ID	Etapa	Descrição e Variáveis
1	Blocos próprios com cana-de-açúcar	Composto por 5 Frentes de Colheita, que representam em média 14.450 ton/dia (43%). Em que o corte, o transbordo e o transporte são com equipamentos próprios.
2	Blocos de fornecedores (pool) com cana-de-açúcar	Frentes de Fornecedores, a partir de contrato, que representam em média 17.300 ton/dia (52%). Em que o corte e o transbordo é responsabilidade do fornecedor, mas o transporte é feito com equipamento próprio.
3	Blocos de fornecedores (esteira) com cana-de-açúcar	Frentes de Fornecedores, a partir de contrato, que representam em média 1750 ton/dia (5%). Em que o corte o transbordo e o transporte é responsabilidade do fornecedor.
4	Corte e transbordo da cana (Produção das frentes de colheita)	Produção de cana das FC próprias, resultado dado por: Dist. normal com média de 654 ton/h e desvio padrão de 70 ton/h, baseado na colheitabilidade: Horas de elevador, dada por: Dist. Normal com média 61,3% e desvio padrão de 6% Velocidade média de corte, dado por: Dist. triangular min 4 km/h, moda 4,7 Km/h e máx 5 Km/h Densidade do canavial: 81,8 ton/ha Indisponibilidade climática: 10% (para simular horizontes de tempo maiores)
5	Produção de cana de fornecedores pool, a partir de contrato (ton/h)	Produção de cana dos fornecedores (contrato), dado por: Dist. Normal com média de 721 ton/h e desvio padrão de 77 ton/h.
6	Produção de cana de fornecedores esteira, a partir de contrato (ton/h)	Produção de cana dos fornecedores (contrato), dado por: Dist. Normal com média de 73 ton/h e desvio padrão de 7,8 ton/h.
7	Carretas são ocupadas pela cana picada no ritmo de produção da FC	Tempo de carregamento, dado por: Dist. Normal 9,2 min e desvio padrão de 1,1 min. Produção de cana da FC: 1375 ton/h Capacidade por unidade de carga, dado por: Dist. Normal com média de 34,9 ton. e desvio padrão de 3,1 ton. Composição da estrutura de transporte: 13% treminhado e 87% rodotrem
8	Caminhões Desengatam a carreta vazia e Engatam a carreta cheia na FC	Tempo de palhada: 22 min Tempo de desengate na FC: 1,9 min Tempo de engate na FC: 4,7 min
9	Deslocamento da cana feita pelos caminhões e pelas carretas (FC à usina)	Calculado a partir da velocidade média carregado e a distância das frentes de colheita, sendo que as distâncias dependem da configuração das frentes de colheita com operação. Velocidade média carregado: 29,6 Km/h; Raio médio: 21,0 km.
10	Qual usina?	Baseada no sequenciamento dos blocos que serão colhidos e sua localização, sendo definidas por frente de colheita em cada configuração, considerando a capacidade industrial.
11	Caminhões Desengatam a carreta cheia no pátio (estoque cana)	Tempo de desengate no pátio: 1,9 min
12	Estoque sobre rodas (nas carretas)	Estoque de cana-de-açúcar armazenada nos conjuntos de implementos rodoviários no pátio. A saída do estoque é determinada pela lógica FIFO e a capacidade é ilimitada (considerando que tem espaço suficiente para todas as carretas do sistema)
13	Caminhões escravos engatam a carreta cheia no pátio (estoque cana)	Tempo de engate da carreta cheia: 2,3 min
14	Deslocamento para balança (entrada)	Deslocamento Pátio Bate e Volta --> Balança de 413 metros a uma velocidade média de 15 km/h
15	Pesagem entrada	Operação de pesagem na entrada com duração dada por: Dist. Normal com média de 2,7 min e desvio padrão de 0,3 min
16	Sorteio análise?	Decisão se a carreta deve passar pela sonda (PCTS), determinado pela tabela da Consecana. Sendo a taxa dada por: Dist. Triangular com min - 31,7%; moda - 39,9%; e máx - 55,8%.
17	Deslocamento para a sonda (análise da cana)	Deslocamento Balança --> Sonda de 148 metros a uma velocidade média de 15 km/h
18	Coleta de amostra de cana-de-açúcar	Coleta de amostra de cada carreta (unidade de carga) dada por: Conjuntos com 50% 1 análise e 50% 2 análises: Dist. Normal com média de 3,2 min e desvio padrão de 0,2 min. Tempo médio por conjunto de 4,6 min.
19	Deslocamento para o hilo	Deslocamento Sonda --> Hilo: 541 metros Deslocamento Balança --> Hilo: 689 metros Velocidade média: 15 km/h

Fonte: Próprio autor

**Quadro 9:** Descrição das etapas do modelo conceitual (conclusão)

20	Descarregamento	Descarregamento da cana no hilo com duração média por unidade de carga dada por: Dist. Normal com média de 4,7 min e desvio padrão de 0,3 min, sendo que 13% das carretas tem 3 unidades e 87% tem 2 unidades.
21	Moagem Usina 1	Ritmo de moagem da usina 1, dado por: Dist. Normal com média de 875 ton/h e desvio padrão de 51 ton/h
22	Deslocamento para balança (saida)	Deslocamento Hilo --> Balança de 412 metros a uma velocidade média de 15 km/h
23	Pesagem saída	Operação de pesagem na saída com duração dada por: Dist. Normal com média de 1,3 min e desvio padrão de 0,5 min
24	Deslocamento para pátio de carretas vazias	Deslocamento Balança --> Pátio Bate e Volta de 413 metros a uma velocidade média de 15 km/h
25	Desengate no pátio de carretas vazias	Tempo de desengate da carreta vazia: 1,9 min
26	Caminhões Engatam a carreta vazia	Tempo de engate da carreta vazia: 4,7 min
27	Deslocamento do caminhão e das carretas vazias (usina à FC)	Calculado a partir da velocidade média vazio e a distância das frentes de colheita, sendo que as distâncias dependem da configuração das frentes de colheita com operação. Velocidade média vazio: 32,9 Km/h; Raio médio: 20,6 km.
28	Pesagem entrada	Operação de pesagem na entrada com duração dada por: Dist. Normal com média de 2,7 min e desvio padrão de 0,3 min
29	Sorteio análise?	Decisão se a carreta deve passar pela sonda (PCTS), determinado pela tabela da Consecana. Sendo a taxa dada por: Dist. Triangular com min - 31,4%; moda - 41,8%; e máx - 60,7%.
30	Deslocamento para a sonda (análise da cana)	Deslocamento Balança --> Sonda de 308 metros a uma velocidade média de 15 km/h
31	Coleta de amostra de cana-de-açúcar	Coleta de amostra de cada carreta (unidade de carga) dada por: Conjuntos com 50% 1 análise e 50% 2 análises: Dist. Normal com média de 3,2 min e desvio padrão de 0,2 min. Tempo médio por conjunto de 4,6 min.
32	Deslocamento para o pátio (estoque cana)	Deslocamento Sonda --> Pátio Bate e Volta: 223 metros Deslocamento Balança --> Pátio Bate e Volta: 531 metros Velocidade média: 15 km/h
33	Caminhões Desengatam a carreta cheia no pátio (estoque cana)	Tempo de desengate no pátio: 1,9 min
34	Estoque sobre rodas (nas carretas)	Estoque de cana-de-açúcar armazenada nos conjuntos de implementos rodoviários no pátio. A saída do estoque é determinada pela lógica FIFO e a capacidade é ilimitada (considerando que tem espaço suficiente para todas as carretas do sistema)
35	Caminhões escravos engatam a carreta cheia no pátio (estoque cana)	Tempo de engate da carreta cheia: 2,3 min
36	Deslocamento para o hilo	Deslocamento Pátio Bate e Volta --> Hilo de 157 metros a uma velocidade média de 15 km/h
37	Descarregamento	Descarregamento da cana no hilo com duração média por unidade de carga dada por: Dist. Normal com média de 4,7 min e desvio padrão de 0,3 min, sendo que 13% das carretas tem 3 unidades e 87% tem 2 unidades.
38	Moagem Usina 2	Ritmo de moagem da usina 2, dado por: Dist. Normal com média de 521 ton/h e desvio padrão de 36 ton/h
39	Deslocamento para pátio de carretas vazias	Deslocamento Hilo --> Pátio Bate e Volta de 86 metros a uma velocidade média de 15 km/h
40	Desengate no pátio de carretas vazias	Tempo de desengate da carreta vazia: 1,9 min
41	Caminhões Engatam a carreta vazia	Tempo de engate da carreta vazia: 4,7 min
42	Deslocamento para balança (saida)	Deslocamento Pátio Bate e Volta --> Balança de 709 metros a uma velocidade média de 15 km/h
43	Pesagem saída	Operação de pesagem na saída com duração dada por: Dist. Normal com média de 1,3 min e desvio padrão de 0,5 min
44	Deslocamento do caminhão e das carretas vazias (usina à FC)	Calculado a partir da velocidade média vazio e a distância das frentes de colheita, sendo que as distâncias dependem da configuração das frentes de colheita com operação. Velocidade média vazio: 32,9 Km/h; Raio médio: 21,8 km

Fonte: Próprio autor

Uma das lacunas identificadas nos estudos de modelagem e simulação dos processos de CTT é a falta de flexibilidade para um mesmo modelo simular o sistema em diferentes horizontes de tempo. O Quadro 10 apresenta as etapas que precisam ser configuradas para a alteração do horizonte de tempo de simulação.

**Quadro 10:** Classificação das etapas do modelo para simulação em diferentes horizontes de tempo

Classe para horizonte de simulação	Etapas	Percentual do modelo
Fixo	8; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 22; 23; 24; 25; 26; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 39; 40; 41; 42 e 43	70%
Ajuste sazonal	1; 2; 3; 5; 6; 7; 21 e 38	18%
Ajuste sazonal e por FC	4; 9; 10; 27 e 44	11%

Fonte: Próprio autor

As etapas que se mantêm em todos os horizontes de tempo representam 70% do modelo, sendo que os outros 30% são segmentadas entre as etapas que precisam de ajuste sazonal para adequar os parâmetros ao período de simulação, e as etapas que precisam de ajuste sazonal e por frente de colheita, representando, respectivamente, 18% e 11% das etapas do modelo. Ajustes sazonais necessitam ser feitas nas etapas em que os parâmetros variam ao longo da safra.

#### 4.2.2. Construção do Modelo de Simulação Computacional

A construção do modelo de simulação computacional no software Promodel, foi baseada nas informações levantadas no modelo conceitual. No Promodel, em seu manual do usuário, o modelo é constituído dos seguintes elementos básicos:

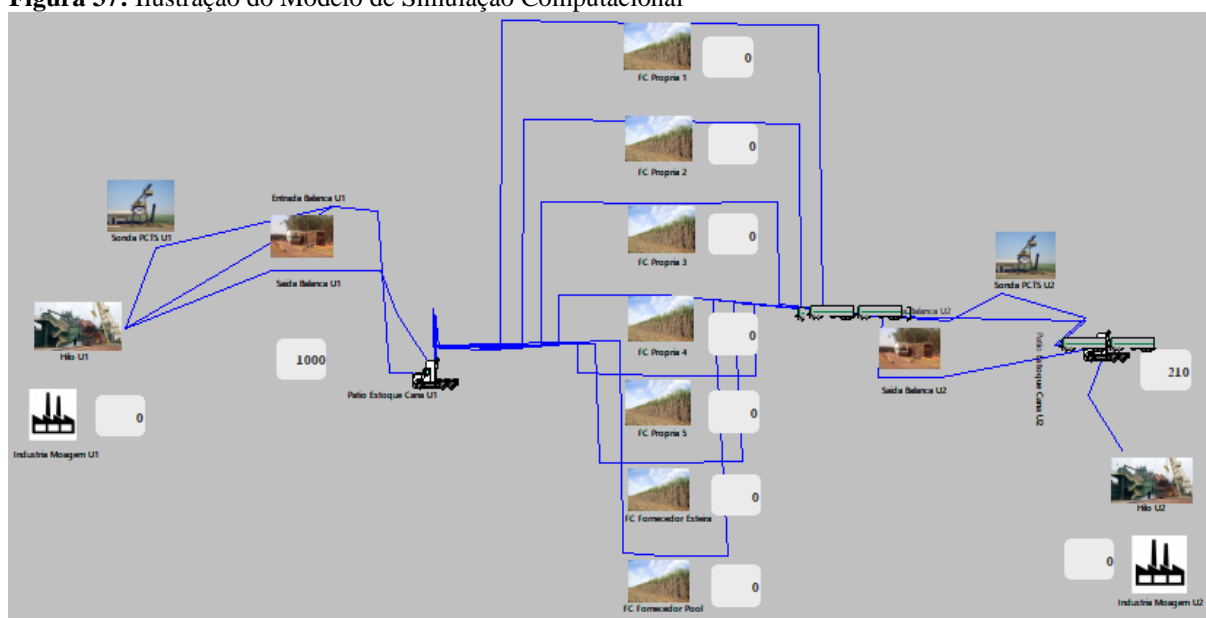
- a) Locais: representam os locais em que os processos são realizados, como máquinas, equipamentos e armazéns.
- b) Entidades: são os elementos processados, transformados e transportados no modelo, como matérias-primas, insumos e componentes.
- c) Recursos: são elementos utilizados para transportar, movimentar e auxiliar os processos de transformação das entidades nos locais como paleteiras, operários e dispositivos.
- d) Caminhos: são as rotas percorridas pelos recursos ao movimentar as entidades entre os locais.

- e) Variáveis: são criadas para dar funcionalidade ao modelo e/ou coletar dados do modelo.
- f) Chegadas: definem os locais em que as variáveis chegam ou são criadas e as taxas de chegada e quantidades.
- g) Atributos: são elementos que servem para dar características específicas às entidades, permitindo diferenciá-las e acompanhar o processamento delas ao longo da simulação.

Alguns ajustes foram necessários para adequação das entradas na programação e as informações faltantes foram levantadas com entrevistas e validação com o Gestor de Motomecanização e com o Engenheiro de CTT.

O modelo de simulação computacional no software Promodel é ilustrado na Figura 37 e pode ter a simulação acompanhada no vídeo presente no Apêndice A. Nessa subseção são descritas cada parte integrante do modelo, considerando os principais módulos e funcionalidades do Promodel, a citar: locais, entidades, chegadas, processamento, recursos e redes de caminho. Nesse ponto, destaca-se que devido à extensão do modelo essa subseção é complementada pelo Apêndice H, em que é aprofundada as lógicas de programação e as parametrizações.

**Figura 37:** Ilustração do Modelo de Simulação Computacional



Fonte: Promodel

Conforme pode ser visto na Figura 37, os locais parametrizados no modelo foram: a) as frentes de colheita, sendo cinco próprias e duas de fornecedores, as quais representam o conjunto de frentes de fornecedores *pool* e esteira; b) o pátio estoque de cana da usina 1 (U1) e da usina 2 (U2); c) o pátio de carretas vazias da U1 e da U2; d) a entrada da balança da U1 e da

U2; e) a saída da balança da U1 e da U2; f) a sonda PCTS da U1 e da U2; g) o hilo da U1 e da U2; h) a indústria moagem da U1 e da U2.

Além dos locais identificados na ilustração, foram necessários outros locais para que as funcionalidades do sistema fossem realizadas pelo modelo, a citar: a) locais de fila na entrada e saída das balanças, nas sondas PCTS e nos hilos das usinas, para garantir o monitoramento das filas nessas etapas do processo; b) locais auxiliares nas frentes de colheita e nos hilos, para movimentação no fluxo contrário ao transporte de cana; c) locais para consolidação das cargas nas frentes de colheita; d) local auxiliar para o modelo iniciar com a configuração de operação, ou seja, com recursos nas frentes de colheita.

Nesse ponto, destaca-se que essa adequação das funcionalidades do modelo pode ser melhor explicada pelas entidades, de modo que o modelo apresenta uma entidade principal, facilmente reconhecida pelo sistema real que é a cana-de-açúcar (“eCanadeAçúcar”), além de outras três entidades, que são: a) “eConsolidadoCarreta”, responsável por consolidar a quantidade de cana-de-açúcar nos conjuntos carretas, considerando a variação de capacidade por unidade de carga e a quantidade de unidades de carga, sendo três se treminhado e duas se rodotrem; b) “eMovimentação”, responsável por fazer o retorno dos equipamentos no fluxo contrário ao da cana-de-açúcar; e c) “eAux” que é responsável por manter a configuração do início do sistema, ou seja, os equipamentos distribuídos entre as indústrias e as frentes de colheita.

Dentre essas entidades, duas apresentam taxa de chegada, sendo a “eAux” com uma ocorrência no início do modelo em cada frente de colheita e nos pátios de carreta vazia das duas usinas, e a “eCanadeAçúcar” que apresenta chegadas periódicas em cada frente de colheita, sendo as frentes de colheita própria e a frente de fornecedor esteira a cada 15 minutos e a frente de fornecedor *pool* a cada 3 minutos, pois foram consideradas as grandezas das chegadas.

Destaca-se que essas chegadas foram calculadas por uma simulação de Monte Carlo da fórmula de colheitabilidade, que considera a velocidade de corte, as horas produtivas e a densidade do canavial (TCH) referente a cada frente de colheita, como está apresentado na Tabela 23.

**Tabela 23:** *Outputs* Taxa de Produção Frentes de Colheita - Simulação de Monte Carlo

Frentes de Colheita	Taxa de produção de cana			
	Distribuição	Frequência	Parâmetros	
			Média	Desvio-padrão
FC Própria 1	Normal	15 min	32	4
FC Própria 2	Normal	15 min	37	4
FC Própria 3	Normal	15 min	32	4
FC Própria 4	Normal	15 min	32	3
FC Própria 5	Normal	15 min	22	2
FC Próprias Total	Normal		154	8
Frentes de Forn. - Pool	Normal	3 min	36	4
Frentes de Forn. - Esteira	Normal	15 min	18	2
Frentes de Colheita Total	Normal		352	20

Fonte: Próprio autor

No que se refere aos recursos, nesse modelo que retrata o sistema de CTT da cana-de-açúcar são utilizados quatro tipos, a citar: 49 caminhões de linha, que são responsáveis pelo transporte entre as frentes de colheita e o pátio de estoque de cana; 13 caminhões bate e volta da usina 1 e 3 caminhões bate e volta da usina 2, que são responsáveis pelo transporte das carretas do pátio de estoque de cana para o hilo; e os 111 conjuntos carretas, que são responsáveis pelo transporte e acondicionamento da cana de açúcar das frentes de colheita até o hilo.

Ainda para garantir o fluxo do modelo de simulação foi definida uma única rede de caminho, que passa por todos os locais do modelo, das frentes de colheita até a indústria. Destaca-se que essa rede de caminho apresenta 27 caminhos com fluxos uni e bidirecionais, de acordo com a característica da movimentação; 44 interfaces com os locais; 34 mapeamentos; e 18 nós.

No que tange o módulo de processamento do modelo, pode-se dividi-lo em três grandes blocos o fluxo de matéria prima (cana-de-açúcar), o fluxo de retorno dos caminhões e carretas para as frentes de colheita e a configuração do início do sistema.

O fluxo de matéria-prima é responsável pelos processamentos das frentes de colheita, do transporte da cana-de-açúcar para as usinas, das etapas de recebimento da cana-de-açúcar e do descarregamento na indústria. Para isso, de forma genérica, tem-se os seguintes elementos das duas usinas:

- a) Frentes de colheita: é dividida em duas etapas, sendo a primeira relacionada a entidade “eCanadeAçúcar”, que define qual o tipo de carreta a ser carregada; verifica se há espaço na carreta; verifica se a carreta já está cheia

- e cria a entidade “eConsolidadoCarreta”. Já essa segunda etapa é responsável por solicitar os recursos; aguardar o tempo de engate do caminhão no conjunto carretas; e decidir para qual usina vai enviar a carga. Destaca-se que essa lógica se repete para todas as frentes de colheita, exceto a de fornecedor esteira, que é simplificada por não ser considerado recursos;
- b) Pátio estoque cana: é onde ocorrem as operações de desengate e liberação do caminhão de linha; engate do caminhão bate e volta. Destaca-se que o pátio das usinas se diferencia pela lógica de roteamento, dado que na U1 o pátio é antes da balança e na U2 é antes do hilo;
  - c) Entrada da balança: apresenta o tempo de pesagem das carretas na entrada e o roteamento pode ser para a sonda PCTS ou o hilo na U1, e para a sonda PCTS ou para o pátio estoque cana na U2. Destaca-se que antes da entrada da balança existe um local com fila para reproduzir o sistema real;
  - d) Sonda PCTS: apresenta o tempo de processamento para coleta das amostras. Como a quantidade é realizada por sorteio é realizada a multiplicação de um da quantidade sorteada na distribuição pelo tempo padrão da coleta. Ressalta-se que a sonda PCTS também apresenta um local com fila;
  - e) Hilo/Indústria: apresenta o tempo de descarregamento com uma lógica parecida à análise da sonda PCTS, seguido pela liberação das entidades; e criação da “eMovimentação” para garantir o retorno dos recursos e iniciar no fluxo de retorno. Destaca-se que o hilo também apresenta fila e a indústria atua somente com o ritmo de moagem, como uma restrição do sistema.

Já o fluxo de retorno dos caminhões e carretas para as frentes de colheita é responsável por fazer com que os caminhões e carretas que descarregam a cana na indústria volte, a partir de uma lógica, para as frentes de colheita. Para isso. De forma genérica, tem-se os seguintes elementos das duas usinas:

- a) Hilo: garante que os recursos caminhão bate e volta e o conjunto carretas permaneçam juntos, a partir da solicitação da entidade “eMovimentação”, para seguir o fluxo de retorno para as frentes de colheita. O roteamento é para a saída da balança na U1 e para o pátio carretas vazias na U2;
- b) Saída da balança: apresenta o tempo de pesagem das carretas na saída, e na U2 também é realizada a decisão de qual frente de colheita retornar. O roteamento é para o pátio de carretas vazias na U1, e para as frentes de

colheita na U2. Destaca-se que antes da saída da balança existe um local com fila para reproduzir o sistema real;

- c) Pátio carreta vazia: é onde ocorrem as operações de desengate e liberação do caminhão bate e volta; engate do caminhão de linha; e no caso da U1 decisão de qual frente de colheita retornar. Assim como o pátio estoque de cana, os pátios de carretas vazias se diferenciam pela lógica de roteamento, dado que na U1 vai para as frentes de colheita e na U2 para a saída da balança;
- d) Frentes de colheita: é onde acontece a liberação da entidade auxiliar “eMovimentação” e os recursos caminhão de linha e conjunto carretas ficam disponíveis para entrarem no fluxo da matéria-prima.

Por fim, o bloco para configuração do início do sistema é responsável por fazer com que os caminhões de linha e as carretas iniciem o modelo de simulação nos locais de operação, ou seja, nas frentes de colheita e nos pátios das duas usinas. Nesse ponto, destaca-se que esse bloco só ocorre no início do modelo e envolve os seguintes elementos:

- a) Frentes de colheita: solicita uma quantidade de recursos caminhão de linha e conjunto carretas para as frentes de colheita no início da simulação;
- b) Pátio de carreta vazia: solicita uma quantidade de recursos caminhão de linha e conjunto carretas para os pátios de carretas vazias na usina 1 e na usina 2 no início da simulação;

Nesse ponto destaca-se que além desses elementos principais de configuração do Promodel, também foram utilizados outros elementos para suportar a programação do modelo, tais como: atributos, variáveis, distribuições do usuário; paradas e tempo de aquecimento.

No que se refere aos atributos, tem-se que foram utilizados para: a) apoiar as lógicas de decisão para roteamentos, tais como o sorteio para a sonda PCTS, decisão de ida para as frentes de colheita; b) definir o tipo de carreta, se treminhado ou rodotrem; c) consolidar o peso de cana que será usado em cada carga; d) apoiar o cálculo dos indicadores de tempo, relacionados a medição de ciclos, *leadtime* e filas.

As variáveis tiveram sua aplicação para complementar a utilização dos atributos, de modo a medir o desempenho do sistema. Dessa forma, além da medição de indicadores, contabilização do peso das carretas e apoio aos sorteios e decisões para roteamento, as variáveis também foram utilizadas para verificação do modelo, sendo aplicadas para contabilizar a presença dos recursos (caminhões e carretas) nos locais, além de outras necessárias para a verificação e validação do modelo.

As distribuições do usuário também foram utilizadas para apoiar a construção do modelo. Nesse ponto, destaca-se que essa funcionalidade foi usada para os sorteios e decisões, tais como: o sorteio para análise na sonda PCTS; o tipo de carreta; a distribuição de cana pelas usinas; e o retorno dos recursos para as frentes de colheita.

No que tange as paradas, vale ressaltar que foram inseridas no modelo: a) as paradas por manutenção dos recursos caminhão de linha, caminhão bate e volta e conjunto carretas; b) as paradas por abastecimento dos caminhões; c) as paradas das frentes de colheita por indisponibilidade climática; d) as paradas das frentes de colheita por mudança de frente.

Nesse ponto, tem-se dois aspectos relevantes: a) o modelo conceitual apresentou as paradas como índices de indisponibilidade dos locais ou recursos, no entanto para inseri-los no Promodel foi necessário transformá-los em dados de frequência e tempo de parada, então foram calculados o MTBF e o MTTR para cada classe de recurso e paradas dos locais; b) as paradas de recursos devem entrar para qualquer horizonte de tempo de simulação, mas as paradas dos locais acontecem em um horizonte de tempo maior, sendo necessárias ativá-las somente para períodos maiores que três dias para as paradas de mudança de frente e uma semana para paradas climáticas.

Ainda, no que se refere às configurações para simulação, vale ressaltar que foi utilizado 48 horas para o tempo de aquecimento, com o objetivo de normalizar o funcionamento do modelo e adequá-lo ao comportamento do sistema real, possibilitando a simulação a partir de momentos em que o sistema já está operando.

Por fim, reitera-se que as configurações do modelo no Promodel podem ser consultadas no Apêndice H.

### **4.3. Teste e Validação do Modelo**

Essa subseção foi dividida em duas etapas, sendo: a) a verificação do modelo, a qual tem como objetivo garantir que o modelo funcione como foi conceitualmente desenvolvido; e b) validação do modelo, que tem como objetivo garantir que o modelo tenha o comportamento similar ao do sistema real, ou seja, que represente o sistema real (BATEMAN *et al.* 2013).

Destaca-se que essa subseção tem como objetivo demonstrar como foram feitos os testes para verificação e validação do modelo, assim como demonstrar os principais parâmetros que comprovam que o modelo desenvolvido tem o comportamento do modelo conceitual e que é representativo ao sistema de CTT estudado.

### 4.3.1. Verificação do Modelo

No que tange ao processo de verificação do modelo, vale ressaltar que aconteceu de forma iterativa com sua construção, dado momento que já se tinha uma primeira versão construída. Sendo assim, fica evidente que o modelo não teve suas funcionalidades cumpridas na primeira versão, e a etapa de verificação foi fundamental para correção dos desvios e consolidação da versão final do modelo.

Nesse ponto, considerando que uma abordagem profunda de todos os desvios corrigidos no processo de construção do modelo traria um esforço muito grande e não agregaria valor ao estudo, mas que essa etapa de correção é comum no processo de construção dos modelos de simulação computacional, seguem apenas alguns desvios encontrados para ilustrar esta etapa:

- a) os caminhões de linha não estavam voltando às frentes de colheita, de modo que as primeiras horas da simulação representavam o fluxo de cana real, porém após 12 horas o sistema ficava comprometido;
- b) os caminhões não estavam retornando para as frentes de colheita de forma a atender a demanda de cana, fazendo com que algumas frentes ficassem com o recurso ocioso, enquanto outras não conseguiam escoar a cana;
- c) as frentes de colheita de fornecedor esteira, que não utiliza os recursos para transporte, pois é feito pelo próprio fornecedor, não estavam conseguindo entregar a cana-de-açúcar produzida.

Diante disso, o que vale destacar são as ferramentas e processos utilizados para garantir a verificação do modelo e correção quando necessário, as quais, no momento da construção do modelo, foram: a) avaliação da animação da simulação; b) utilização da função *Debug*, que inicia o depurador para passar pela lógica uma declaração de cada vez, possibilitando a identificação do que acontece no ponto de avaliação; c) utilização de matrizes e variáveis para ver o comportamento em locais durante a simulação.

Destaca-se que essas ferramentas possibilitaram a construção de um modelo, aparentemente, aderente ao modelo conceitual. No entanto, para garantir a aderência ao modelo desejado foram realizadas mais duas práticas, o monitoramento dos fluxos no processo e a criação de indicadores para avaliar o desempenho do modelo.

No que tange ao monitoramento dos fluxos no processo, salienta-se que foram avaliados os seguintes fluxos com suas funcionalidades:

- a) Fluxo da matéria-prima (cana-de-açúcar): a cana-de-açúcar chega na frente de colheita (“eCanadeAçúcar\_ton); consolida o volume na carreta de acordo

com a quantidade de unidades de carga; caminhão engata na carreta; tem a decisão de qual usina ir; transporta a cana até o pátio da usina; desengata a carreta; o caminhão bate e volta engata na carreta cheia; passa por todas as etapas de recebimento e descarrega no hilo;

- b) Fluxo de retorno para as frentes de colheita: pega a entidade para movimentação no hilo (“eMovimentação”); vai para a saída da balança; desloca até o pátio de carretas vazias; o caminhão bate e volta desengata da carreta; o caminhão de linha engata a carreta vazia; tem a decisão de qual frente de colheita voltar; desloca até a frente de colheita e libera a entidade auxiliar;
- c) Fluxo para configuração inicial do sistema: a entidade “eAux” solicita recursos nas frentes de colheita para garantir que o início da simulação tenha a configuração do sistema em funcionamento.

Já no que se refere à criação de indicadores para verificação do modelo, destaca-se que foram avaliados os seguintes indicadores: a) chegada de cana-de-açúcar nas frentes de colheita; b) tempo das operações nos locais de recebimento de cana; c) volume de moagem das usinas 1 e 2; d) utilização dos recursos; e e) filas, ciclos e *leadtime*, que demonstram o fluxo de cana com os recursos.

No que se refere às chegadas de cana, é possível verificar na Tabela 24 que a média dos dias simulados pela frequência programada no modelo faz parte da distribuição inserida no modelo de simulação do Promodel.

**Tabela 24:** Verificação da taxa de chegada de cana

Cenário	Nome Local	Total de Entradas	Tempo Programado (Hr)	Frequência	Taxa de entrada (ton.)
Validacao	FC Propria 1	15.018	120	15 min	31,3
Validacao	FC Propria 2	17.480	120	15 min	36,4
Validacao	FC Propria 3	15.215	120	15 min	31,7
Validacao	FC Propria 4	15.170	120	15 min	31,6
Validacao	FC Propria 5	10.336	120	15 min	21,5
Validacao	FC Fornecedor Esteira	8.475	120	15 min	17,7
Validacao	FC Fornecedor Pool	85.083	120	3 min	35,5

Fonte: Próprio autor

Sobre o tempo das operações de recebimento, nota-se na Figura 38 que os tempos médios da entrada e saída da balança e da sonda PCTS, tanto na Indústria 1 quanto na Indústria 2, fazem parte da distribuição de entrada na lógica do Promodel.

**Figura 38:** Verificação das operações de recebimento

Cenário	Nome	Tempo Médio no Local (Min)
Validacao	Entrada Balanca U1	2,64
Validacao	Saida Balanca U1	1,26
Validacao	Sonda PCTS U1	4,72
Validacao	Entrada Balanca U2	2,64
Validacao	Saida Balanca U2	1,31
Validacao	Sonda PCTS U2	4,74

Fonte: Relatório Promodel – *Output Viewer*

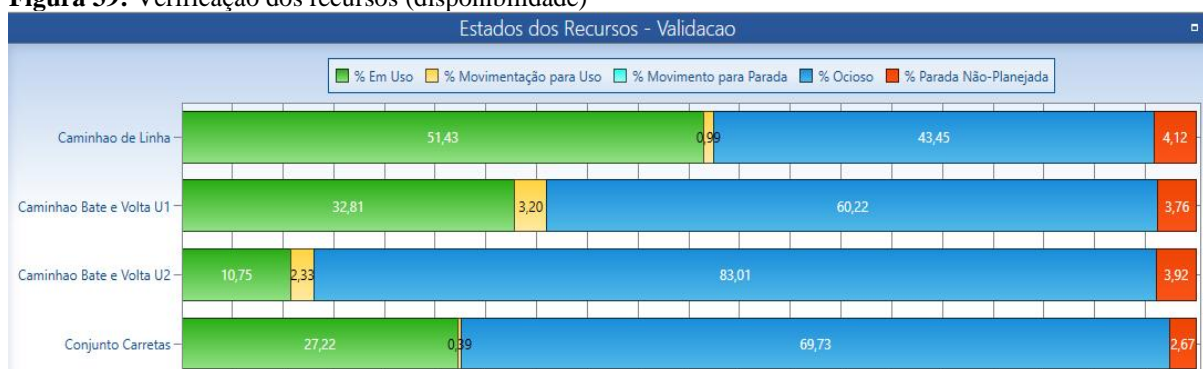
Na Tabela 25 é possível verificar que a cana-de-açúcar está chegando na moagem e que o volume médio diário de moagem na Indústria 1 e na Indústria 2 são próximas as capacidades de cada usina e da quantidade de cana-de-açúcar cortada no dia.

**Tabela 25:** Verificação moagem

Cenário	Nome Local	Total de Entradas	Tempo Programado (Hr)	Volume médio por carreta (ton.)	Frequência	Taxa de entrada (ton.)
Validacao	Industria Moagem U1	1.495	120	73,5	1 dia	21.977
Validacao	Industria Moagem U2	748	120	73,5	1 dia	10.996

Fonte: Próprio autor

No que tange à utilização dos recursos, a Figura 39 demonstra que todos os recursos estão sendo utilizados, e que o percentual de paradas não planejadas reflete o que foi parametrizado no modelo de simulação. Além disso, a Figura 40 apresenta uma visão de verificação para a quantidade de recursos nas frentes de colheita e nas usinas.

**Figura 39:** Verificação dos recursos (disponibilidade)

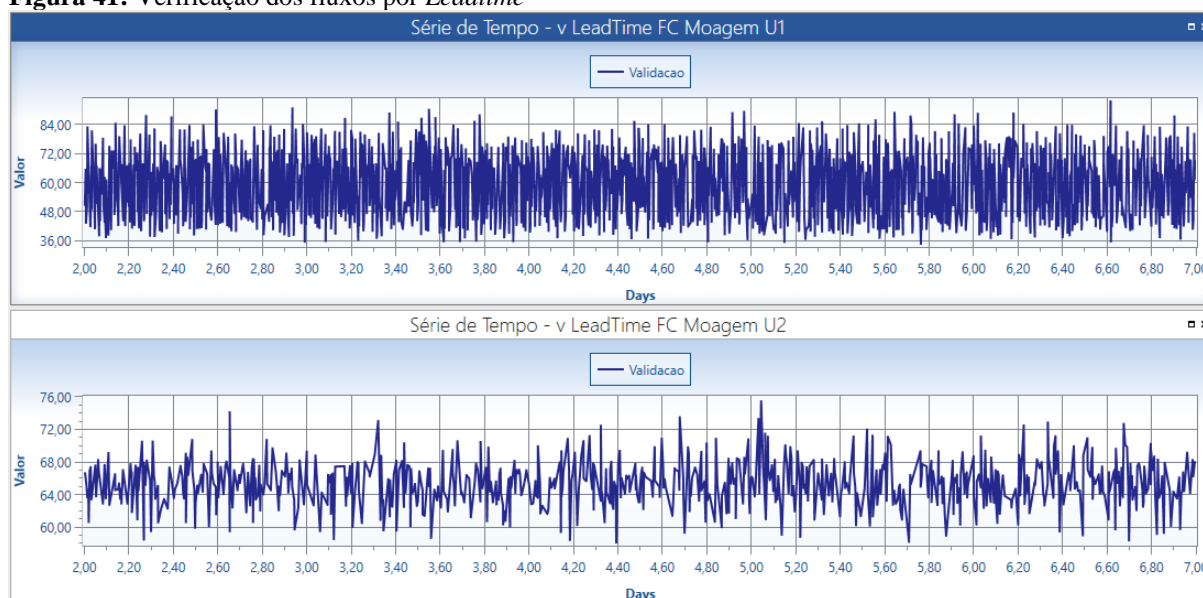
Fonte: Relatório Promodel – *Output Viewer*

**Figura 40:** Verificação dos recursos (quantidade)

Nome	Total de Mudanças
vCaminhao de Linha na U1	3.669,00
vCaminhao de Linha na U2	800,00
vCarreta Local FC1	417,00
vCarreta Local FC2	478,00
vCarreta Local FC3	413,00
vCarreta Local FC4	408,00
vCarreta Local FC5	284,00
vCarreta Local FCPool	2.353,00
vCarreta Local FCEsteira	239,00
vRetornoPool	787,00

Fonte: Relatório Promodel – *Output Viewer*

Ainda os ciclos, filas e *leadtimes* são bons indicadores para identificar que as etapas do processo estão sendo cumpridas conforme construído no modelo conceitual. Para exemplificar um desses indicadores, a Figura 41 demonstra o *leadtime* do processo de entrega de cana-de-açúcar, que calcula o tempo desde a colheita até o descarregamento nas indústrias.

**Figura 41:** Verificação dos fluxos por *Leadtime*

Fonte: Relatório Promodel – *Output Viewer*

Por fim, vale destacar que os elementos avaliados são suficientes para garantir que o modelo de simulação computacional construído no software Promodel é aderente ao modelo conceitual que foi planejado, fazendo com que a etapa de verificação seja concluída. Diante

disso, o próximo tópico é responsável pela validação do modelo, ou seja, avaliação se o modelo tem representatividade do sistema real.

#### 4.3.2. Validação do Modelo

Com a etapa de verificação concluída foi confirmado que o modelo está apresentando o comportamento que foi programado. Nesse ponto, a etapa de validação deve garantir que o modelo está representando o sistema real.

Para isso, conforme descrito na seção de análise de dados do capítulo três, foram realizadas simulações com as configurações de cinco dias de safra, e realizado o comparativo entre os resultados da simulação e os valores reais das duas pontas do sistema, ou seja, as produções das frentes de colheita e a moagem das indústrias. Nesse ponto, vale destacar que a escolha dos dias foi feita de forma aleatória pelo Engenheiro de CTT.

Vale reiterar que a avaliação dessas variáveis garante o processo de validação para as três etapas do sistema: a produção das frentes de colheita; o transporte da cana-de-açúcar; e o ritmo de moagem das usinas.

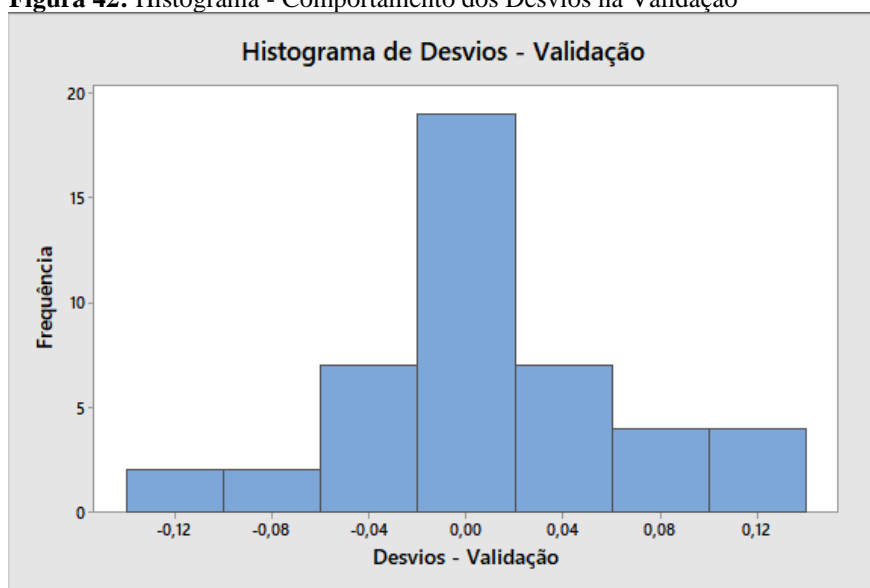
A Tabela 26 apresenta o comparativo dos valores reais com os valores simulados pelo modelo de simulação computacional desenvolvido no Promodel, considerando a moagem de cada usina e a produção de cada frente de colheita nos dias selecionados.

**Tabela 26:** Validação do Modelo

Variável	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5		
	Real	Simulado	Desvio	Real	Simulado	Desvio	Real	Simulado	Desvio	Real	Simulado	Desvio	Real	Simulado	Desvio
FC Própria 1 - Produção (ton.)	2.871	2.841	-1%	3.547	3.956	12%	2.140	2.430	14%	2.397	2.082	-13%	3.757	3.714	-1%
FC Própria 2 - Produção (ton.)	3.618	3.775	4%	2.680	2.930	9%	4.162	4.184	1%	3.665	3.341	-9%	3.073	3.215	5%
FC Própria 3 - Produção (ton.)	3.422	3.804	11%	2.239	2.430	9%	3.250	3.281	1%	3.148	3.281	4%	2.889	3.017	4%
FC Própria 4 - Produção (ton.)	2.673	2.909	9%	2.945	3.316	13%	3.578	3.281	-8%	2.969	2.853	-4%	3.577	3.531	-1%
FC Própria 5 - Produção (ton.)	2.537	2.561	1%	2.355	2.364	0%	3.179	3.136	-1%	3.395	3.454	2%	2.496	2.725	9%
FC Forn. Esteira - Produção (ton.)	1.037	1.025	-1%	817	731	-10%	749	728	-3%	1.033	1.017	-2%	1.160	1.130	-3%
FC Forn. Pool - Produção (ton.)	18.199	18.082	-1%	17.053	16.689	-2%	17.697	17.346	-2%	18.559	18.261	-2%	16.424	16.256	-1%
Moagem Ind. 1 (ton.)	21.717	21.651	0%	20.579	21.196	3%	22.646	21.627	-5%	22.843	21.614	-5%	21.465	21.178	-1%
Moagem Ind. 2 (ton.)	12.945	12.275	-5%	11.130	10.958	-2%	12.253	12.523	2%	12.747	12.920	1%	11.769	12.118	3%

Fonte: Próprio autor

Nota-se que os desvios apresentam variação entre -13% e +14%, no entanto 73% desses desvios estão entre o intervalo de -5% e +5%. Para visualizar esse comportamento, a Figura 42 apresenta o histograma dos desvios, que demonstra a concentração dos valores próximos de zero.

**Figura 42:** Histograma - Comportamento dos Desvios na Validação

Fonte: Próprio autor

Nesse ponto vale destacar que os *inputs* do modelo retratam um comportamento real, apresentando incertezas e sendo representados por uma distribuição probabilística. Logo os *outputs* também apresentam variações e são representados por uma distribuição de probabilidade.

Diante disso, considerando a grandeza dos desvios e a natureza probabilística do modelo, entende-se por satisfatório o comparativo entre o valor simulado e o valor real do sistema. Sendo assim, pode-se validar o modelo de simulação computacional das operações de CTT, dado que é representativo ao sistema estudado. Por fim, com o modelo validado, a próxima subseção aborda sobre sua utilização.

#### 4.4. Utilização do Modelo

Essa subseção foi dividida em duas etapas, sendo: a) propostas de melhoria ao sistema, a qual tem como objetivo elencar potenciais melhorias a partir da simulação do sistema real; e b) proposta de utilização do modelo no planejamento operacional, que tem como objetivo apontar uma rotina de utilização do modelo de simulação computacional das operações de CTT para seu planejamento operacional.

Nesse ponto, vale destacar que tanto as oportunidades de melhoria identificadas no sistema real, quanto a forma de utilização do modelo para o planejamento operacional, não se limitam às propostas realizadas neste trabalho. De forma que o modo de utilização do modelo

pode ser adaptado diante de outros elementos de estudo do sistema e em diferentes rotinas de planejamento operacional.

Desse modo, essa subseção tem como objetivo demonstrar e sugerir aplicações práticas do modelo construído, evidenciando seu potencial de utilização e impacto nas operações de CTT da cana-de-açúcar.

#### 4.4.1. Propostas de Melhoria ao Sistema

As operações de CTT da cana-de-açúcar apresentam uma grande quantidade de cenários para avaliação. Considerando que se multiplicam a cada objetivo diferente e alteração de variáveis de entrada, torna-se inviável esse tipo de avaliação nesse trabalho.

Para demonstrar a aplicação do modelo de simulação computacional, e possibilitar a identificação de algumas oportunidades de melhoria ao sistema estudado, foram gerados cenários baseados em 3 rodadas de simulação, considerando configurações de momentos distintos da safra.

A Tabela 27 apresenta as configurações dos cenários para simulação, considerando o TCH médio dos blocos, o tempo produtivo das colhedoras, o raio médio das frentes de colheita, e as indisponibilidades mecânicas dos caminhões e das carretas.

**Tabela 27:** Configuração dos cenários para simulação

Variáveis	Pessimista - dia ruim	Mediano - mais comum	Otimista - dia bom
TCH médio (t/ha)	50,0	65,0	85,0
Tempo produtivo médio - Corte de cana (%)	55,0%	59,0%	64,0%
Raio médio FC --> Indústria (Km)	28,0	22,0	18,5
Indisp. Mecânica Cavalos Mecânicos (%)	14,5%	4,6%	1,1%
Indisp. Mecânica Implementos Rodoviários (%)	14,8%	5,3%	1,5%

Fonte: Próprio autor

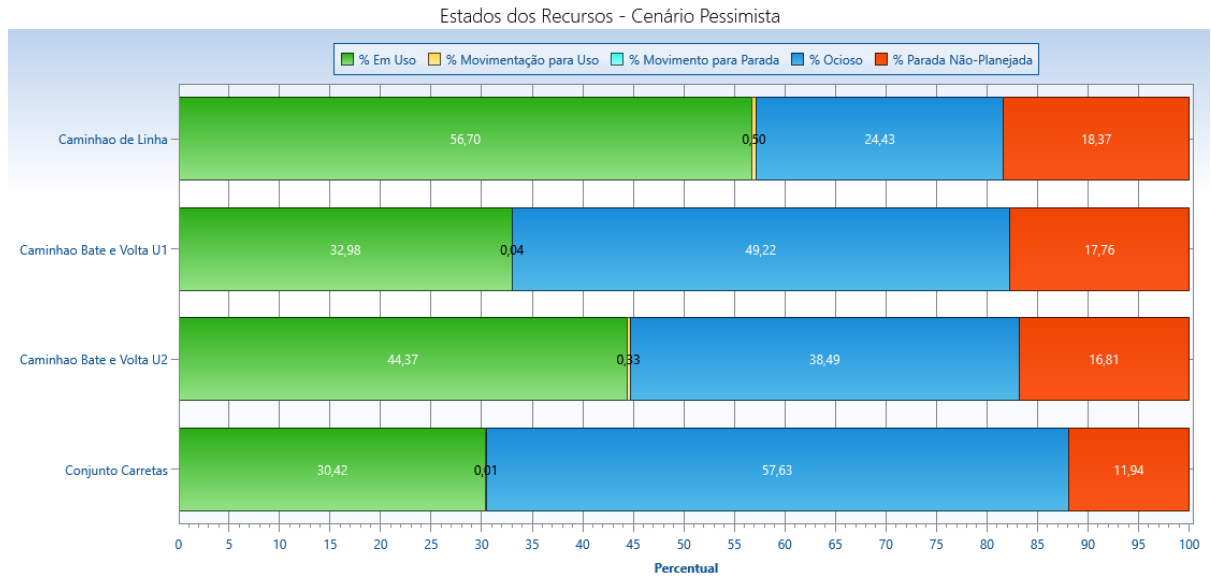
Além disso, para delimitar o objetivo de análise definiu-se algumas perspectivas para a abordagem, sendo: a) avaliação da ocupação dos recursos; b) avaliação da entrega de cana das frentes de colheita próprias; c) avaliação de filas, ciclos e *leadtimes*.

##### 4.4.1.1. Recursos

Para fazer a avaliação da utilização dos recursos foi usado o *Output Viewer*, de modo que o relatório apresenta a visão da ocupação dos recursos, apontando suas proporções em uso, em movimentação para uso, em paradas não planejadas e ocioso.

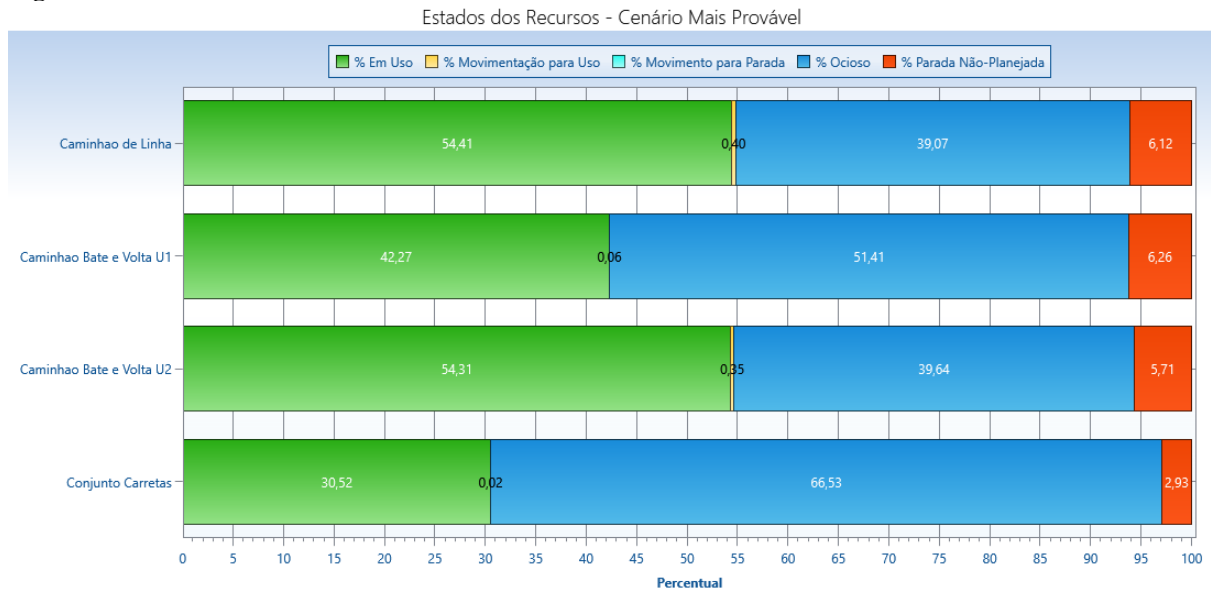
Destaca-se que a Figura 43, a Figura 44 e a Figura 45, representam, respectivamente, a ocupação dos recursos no cenário pessimista, mais provável e otimista, considerando os caminhões de linha, os caminhões bate e volta das duas usinas e o conjunto carretas.

**Figura 43:** Recursos - Cenário Pessimista

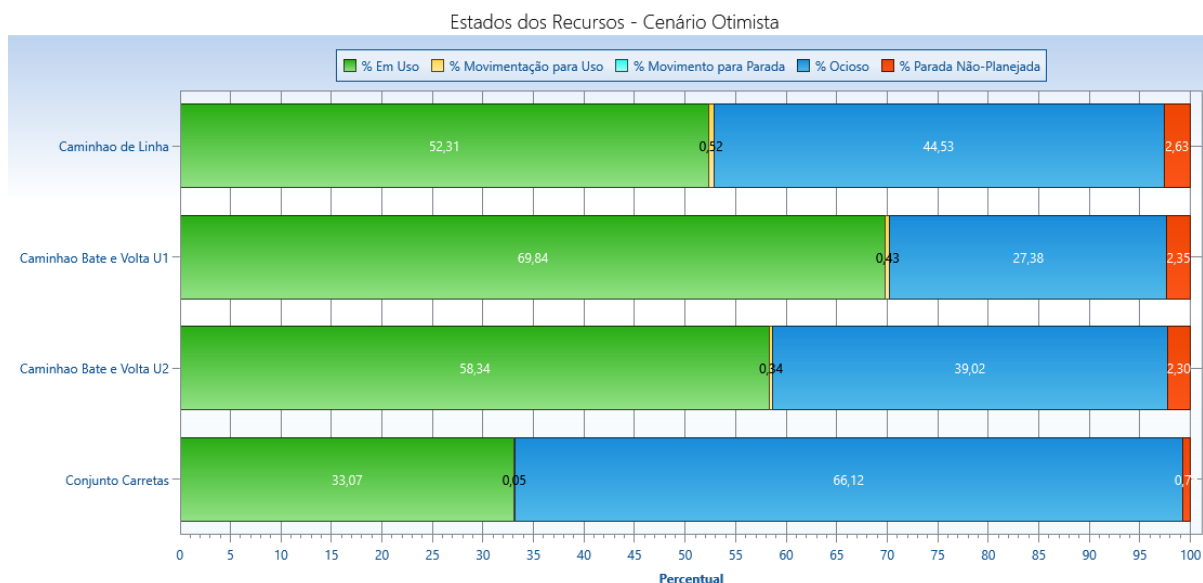


Fonte: Próprio autor

**Figura 44:** Recursos - Cenário Mais Provável



Fonte: Próprio autor

**Figura 45:** Recursos - Cenário Otimista

Fonte: Próprio autor

Nesse ponto, vale destacar que o caminhão de linha ficou em uso 56,7% no cenário pessimista, 54,4% no cenário mais provável e 52,3% no cenário otimista. Já o conjunto carretas ficou em uso 30,4% no cenário pessimista, 30,5% no cenário mais provável e 33,1% no cenário otimista. No que se refere aos caminhões bate e volta da usina 1 e da usina 2, tem-se, respectivamente, 33,0% e 44,4% no cenário pessimista, 42,3% e 54,3% no cenário mais provável e 69,8% e 58,3% no cenário otimista.

Diante dos resultados, vale ressaltar que apesar da menor produção de cana no cenário pessimista, a ocupação é maior devido à distância entre as frentes de colheita e as unidades industriais. De modo, que o comportamento inverso acontece no cenário otimista, em que apesar da maior produção de cana-de-açúcar a ocupação dos recursos é menor devido ao cenário positivo de raio médio.

Ainda é notório pelo relatório de ocupação dos recursos, que em qualquer que seja o cenário, os recursos responsáveis pelo transporte da cana-de-açúcar, não são o gargalo do sistema. Essa avaliação corrobora como característica do sistema dado que sua função é interligar os dois maiores gargalos produtivos, as colhedoras e a unidade industrial.

No entanto, apesar dessa folga nos recursos de transporte ser importante para o balanceamento do sistema e para absorver possíveis variações dos gargalos do sistema, é prudente que seja avaliado o tamanho dessas folgas, considerando que apresentam custos significativos e impactam no custo de produção, que tem seu lugar de destaque em setores como o sucroenergético, que tem sua dinâmica competitiva muito pautada no baixo custo.

Dessa forma, com o objetivo de identificar oportunidades para otimização da estrutura de transporte, realizou-se um estudo de sensibilidade com base nos cenários de menor ociosidade dos caminhões de linha e dos conjuntos carretas, de modo que mantenham a capacidade de entrega, fornecendo escoamento das frentes de colheita e alimentação às indústrias, mas que a estrutura seja mais enxuta.

O estudo de sensibilidade partiu de 50% da lacuna de ociosidade no pior cenário de caminhões, variando de -2 a +2 do cenário intermediário, sendo assim foram avaliadas o impacto da redução de 3 a 7 caminhões de linha como consta na Tabela 28, em que são avaliados os impactos em cada um dos 3 cenários na chegada de carretas nas usinas e na saída de cana-de-açúcar das frentes de colheita própria e de fornecedor *pool*.

**Tabela 28:** Análise de Sensibilidade – Caminhões

Cenários - Saída das Frentes de Colheita									
Caminhões de linha	Pessimista			Mais provável			Otimista		
	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio
3 caminhões	105.592	105.511	-0,1%	125.297	125.559	0,2%	140.578	140.584	0,0%
4 caminhões	105.592	105.675	0,1%	125.297	125.689	0,3%	140.578	140.289	-0,2%
5 caminhões	105.592	105.753	0,2%	125.297	125.744	0,4%	140.578	140.402	-0,1%
6 caminhões	105.592	105.591	0,0%	125.297	125.678	0,3%	140.578	140.182	-0,3%
7 caminhões	105.592	105.559	0,0%	125.297	125.484	0,1%	140.578	140.258	-0,2%
Cenários - Chegada nas Usinas									
Caminhões de linha	Pessimista			Mais provável			Otimista		
	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio
3 caminhões	1.684	1.688	0,2%	2.023	2.011	-0,6%	2.268	2.272	0,2%
4 caminhões	1.684	1.691	0,4%	2.023	2.021	-0,1%	2.268	2.281	0,6%
5 caminhões	1.684	1.684	0,0%	2.023	2.013	-0,5%	2.268	2.284	0,7%
6 caminhões	1.684	1.676	-0,5%	2.023	2.022	0,0%	2.268	2.271	0,1%
7 caminhões	1.684	1.687	0,2%	2.023	2.025	0,1%	2.268	2.266	-0,1%

Fonte: Próprio autor

Nota-se que os desvios, tanto das saídas das frentes de colheita, quanto das chegadas nas usinas, não são significativos, ficando abaixo de 1%, oscilando em desvios positivos e negativos, fruto da característica estocástica do modelo. Dessa forma, pode-se assumir que a redução de 7 caminhões não impacta na operação do sistema de CTT estudado.

A partir do cenário com menos 7 caminhões, realizou-se uma segunda rodada de análise para avaliar a sensibilidade das carretas. Destaca-se que foi utilizado o mesmo roteiro dos caminhões. No entanto, devido à natureza de operação das carretas, o percentual utilizado para o cenário base foi de 25% da lacuna e a variação para análise foi de -5 a +5, representando reduções de 10 a 20 conjuntos de carretas, como consta no, com avaliações semelhantes aos caminhões de linha (Tabela 29).

**Tabela 29:** Análise de Sensibilidade – Carretas

Cenários - Saída das Frentes de Colheita									
Redução - Conjunto Carretas	Pessimista			Mais provável			Otimista		
	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio
10 conjuntos	105.559	105.473	-0,1%	125.484	125.559	0,1%	140.258	140.191	0,0%
15 conjuntos	105.559	105.584	0,0%	125.484	125.492	0,0%	140.258	140.503	0,2%
20 conjuntos	105.559	105.176	-0,4%	125.484	125.650	0,1%	140.258	140.395	0,1%

Cenários - Chegada nas Usinas									
Redução - Conjunto Carretas	Pessimista			Mais provável			Otimista		
	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio	Base	Alteração	Desvio
10 conjuntos	1.687	1.685	-0,1%	2.025	2.026	0,0%	2.266	2.265	0,0%
15 conjuntos	1.687	1.714	1,6%	2.025	2.012	-0,6%	2.266	2.271	0,2%
20 conjuntos	1.687	1.747	3,6%	2.025	2.016	-0,4%	2.266	2.282	0,7%

Fonte: Próprio autor

Assim como os caminhões, nota-se que não há desvios negativos significativos na avaliação dos conjuntos de carreta, de modo que os desvios oscilam entre variações positivas e negativas, também fruto da característica estocástica do modelo. Sendo assim, pode-se assumir que a redução de 20 conjuntos de carreta não impacta na operação do sistema de CTT estudado.

Nesse ponto, vale reiterar que a estrutura de transporte deve apresentar folga para absorver variações das operações a montante e a jusante, no entanto, o modelo permitiu testar essas hipóteses de redução, que fornece elementos para a tomada de decisão que refletem no custo operacional.

Desse modo, para quantificar o impacto no custo operacional, pode-se utilizar, de maneira simplista, os custos para ter e para manter cada um desses ativos na safra. A Tabela 30 apresenta a economia potencial com a redução dos 7 caminhões de linha e de 20 conjuntos de carretas ou 40 unidades, que representam, respectivamente, 14,3% e 17,2% da estrutura total. Destaca-se que a economia potencial dessa tomada de decisão representa R\$ 2.611.525 por safra.

**Tabela 30:** Economia potencial da estrutura de transporte

	Caminhões	Carretas
Quantidade	7	40
Custo médio safra	R\$172.024	R\$35.184
Economia potencial	R\$1.204.165	R\$1.407.360
<b>Economia potencial - estrutura</b>	<b>RS2.611.525</b>	

Fonte: Próprio autor

#### 4.4.1.2. Entrega de cana

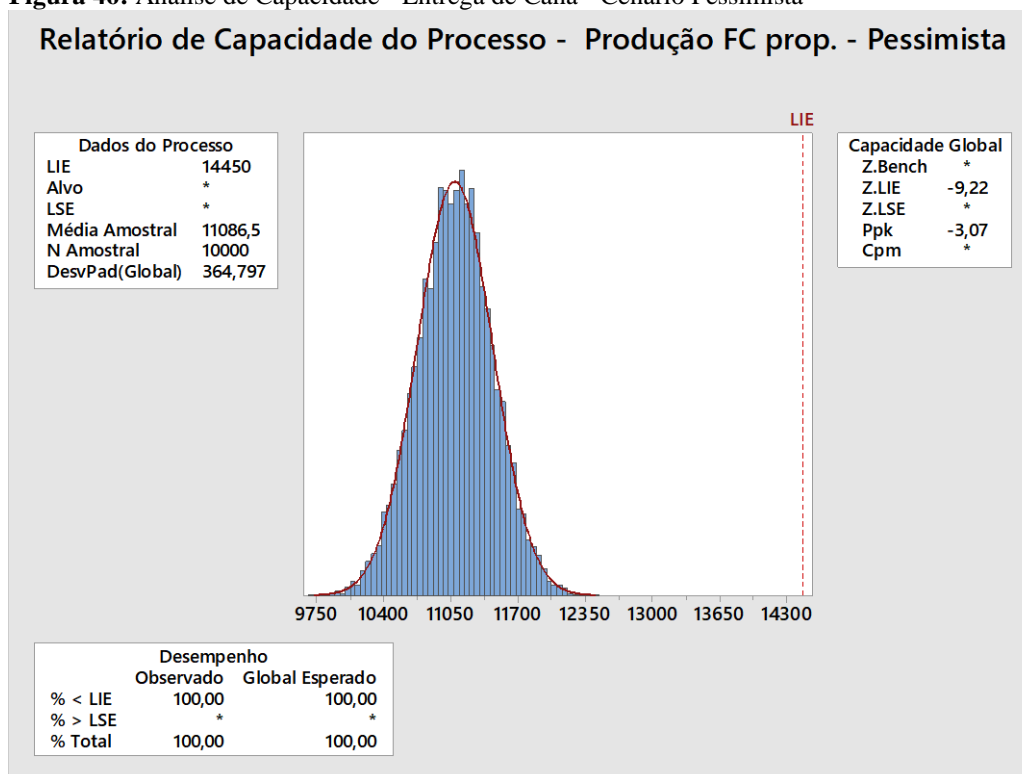
Além da avaliação dos recursos, os cenários gerados permitem a avaliação da entrega de cana pelas frentes de colheita própria. Como descrito na subseção 4.1 a cana-de-açúcar entra

no sistema por frentes de colheita próprias e frentes de colheita de fornecedores, nas quais cada uma delas apresentam suas cotas de entrega.

Nesse sentido, o nivelamento da entrega de cana-de-açúcar durante a safra tem grande importância para o planejamento das operações, de modo a garantir a alimentação das plantas industriais, além do impacto no custo das operações, dado que os valores pagos a fornecedores são diferentes da produção própria.

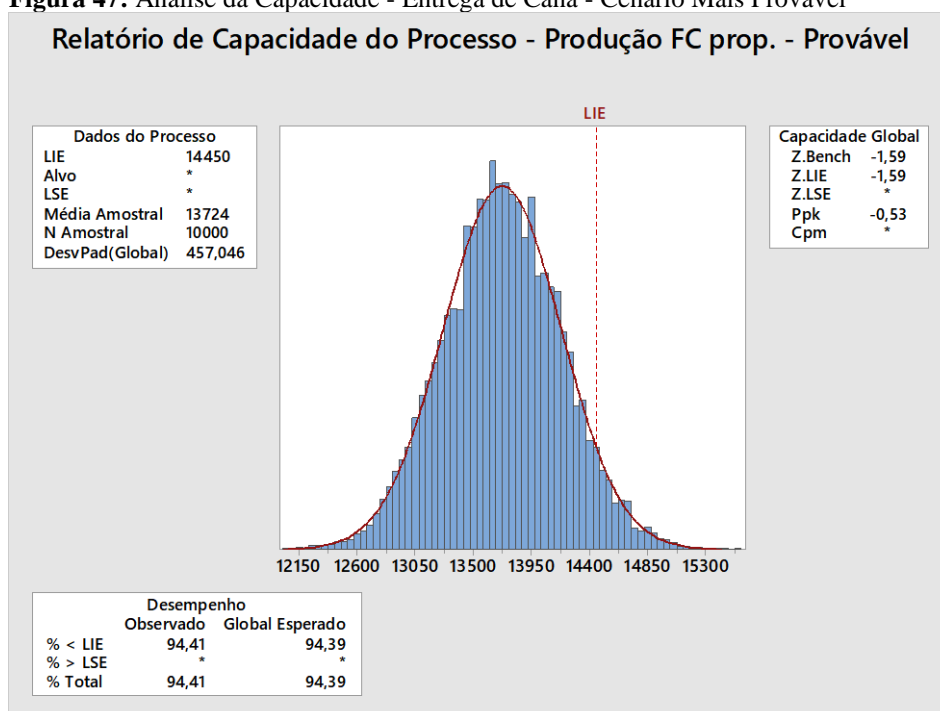
Avaliando esse recorte do modelo, tem-se que a entrega de cana-de-açúcar pela estrutura própria apresenta diferentes níveis nos cenários simulados. Sendo assim, considerando a cota de entrega de cana própria de 14.450 toneladas por dia, é possível avaliar a capacidade do sistema, em cada configuração simulada, de entregar volumes iguais ou superiores à cota. Nesse sentido, a Figura 46, a Figura 47 e a Figura 48 retratam a análise de capacidade em cada um dos três cenários avaliados.

**Figura 46:** Análise de Capacidade - Entrega de Cana - Cenário Pessimista



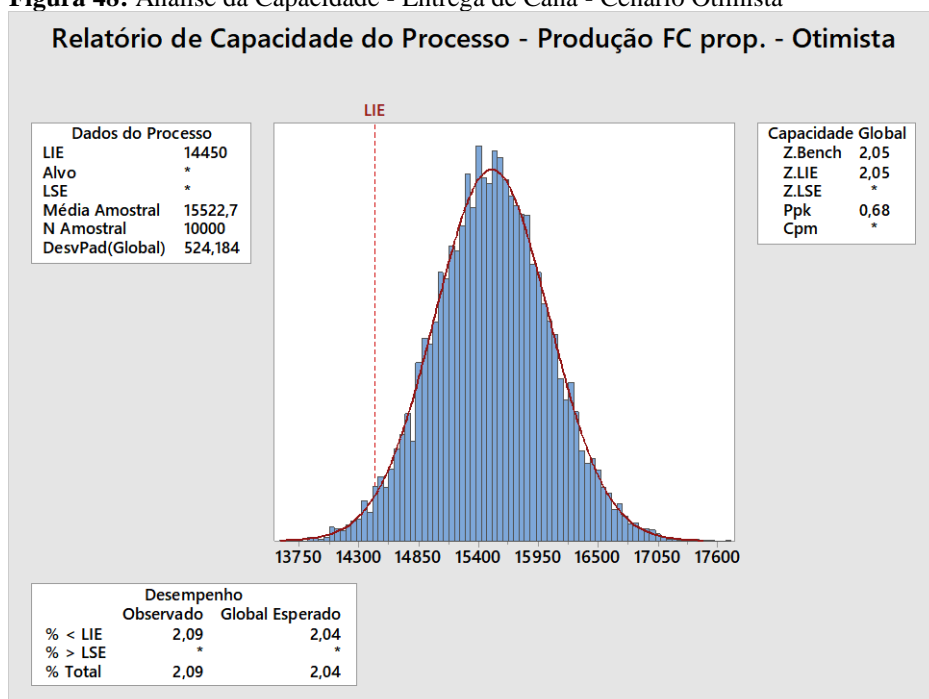
Fonte: Próprio autor

**Figura 47:** Análise da Capacidade - Entrega de Cana - Cenário Mais Provável



Fonte: Próprio autor

**Figura 48:** Análise da Capacidade - Entrega de Cana - Cenário Otimista



Fonte: Próprio autor

Nota-se que a configuração do cenário pessimista não é capaz de atingir a cota de produção das frentes próprias, no cenário mais provável há probabilidade de atingimento, porém muito baixa, e a configuração do cenário otimista é capaz de atingir e superar a cota de produção das frentes próprias.

Diante disso, a Tabela 31 resume a análise de capacidade das configurações dos três cenários avaliados, demonstrando a taxa de defeitos ou a taxa que a entrega fica abaixo da cota, e o nível sigma do processo.

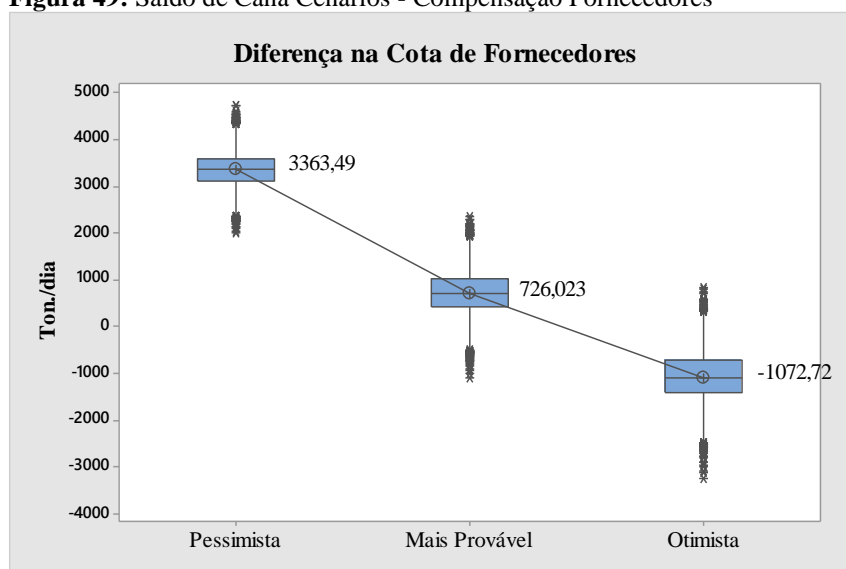
**Tabela 31:** Análise de Capacidade - Entrega de Cana - Resumo

Configurações	Taxa de defeitos (abaixo da cota de 14.450)	Nível sigma do processo
Cenário Pessimista	100,0%	*
Cenário Mais Provável	94,4%	-0,09
Cenário Otimista	2,0%	3,55

Fonte: Próprio autor

Nesse ponto, destaca-se que para manter o nível de moagem e atender a demanda industrial, essa lacuna apresentada pelas frentes de colheita própria deve ser compensada pelas frentes de colheita de fornecedores. Desse modo, a Figura 49 apresenta o valor dessa compensação em cada um dos cenários.

**Figura 49:** Saldo de Cana Cenários - Compensação Fornecedores



Fonte: Próprio autor

Observa-se que o déficit médio no cenário pessimista é de 3.364 ton./dia, no cenário mais provável esse déficit médio cai para 726 ton./dia, e no cenário otimista existe um superávit médio de 1.073 ton./dia, os quais devem ser compensados pelas frentes de fornecedores para garantir a alimentação das unidades industriais.

Diante do exposto na avaliação da entrega de cana, considerando que as plantas industriais são gargalos do sistema e que a estrutura de transporte é capaz de absorver certo nível de flutuação do sistema pela sua folga, a Figura 50 apresenta os pilares de atuação para melhorar o nivelamento da entrega de cana nas usinas.

**Figura 50:** Pilares de Atuação - Nivelamento da Entrega de Cana

Fonte: Próprio autor

Considerando o esforço e impacto de atuação em cada pilar, sugere-se que a atuação seja iniciada pelas frentes próprias, no que se refere ao nivelamento da indisponibilidade mecânica.

Destaca-se que as quebras de máquina são os maiores responsáveis pela variação sazonal do tempo de corte, dado que o desgaste aumenta com o decorrer da safra e as condições de solo também contribuem. Nesse ponto, vale destacar que planos preventivos de manutenção e o aumento da frequência de atuação preventiva podem contribuir com a redução da dispersão da indisponibilidade mecânica entre os meses de safra.

Ainda, salienta-se que manutenções lineares também podem ser consideradas para esse fim, no entanto dependem de outros tipos de avaliação que fogem da delimitação deste trabalho.

No que tange a suavização do impacto do TCH, vale destacar que é um pilar com poucas oportunidades, visto que está relacionada à todas as operações de cultivo da cana, apresenta reflexos no longo prazo, e está exposta a variáveis climáticas que não temos controle.

No entanto, dar visibilidade ao TCH médio no momento do sequenciamento dos blocos para colheita pode suavizar um pouco essa variação. Além disso, esforços para aumentar a densidade dos canaviais refletem positivamente no desempenho operacional do sistema de CTT da cana-de-açúcar.

Por fim, no que se refere às frentes de fornecedores, encontra-se oportunidades com a antecipação do planejamento e identificação das variações na entrega das frentes próprias. Dessa forma, a utilização de cotas de fornecedores variáveis poderia contribuir com o nivelamento da entrega. Nesse ponto, vale ressaltar que o modelo desenvolvido nesse trabalho é adequado para fornecer *inputs* para esse planejamento.

#### 4.4.1.3. Filas, ciclos e *leadtime*

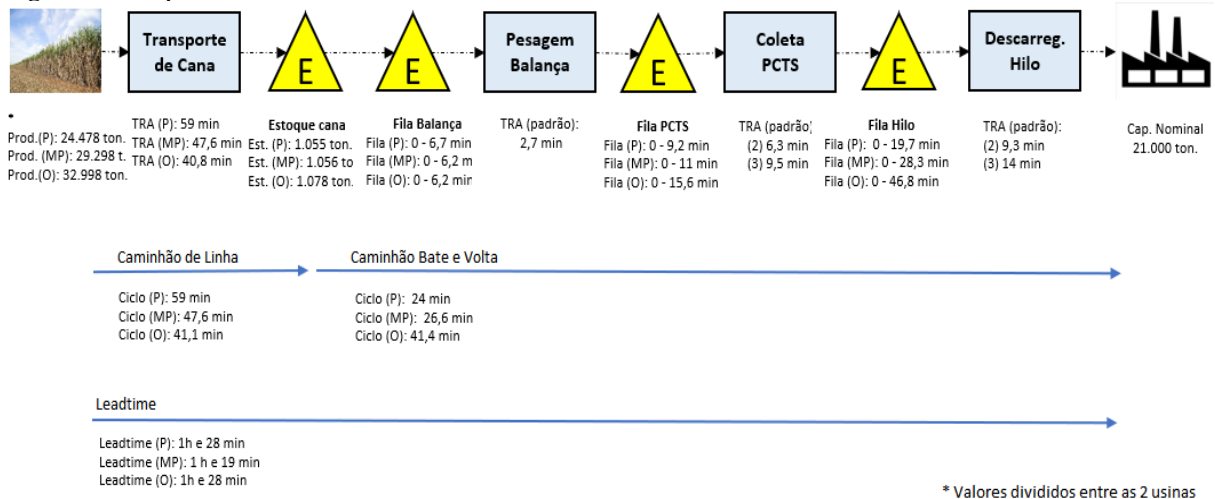
O modelo de simulação computacional proporcionou a possibilidade de avaliação do fluxo de valor das operações de CTT da cana-de-açúcar. Nesse ponto, vale destacar que pela descentralização das operações, em que cada etapa ocorre em uma localização geográfica, o

esforço para construção desse mapeamento é muito alto, e os valores são alterados em cada configuração do sistema.

Sendo assim, salienta-se que o modelo de simulação desenvolvido é capaz de fornecer inputs para a avaliação do fluxo de valor nas operações de CTT, proporcionando agilidade na avaliação.

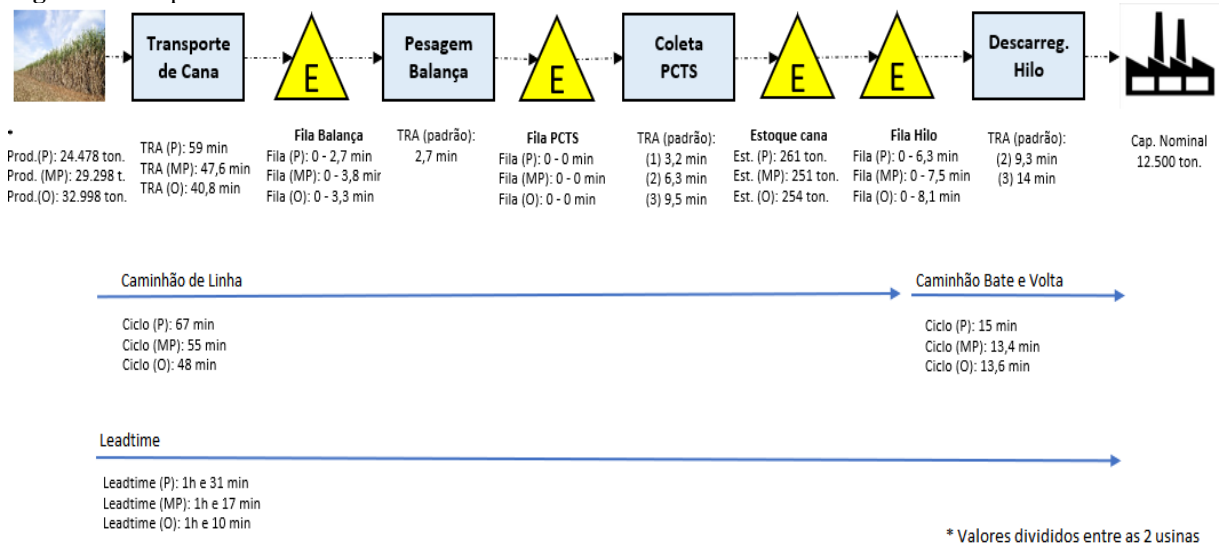
Diante desse fato, foram desenvolvidos os mapeamentos do fluxo de valor para as duas usinas do estudo, considerando os três cenários utilizados para a análise do sistema produtivo, sendo pessimista (P), mais provável (MP) e otimista (O). A Figura 51 e a Figura 52 referem-se respectivamente aos fluxos da Indústria 1 e da Indústria 2, e são usados para demonstrar uma forma de utilização do modelo e sustentar as discussões sobre as filas, ciclos e *leadtime* do processo.

**Figura 51:** Mapa do Fluxo de Valor - Indústria 1



Fonte: Próprio autor

**Figura 52:** Mapa do Fluxo de Valor - Indústria 2



Fonte: Próprio autor

No que se refere ao fluxo da Indústria 1 (Figura 51), tem-se que:

- a) O tempo máximo de fila na balança é de 6,7 minutos no cenário pessimista, e 6,2 minutos nos cenários mais provável e otimista, demonstrando pouca variação diante as configurações adotadas nos cenários;
- b) O tempo máximo de fila para coleta no PCTS é de 9,2 minutos no cenário pessimista, 11 minutos no mais provável e 15,6 minutos no otimista, demonstrando que a fila aumenta conforme o volume de cana também aumenta, sendo sugestivo que a etapa se torne um gargalo se houver aumento no ritmo de moagem;
- c) O tempo máximo de fila para descarregamento no Hilo é de 19,7 minutos no cenário pessimista, 28,3 minutos no mais provável e 46,8 minutos no otimista, demonstrando que a fila aumenta conforme o volume de cana também aumenta, apontando que o local passa a ser um gargalo em determinadas configurações do sistema. Porém pode ser um indicativo de aumento de moagem se considerado o aumento de ritmo quando a capacidade de entrega de cana estiver em níveis elevados;
- d) O ciclo médio do caminhão de linha, considerando o trajeto para entrega de cana é de 59 minutos no cenário pessimista, 47,6 no mais provável e 41,1 no otimista, de modo que reflete o impacto da redução do raio médio das frentes de colheita;
- e) O ciclo médio do caminhão bate e volta, considerando o trajeto para descarregamento da cana é de 24 minutos no cenário pessimista, 26,6 no mais provável e 41,4 no otimista, de modo que reflete o impacto das filas nas etapas de pesagem, coleta de amostra no PCTS e descarregamento no hilo;
- f) O *leadtime* médio para a entrega de cana-de-açúcar, que mede o tempo do momento da colheita até o descarregamento na moagem, é de 88 minutos no cenário pessimista, 79 minutos no mais provável e 88 minutos no otimista. Isso indica que o *leadtime* de entrega é influenciado tanto pelo raio, quanto pelas filas das etapas de recebimento, que são causadas pelo aumento do volume de cana no sistema.

Já no que se refere ao fluxo da Indústria 2 (Figura 52), tem-se que:

- a) O tempo máximo de fila na balança é de 2,7 minutos no cenário pessimista, 3,8 minutos no mais provável e 3,3 minutos no otimista, demonstrando pouca variação diante as configurações adotadas nos cenários;
- b) Não foi contabilizada fila para a etapa de coleta no PCTS;
- c) O tempo máximo de fila para descarregamento no Hilo é de 6,3 minutos no cenário pessimista, 7,5 minutos no mais provável e 8,1 minutos no otimista, demonstrando pouca variação diante das mudanças de configuração dos cenários. Ficando nítido que a configuração da indústria 2 gera menos impacto na fila do hilo;
- d) O ciclo médio do caminhão de linha, considerando o trajeto para entrega de cana é de 67 minutos no cenário pessimista, 55 no mais provável e 48 no otimista, de modo que reflete o impacto da redução do raio médio das frentes de colheita. Ainda vale destacar que o aumento do ciclo quando comparado com o da Indústria 1, justifica-se pelo aumento das operações de recebimento de cana;
- e) O ciclo médio do caminhão bate e volta, considerando o trajeto para descarregamento da cana é de 15 minutos no cenário pessimista, 13,4 no mais provável e 13,6 no otimista, de modo a não demonstrar variação diante das modificações de cenários, assim como nas filas do processo de recebimento;
- f) O *leadtime* médio para a entrega de cana-de-açúcar, que mede o tempo do momento da colheita até o descarregamento na moagem, é de 91 minutos no cenário pessimista, 77 minutos no mais provável e 70 minutos no otimista. Como na Indústria 2 não houve formação de filas o *leadtime* de entrega é influenciado somente pelo raio médio entre as frentes de colheita e as usinas.

Diante do que foi exposto com a avaliação das filas, ciclos e *leadtime*, destaca-se que no sistema real esses cenários mudam assim como mudaram com as configurações para essa avaliação. Nesse ponto, destaca-se que a avaliação dessas filas, ciclos e *leadtime* com a configuração atual do sistema podem trazer benefícios para a gestão operacional, e pode ser conduzido por uma central de operações agrícolas.

Por fim, reitera-se que o modelo de simulação desenvolvido pode proporcionar melhorias quanto a utilização dos recursos, a entrega de cana e as filas, ciclos e *leadtime*, porém

não se limita a isso, sendo que outras melhorias e formas de análise são aplicáveis. Na próxima subseção é proposto uma forma de utilizar o modelo para o planejamento operacional.

#### **4.4.2. Proposta de Utilização do Modelo no Planejamento Operacional**

Esta subseção tem como objetivo trazer uma proposta de utilização do modelo de simulação computacional desenvolvido, para o planejamento das operações de CTT do caso estudado.

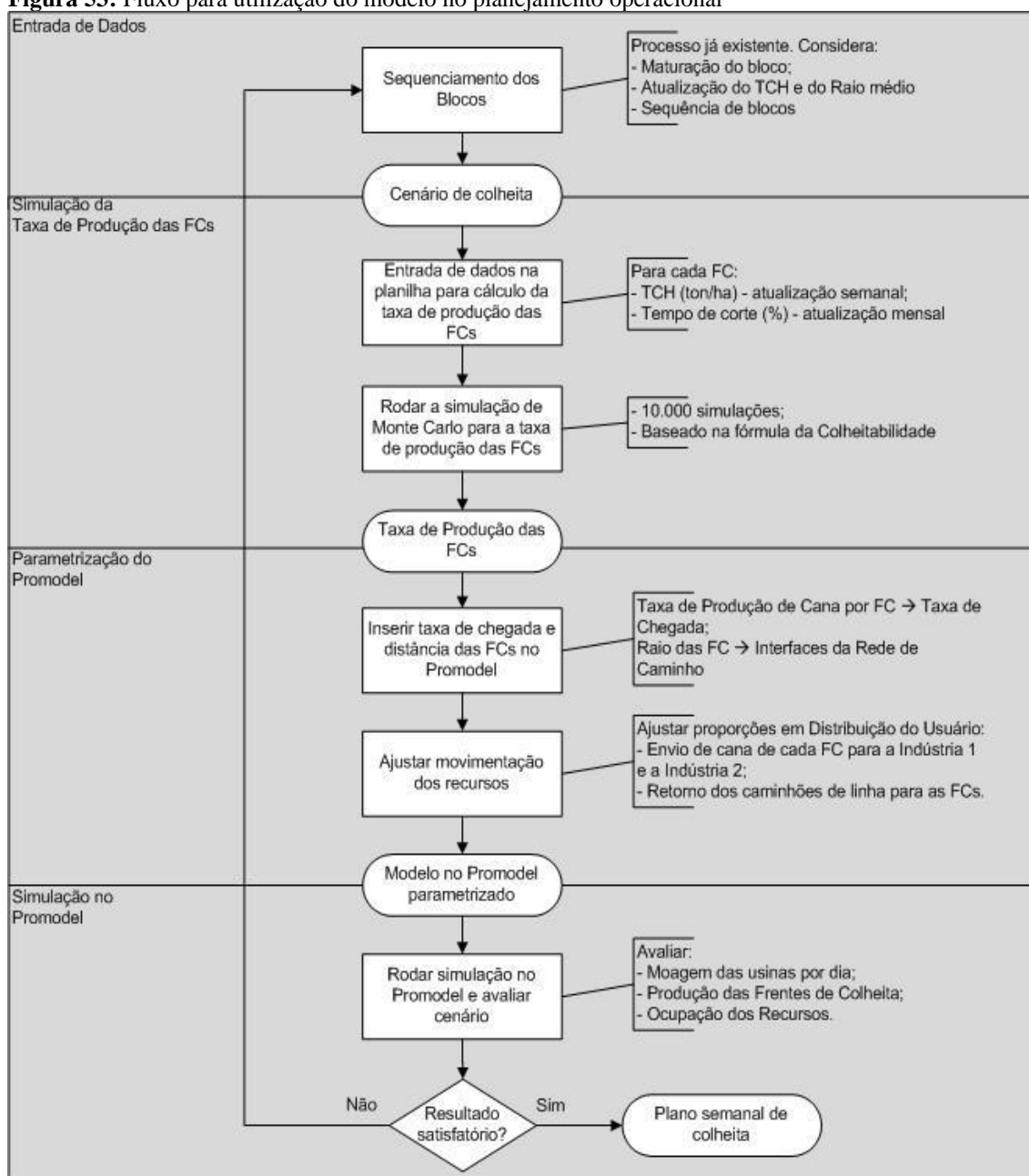
Para isso foi levantado, a partir de observação da reunião de planejamento e de entrevista com o Gestor de Motomecanização e o Engenheiro de CTT, como é a dinâmica do planejamento operacional, considerando a frequência e as informações avaliadas, e posteriormente foi proposto um fluxo para utilização do modelo desenvolvido no Promodel.

Nesse ponto, destaca-se que a reunião de planejamento operacional ocorre semanalmente, às quintas-feiras, com horizonte de planejamento de uma semana. No que tange as informações levantadas, destaca-se que ocorre a atualização dos blocos que estão liberados para a colheita, a atualização do TCH e do raio médio de cada bloco, que são realizados pela equipe técnica agrônômica.

Somado à essas atualizações, a equipe que tem a gestão dos fornecedores *pool* e esteira também levantam os blocos a serem colhidos. Desse modo, a junção dessas informações é usada na reunião de planejamento da operação de CTT para o sequenciamento dos blocos, onde são avaliadas as entregas totais para cada usina e o raio médio das frentes de colheita.

Diante disso, e considerando o menor impacto na rotina de planejamento, a Figura 53 apresenta uma proposta de utilização do modelo de simulação computacional desenvolvido neste trabalho na rotina de planejamento das operações de CTT.

Nota-se pela Figura 53 que o processo de planejamento que já ocorre, deve continuar e serve de entrada para o modelo de simulação, pois o sequenciamento dos blocos fornece o cenário de colheita, com o TCH e o raio das frentes de colheita.

**Figura 53:** Fluxo para utilização do modelo no planejamento operacional

Fonte: Próprio autor

Com os dados de TCH do sequenciamento dos blocos e uma previsão de tempo de corte, que pode ser atualizado em um horizonte de tempo mensal, é realizada a simulação de Monte Carlo para cálculo da Taxa de Produção de Cana-de-Açúcar das frentes de colheita. Nesse ponto, vale destacar que a planilha para simulação já está estruturada para 10.000 simulações e a base de cálculo é a fórmula de colheabilidade, detalhada na Equação 11, seção 4.1.2.2.1.

A partir da distribuição calculada para as taxas de produção de cana-de-açúcar e das distâncias das frentes de colheita para as usinas (raio), é realizada a parametrização do modelo no Promodel. Nesse ponto, destaca-se que a taxa de produção é inserida na taxa de chegada e o raio é inserido nas interfaces da rede de caminho. Ainda, para a parametrização do modelo, são

necessários ajustes nas distribuições para equalizar a distribuição para as usinas e o retorno dos caminhões vazios para as frentes de colheita.

Além desses parâmetros, deve ser avaliado se houve variação na indisponibilidade dos equipamentos, para atualizar as paradas de recursos com a nova frequência (MTBF) e tempo de reparo (MTTR). No entanto, essas variações ocorrem em um horizonte de tempo maior que o rito de planejamento, não sendo necessária a atualização semanal. Diante disso, e considerando a sazonalidade das indisponibilidades, sugere-se a atualização mensal.

Com o modelo parametrizado, é feita a simulação no Promodel e avaliado o cenário, considerando a produção de cana das frentes de colheita, a moagem por usina, e a ocupação dos recursos. Os outros indicadores do modelo, tais como *leadtime*, filas e ciclos podem apoiar a tomada de decisão para definição do plano ou geração de outro sequenciamento de colheita.

Além do planejamento semanal, as operações do CTT apresentam o dimensionamento de estrutura com horizonte de tempo de uma safra ou mensal. Nesse caso, o fluxo para utilização do modelo é o mesmo, no entanto, no longo prazo deve ser inserida a variável de parada climática das frentes de colheita, configurada como parada desses locais e só deve ser ativada e ajustados os valores da distribuição.

Diante disso, tem-se uma sugestão factível de utilização do modelo, na qual o esforço de planejamento tem um pequeno aumento da situação atual, mas em contrapartida a qualidade da informação para tomada de decisão é significativamente maior, logo a confiabilidade do plano das operações de CTT também aumenta.

Sendo assim, conclui-se todas as etapas propostas para o estudo. Na próxima seção são discutidos os resultados e as implicações gerenciais do modelo.

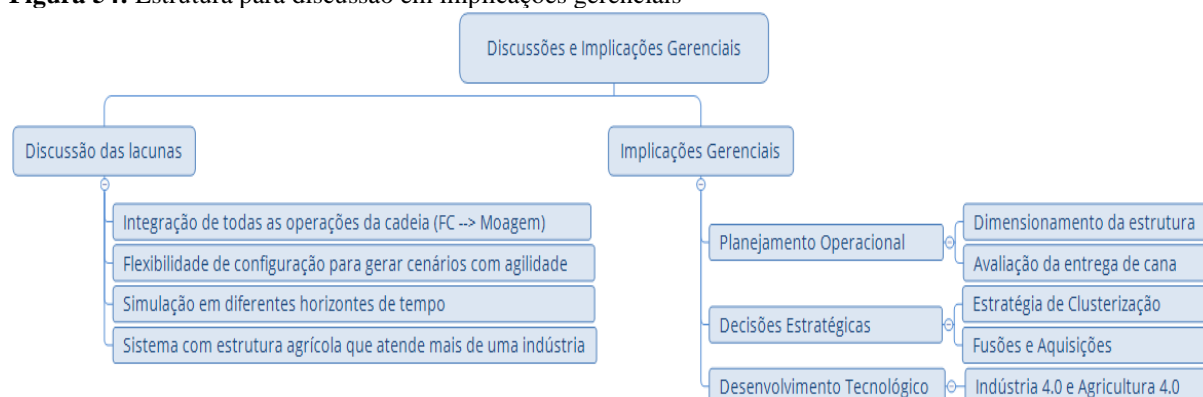
#### **4.5. Discussão e Implicações Gerenciais**

As subseções anteriores apresentaram as discussões específicas que embasaram as decisões e caminhos para o mapeamento dos processos, a construção do modelo de simulação, a validação do modelo e as propostas de utilização do modelo de simulação computacional desenvolvido para as operações de CTT da cana-de-açúcar.

Nesta subseção, as discussões são sob a perspectiva das lacunas encontradas na base teórica sobre simulação de processos agroindustriais da cana-de-açúcar ou em culturas similares. Além disso, são elencadas as implicações gerenciais que o modelo de simulação desenvolvido neste trabalho oferece para o setor sucroenergético e possivelmente, com pequenas modificações, para outras cadeias do agronegócio.

Diante disso, a Figura 54 apresenta a estrutura para discussão das lacunas teóricas e para as implicações gerenciais do modelo de simulação computacional desenvolvido neste trabalho.

**Figura 54:** Estrutura para discussão em implicações gerenciais



Fonte: Próprio autor

No que se refere às lacunas encontradas na base teórica sobre modelagem e simulação das operações de CTT, o Quadro 11 apresenta para cada lacuna o avanço que este trabalho trouxe e como o modelo supre as dificuldades apontadas em trabalhos anteriores, além de seus benefícios para a gestão das operações de CTT da cana-de-açúcar.

**Quadro 11:** Discussão das Lacunas

Lacunas	Característica do modelo	Benefícios
Integração de todas as operações da cadeia (FC --> Moagem)	O modelo desenvolvido considera todas as etapas que envolvem as operações de CTT, envolvendo com nível de detalhe necessário o processo de corte, de transporte, de recebimento e a moagem. De forma a suprir essa lacuna na base teórica, que tinham abordagens mais limitadas em determinadas etapas.	A abrangência do modelo permite uma melhor visualização das operações de CTT, possibilitando uma abordagem integrada entre as etapas de colheita, transporte, recebimento de cana e moagem, de modo a verificar o impacto entre as etapas.
Flexibilidade de configuração para gerar cenários com agilidade	O modelo desenvolvido possibilita a agilidade na configuração, devido aos módulos que apresentam variação no sistema real. Nota-se na subseção 4.2.1 que apenas 30% dos itens necessitam de configuração pela mudança do sistema, os quais se referem aos <i>inputs</i> para cálculo do volume de cana e às distâncias das frentes de colheita para as indústrias. Essa característica do modelo supri a dificuldade de geração de cenários a tempo para a tomada de decisão no curto prazo, que foram relatadas em trabalhos similares.	Esta flexibilidade proporciona agilidade na criação de cenários, o que possibilita a utilização do modelo para a tomada de decisão e o planejamento de curto prazo, como foi proposta a inserção na rotina semanal de planejamento na subseção 4.4.2.
Simulação em diferentes horizontes de tempo	O modelo possibilita a simulação em diferentes horizontes de tempo, seja para o planejamento semanal ou para o planejamento da safra. Destaca-se que para adaptação do modelo para diferentes horizontes de simulação se deve somente ao ajuste dos itens apontados na lacuna anterior, para que representem o sistema no horizonte desejado. Diante disso, o modelo apresenta avanços para suprir essa lacuna.	Esta característica do modelo aumenta sua flexibilidade de uso, logo possibilita ser usado para várias finalidades de avaliação do sistema, desde um planejamento operacional para a semana, até a avaliação global de uma safra.
Sistema com estrutura agrícola que atende mais de uma indústria	Como visto, este modelo apresenta uma configuração em que uma estrutura agrícola é compartilhada por duas plantas industriais. Esta característica supri a lacuna de outros trabalhos que o fluxo das frentes de colheita apresentavam apenas uma direção.	Esta característica do modelo aumenta o escopo de avaliação operacional, favorecendo a sinergia de produção agrícola, que será abordada nas implicações gerenciais, proporcionada pela clusterização.

Fonte: Próprio autor

As implicações gerenciais, deste modelo apresentam interface com três pilares, o do planejamento operacional, o das decisões estratégicas, e o do desenvolvimento tecnológico nas operações agroindustriais do setor sucroenergético.

No que tange ao planejamento operacional, como foi abordado na subseção 4.4.4.1, o modelo contribui para o dimensionamento da estrutura de equipamentos das operações do CTT e redução de custo operacional.

Ainda no pilar de planejamento operacional, destaca-se que o modelo contribui para avaliação do sistema produtivo, considerando todo o fluxo de produção, com a identificação de gargalos e inter-relação entre etapas do processo, de modo a favorecer o nivelamento entre o sistema agrícola e o sistema industrial. Nesse ponto, destaca-se que a amplitude de avaliação apresentada pelo modelo possibilita a identificação de impactos no sistema a partir da variação de um elemento, como foi abordado nas subseções 4.4.4.2 e 4.4.4.3.

No que se refere às decisões estratégicas, o modelo contribui para avaliação de sistemas em que uma estrutura agrícola centralizada fornece cana-de-açúcar para mais de uma usina. Considerando o movimento de formação de grandes grupos no setor sucroenergético, e a concentração geográfica das usinas como ocorre no interior do estado de São Paulo, a estratégia de “clusterização” está sendo cada vez mais usada em busca de sinergia nas operações agrícolas. Nesse ponto, destaca-se que o modelo pode fornecer importantes informações para a sinergia buscada por esta estratégia.

Ainda no que tange as decisões estratégicas, ressalta-se que o modelo desenvolvido neste trabalho pode contribuir para a construção de cenários, no que se refere aos benefícios e oportunidades operacionais diante de estratégias de fusões e aquisições no setor sucroenergético.

Por fim, no que se refere ao pilar de desenvolvimento tecnológico no setor sucroenergético, destaca-se que o modelo desenvolvido apresenta potencial de contribuição para a Indústria 4.0 e a Agricultura 4.0, como ferramenta de apoio para desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente no que se refere à integração entre o sistema agrícola e o sistema industrial.

Nesse ponto, destaca-se que todos os pilares de implicação gerencial favorecem o processo de tomada de decisão, com base em dados confiáveis e cenários gerados com agilidade. De modo que essa tomada de decisão é capaz de incrementar melhorias ao processo e refletir em redução de custo operacional, que por sua vez, considerando a dinâmica do setor sucroenergético, é uma fonte de vantagem competitiva.

Diante do exposto, nota-se que o modelo supre algumas lacunas teóricas, consolidando sua contribuição para o incremento da base teórica de gestão de operação no setor sucroenergético. Além disso, com as implicações gerenciais evidencia-se a aplicação prática do modelo desenvolvido, que é capaz de contribuir para o gerenciamento das operações de CTT da cana-de-açúcar.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação computacional das operações de corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar, para apoiar a tomada de decisão e o gerenciamento operacional, com foco no fluxo da colheita e abastecimento industrial.

Para isso, foi realizado um *Design Science Research* baseado em um levantamento de dados das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, em uma empresa que atua no setor sucroenergético localizada no interior do estado de São Paulo. O estudo foi fundamentado em quatro etapas, sendo: a) o mapeamento dos processos de CTT; b) a modelagem conceitual e computacional do processo de CTT; c) os testes e validações do modelo construído no software Promodel; d) propostas para utilização prática do modelo de simulação das operações de CTT da cana-de-açúcar.

O mapeamento do processo proporcionou análises relevantes para a simplificação e definição das variáveis com maior representatividade e que apresentam maior impacto no modelo de simulação. Por sua vez, a etapa de modelagem dos processos contribuiu para a construção do modelo de simulação computacional no software Promodel, de modo que as operações de CTT tiveram suas etapas de colheita, transporte e recebimento de cana representadas pelo modelo.

Já a etapa de testes e validações proporcionaram a aprovação do modelo com um nível favorável de confiabilidade, frente à constatação de todas as funcionalidades propostas no modelo conceitual, e aos baixos desvios quando comparado o resultado real do sistema com o resultado simulado do modelo, nas mesmas condições de operação.

As propostas de utilização do modelo, além de sugerirem uma forma de operacionalização do modelo na rotina de planejamento das operações de CTT, também elencaram potenciais melhorias com a simulação de cenários. Neste ponto, ressalta-se que as melhorias apontadas, não se limitam, mas refletem em redução da estrutura de transporte do sistema de CTT com impacto calculado de R\$ 2.611.525 por safra, e melhora do fluxo de valor nas operações de CTT, possibilitando a identificação e eliminação de desperdícios no sistema produtivo.

Diante disso, destaca-se que o modelo de simulação computacional desenvolvido apresenta contribuições práticas para a gestão operacional do setor sucroenergético e teóricas para incrementar a base de conhecimento na área de pesquisa sobre gestão de organizações agroindustriais.

No que tange às contribuições práticas, salienta-se que o modelo proporciona condições para uma melhor tomada de decisão para: a) o planejamento operacional, diante do dimensionamento de estrutura e avaliação do fluxo de entrega de cana; b) decisões estratégicas, no que se refere às decisões de crescimento inorgânico e sinergias operacionais entre usinas; e c) desenvolvimento tecnológico, que contribui com o avanço dos movimentos da Indústria 4.0 e Agricultura 4.0.

Os elementos supracitados são fortes alavancas para a redução do custo das operações de CTT da cana-de-açúcar, de modo que, considerando que é a operação mais representativa no custo produtivo e que a dinâmica do setor é dada, predominantemente, pelo baixo custo, nota-se que essas contribuições práticas refletem em um fator de vantagem competitiva para a empresa.

O modelo de simulação computacional das operações do CTT apresentado neste trabalho, supre as seguintes lacunas que contribuem para sua originalidade e incrementam a base científica de gestão das operações agroindustriais: integração de todas as operações da cadeia, desde as frentes de colheita até a moagem; flexibilidade de configuração do modelo para gerar cenários com agilidade; modelo único capaz de simular o sistema em diferentes horizontes de tempo; modelo que representa um sistema com uma estrutura agrícola que fornece para mais de uma planta industrial.

Este trabalho é capaz de subsidiar pesquisas de inovação nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar. Nesse ponto, destaca-se que os objetivos propostos foram alcançados, de modo que foi desenvolvido um modelo de simulação computacional representativo das operações de CTT da cana-de-açúcar, que possibilitou a melhor compreensão do sistema estudado para a tomada de decisão e gestão operacional, assim como identificar e avaliar melhorias no fluxo de cana-de-açúcar. Ainda, ressalta-se a aplicação prática e aplicada deste estudo, que é o propósito do mestrado profissional.

No que tange às limitações do estudo, tem-se que o modelo é único, baseado nos dados e processos de uma empresa; e que foi elaborado em um único software, que não dispõe de simulação dinâmica. Além disso para construção do modelo foi necessário simplificar as operações das frentes de colheita e utilizar um local único com valores médios para representar as frentes de fornecedores.

Em relação à utilização da configuração do sistema da empresa estudada, destacam-se, entre outros fatores a quantidade de equipamentos e de frentes de colheita, que são particularidades do sistema estudado, e em caso de replicação deve-se considerar a revisão

desses pontos e de outras condições específicas. No entanto, como já visto, o fluxo de operação é representativo para o contexto sucroenergético atual.

A simplificação das operações das frentes de colheita e a utilização de um único local para as frentes de colheita de fornecedores, teve como objetivo facilitar a criação e a utilização do modelo. Como consequência foi perdido o detalhamento das operações de dentro desses locais e a possibilidade de variação dos cenários, de modo que tem-se controle somente com as variáveis de entrada e a taxa de produção das frentes, dada em toneladas por hora.

Apesar dessas limitações o modelo de simulação computacional desenvolvido neste trabalho pode ser replicado para outras empresas ou produtores do setor sucroenergético.

Como sugestão de trabalhos futuros, ressalta-se: a) o desenvolvimento de um modelo de simulação para as operações do CTT da cana-de-açúcar que tenha como objetivo uma visão de custos operacionais; b) a utilização do modelo de simulação computacional desenvolvido neste trabalho para realizar um estudo de otimização do sistema produtivo de corte, transbordo e transporte da empresa estudada; c) a utilização do modelo desenvolvido para suportar abordagens da filosofia Lean, como a análise da cadeia de valor das operações de CTT; d) a utilização do modelo para suportar o desenvolvimento de ferramentas relacionadas à Agricultura 4.0; e e) a replicação e adaptação deste modelo de simulação computacional para outras cadeias agroindustriais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAVIZADEH, A.; ORTEGA, M. J.; MIKHAIL, M. Teaching modeling and simulation in industrial engineering technology programs: a national survey. **American Society for Engineering Education**. New Orleans, LA, 2016

ANGELONI, M. T. Elementos intervenientes na tomada de decisão. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 32, n. 1, Apr, p. 17 - 22. 2003.

ARJONA, E.; BUENO, G.; SALAZAR, L. An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. **Computers and Electronics in Agriculture**, 32, p. 247–264. 2001. DOI: 10.1016/S0168-1699(01)00168-5.

BARBIERI, R. S.; CARVALHO, J. B. D.; SABBAG, O. J. Análise de viabilidade econômica de um confinamento de bovinos de corte. **Interações**, v. 17, n. 3, p. 357-369, 2016.

BARNES, A. J.; MEYER, E.; HANSEN A.C.; HARPE E.R.; LYNE P.W.L. Simulation modeling of sugarcane harvesting and transport delays. **Proceedings of The South African Sugar Technologists Association** p. 18-23, 1998.

BATEMAN, R. E. *et al.* **Sistemas de simulação**: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

BAYAZIT, N. Investigating Design: a review of forty years of design research, Massachusetts Institute of Technology. **Design Issues**, v. 20, n. 1, p. 16-29, 2004. DOI: 10.1162/074793604772933739.

BELARDO, G. C.; ROSA, J. H. M.; MAGALHÃES, P. S. G. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar: evolução da colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar. In: BELARDO, G. C. *et al.* **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar**. Jaboticabal: SBEA, p.335-356, 2015.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations Management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, pp.241-264, 2002.

BOCANEGRA-HERRERA, C. C.; VIDAL, C. J. Development of a simulation model as a decision support system for sugarcane supply. **DYNA**, v. 83, p. 180 – 186, 2016.

BOCHTIS, D.D.; SORENSEN C.G.C.; BUSATO P. Advances in agricultural machinery management: A review. **Biosystems engineering**, vol. 126 p.69-81, 2014.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. **Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 26, n 1, jan-abr, p. 300-308, 2006.

BURGOYNE, J.; JAMES, K. T. Towards Best or Better Practice in Corporate Leadership Development: Operational Issues in Mode 2 and Design Science Research. **British Journal of Management**, v. 17, p. 303-316, 2005. DOI: 10.1111/j.1467-8551.2005.00468.x

BUSATO, P. A simulation model for a rice-harvesting chain. **Biosystems engineering**, vol. 149 p.149-149, 2014

ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 35, p. 77-87, 2011. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.003

CAMARGO, A. M. M. P.; CASER, D. V.; CAMARGO, F. P.; OLIVETTE, M. P. A.; SACHS, R. C. C.; TORQUATO, S. A. Dinâmica e tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias, Estado de São Paulo, 2001-2006. **Informações Econômicas**, [s.l.] v. 38, n. 3. SP: Governo do Estado de São Paulo, mar. 2008.

CANEDO, F. N.; SILVA, E. W. **Modelagem utilizando o software Arena para a determinação do melhor dimensionamento do atendimento**: aplicação em uma casa lotérica na cidade de Catalão-GO. In – VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa. PR. Brasil. 2017. Anais eletrônicos [...] Ponta Grossa. 2017. Disponível em: <http://anteriores.aprepro.org.br/combrep/2017/anais.php?ordem01=titulo&ordem02=autor>, acesso em: 19 jan. 2021.

CARREIRA, M. L. **Desempenho operacional, econômico e energético do transporte de cana-de-açúcar: um estudo de caso**. 2011. 82 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M. S. T.; SILVA, H. O. F.; ISLER, P. R.; OLIVEIRA, P. A. Avaliação do desempenho operacional da colheita e transbordo de cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 3, p. 232-241, 2015.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.. **Metodologia científica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria & Aplicações**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento 2021. Observatório agrícola. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. V. 7. Safra 2020/21. N. 4. Maio 2021. Disponível em < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>, acesso em 15 jun. 2021.

CORTEZ, J. W. *et al.* Quality of sugarcane mechanized planting. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural**, v. 36, n. 6, p. 1136-1144, 2016.

CUNHA, J.P.B.; SILVA, F.M.; ANDRADE E.T.; CARVALHO, L.C.C. Modeling of operational performance parameters applied in mechanized harvest of coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.20 n.10 p.946-952, 2016.

DÍAZ, J.A.; PÉREZ, I.G. Simulation and optimization of sugarcane transportation in harvest season. **Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference**. p. 1114-1117, 2000.

FARIA, D. A. F.; FRAZÃO, M. L. S.; VIEIRA, J. G. V.; SILVA J. E. A. R.; LEMOS, P. H. A combination of discrete event simulation and multi-criteria analyses to configure sugarcane drop and hook delivery systems. **EAGRI – Engenharia Agrícola**, p. 248 – 256, 2019.

FNQ. Fundação Nacional de Qualidade. **Sistema de indicadores**. 16 p. 2020. Disponível em: <https://fnq.org.br/comunidade/?s=indicadores+de+desempenho>, acesso em: 20 dez. 2020.

FREITAS, W. R. S.; JABBOUR, C. J. C. Utilizando estudo de caso(s) como estratégia de pesquisa qualitativa: boas práticas e sugestões. **Estudo & Debate**, Lajeado, v. 18, n. 2, p. 07-22, 2011.

FRIGERI, J. A.; BIANCHI, M.; BACKES, R. G. Um Estudo Sobre o Uso das Técnicas de Simulação no Processo de Elaboração e Execução dos Planejamentos Estratégico e Operacional. **ConTexto**. V.7, n. 12, Porto Alegre, p. 1-24, 2007.

GASS, S. I.; ASSAD, A. A. **An annotated timeline of operations research: an informal history**. Nova York: Kluwer Academic Publishers. 2004.

GODOY, A. S.. A pesquisa qualitativa e sua utilização em administração de empresas. **Revista de Administração de Empresas**. São Paulo, v. 35, n. 4, p.65-71, jul./ago. 1995a.

GODOY, A. S.. Introdução a pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de Administração de Empresas**. São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, Mar./Abr. 1995b.

GRUNOW, M.; GÜNTHER, H.-O.; WESTINNER, R. Supply optimization for the production of raw sugar. **International Journal of Production Economics**, 110, p. 224–239, 2007. DOI: 10.1016/j.ijpe.2007.02.019.

GUERRA, M. CTT: Transformando Aço em Números. **Revista Canavieiros**. N. 141. Ano XI. Março, p. 30-47, 2018.

HARREL, C. R.; TUMAY, K. **Simulation made easy: a manager's guide**. Norcross: Engineering and Management Press, 1995.

HIGGINS A. J.; DAVIES, I. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture**. 47 p. 85-102, 2005.

HIGGINS, A.J.; MUCHOW, R.C.; RUDD, A.V.; FORD, A.W. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**. 57 p. 153-162, 1998.

HOPP, W.J.; SPEARMAN, M.L. **A ciência da fábrica**. 3ª edição. São Paulo: Bookman, 2013.

IANNONI, A. P.; MORABITO, R. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 42, p.191–210, 2006. DOI: 10.1016/j.tre.2004.10.002.

IANNONI, A. P.; MORABITO, R. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção**. v.9 n.2 p. 107-128, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa de Produção Agrícola Municipal – PAM. 2017. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agriculturaapecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporariaspermanentes.html?=&t=resultados>>, acesso em 25 jul. 2019.

IDEA. **Indicadores de desempenho da agroindústria canavieira: safras 2010/22 e 2011/12.** Nunes Junior, D. (Coord.) 100p. 2012.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J.A.V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**. v.20 n.4 p. 741-761, 2013.

LAMSAL, K.; JONES, P. C.; THOMAS, B. W. Sugarcane Harvest Logistics in Brazil. **Transportation Science** 51, p. 771-789, 2017. DOI: 10.1287/trsc.2015.0650.

LE GAL, P. Y.; LE MASSON, J.; BEZUIDENHOUT, C. N.; LAGRANGE, L. F. Coupled modelling of sugarcane supply planning and logistics as a management tool. **Computers and Electronics in Agriculture**, 68, Elsevier. p. 168-177. 2009. DOI: 10.1016/j.compag.2009.05.006.

LIEBSCHER, P. Quantity with quality? Teaching quantitative and qualitative methods in a LIS Master's program. **Library Trends**, v. 46, n. 4, p. 668-680, 1998.

LLEWELLYN, S.; NORTHCOTT, D. The “singular view” in management case studies qualitative research in organizations and management. **An International Journal**, v. 2, n. 3, p. 194-207, 2007.

MACHADO, A. M.; VIEIRA, J. C. L.; BOCCALETTI, H.; SURIAN, S. S. Logística na colheita mecanizada da cana-de-açúcar: corte, transbordo e transporte. **Revista Perspectiva em Educação, Gestão & Tecnologia**, V.7, n. 13, jan-jun 2018.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2021. Secretária de Política Agrícola. Departamento de Café, Cana-de-Açúcar e Agroenergia. Produção brasileira de cana-de-açúcar, açúcar e etanol. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao>>, acesso em 21 jun. 2021.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research in Information Technology. **Decision Support Systems**, v. 15, p. 251-266, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](http://dx.doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2012.

MASOUD, M.; KOZAN, E.; KENT, G. A job-shop scheduling approach for optimizing sugarcane rail operations. **Springer Science + Business Media**. p. 181 – 206. 2011. DOI: 10.1007/s10696-011-9092-5.

MILAN, E. L.; FERNANDEZ, S. M.; ARAGONES, L. M. P. Sugar cane transportation in Cuba, a case study. **European Journal of Operational Research**, 174, p. 374–386, 2006. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.01.028.

MILAN, E. L.; ARAGONES, L. M. P. A decision support system to manage the supply chain of sugar cane. **Springer Science + Business Media**. p. 285-297, 2014. DOI: 10.1007/s10479-013-1361-0.

MILAN, M. **Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar cane in Brazil**. 1992. 241 p. Thesis (PhD. in Agricultural Engineering) Cranfield Institute of Technology, Silsoe College, 1992.

MILAN, M.; ROSA, J. H. M. Corte, transbordo e transporte (CTT): aspectos relevantes e uso de modelagem para CTT. In: BELARDO, G. C. *et al.* **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar**. Jaboticabal: SBEA, p.415-428, 2015.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (Org.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 167 – 195. 2018.

MUNDIM, J.U.C. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

NAYLOR, T. H. *et al.* **Técnicas de simulação em computadores**. Petrópolis: Vozes, 1971.

NEVES, M. *et al.* **Mapeamento e quantificação da cadeia sucroenergética na safra 2013/2014**. Mimeo, 2014.

NIKAKHTAR, A.; WONG, K. Y.; ZAREI, M. H.; MEMARI, A. Comparison of two simulation software systems for modelling a construction process. In – **Third International Conference on Computational Intelligence, Modelling & Simulation**, p. 200 -205, 2011.

NOVA CANA. Portal Nova Cana. Setor sucroenergético enfrenta custos mais altos de produção na temporada 2018/19. 2019. Disponível em <<https://www.novacana.com/n/cana/safra/cresce-custo-producao-cana-de-acucar-safra-2018-19-290119>>, acesso em 24 jul. 2019.

OLIVEIRA, M. A. E. Gerenciamento de sistemas mecanizados: seleção de colhedoras. In: BELARDO, G. C. *et al.* **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar**. Jaboticabal: SBEA, p. 569-587, 2015.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>, acesso em 27 set. 2019.

PAES, L.A.D. Levantamento dos níveis de impurezas nas últimas safras. In: **Impurezas e Qualidade da Cana-de-Açúcar**, 2011, Sertãozinho. Anais... Sertãozinho, 2011.

PAIM, R.; PINHO, B.; CAPPELLI, C.; LIMA, L.; NASCIMENTO, L.; SENNA, P. **Metodologia e Ferramentas para Simulação de Processos**. Relatórios Técnicos do Departamento de Informática Aplicada da UNIRIO. UFRJ, 2009.

PATITAD, P.; WATANABE, W. C.; WICHAISRI, S. A simulation study on sugarcane truck system for inbound logistics improvement. **IEEE 7<sup>th</sup> International Conference on Industrial Engineering and Applications**, 2020.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Esalq. 78 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto Campo Futuro. 2015. Disponível em <<https://projetos.pecege.com/wp-content/uploads/2018/10/2014.15.pdf>>, acesso em 25 jul. 2019.

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

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman. 1998.

PIMENTEL, C. **Aplicação da simulação como ferramenta de apoio à tomada de decisão gerencial em uma célula de manufatura**. 2015. 86 f. Dissertação Mestrado em Engenharia de Produção. Unimep. 2015. Disponível em < [https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/docs/19052015\\_143840\\_carolinealcaldepimentel\\_ok.pdf](https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/docs/19052015_143840_carolinealcaldepimentel_ok.pdf)>, acesso em 25 jul. 2019.

PIMENTEL, M.; FILIPPO, D.; SANTOS, T.M. Design Science Research: pesquisa científica atrelada ao design de artefatos. **Revista de Educação a Distância e Elearning**, v. 3 n. 1, p. 37-61, 2020.

PRADO, D. S.. **Teoria das filas e da simulação**. 6. ed. São Paulo: Falconi, 2017.

PRITSKER, A. A. B. **Introduction to simulation and SLAM II**. 4 ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1995.

RAMOS, R.P. **Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização**. 2014. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

RANGEL, J. J. A.; AZEVEDO, L. R.; FRANCISCO, L. E. S.; CUNHA, A. P.; VIANNA, D. S. **Análise do sistema de recepção de cana-de-açúcar no pátio de uma usina**. In XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, BA, Brasil, 2009a. Anais eletrônicos [...] Salvador. 2009. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_tn\\_sto\\_096\\_652\\_13434.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_sto_096_652_13434.pdf), acesso em: 19 jan. 2021.

RANGEL, J. J. A.; FRANCISCO, L. E. S.; AZEVEDO, L. R.; CUNHA, A. P.; VIANNA, D. S. **Modelo de simulação para análise de lead time da cana-de-açúcar transportada para uma usina**. In XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Porto Seguro, BA, Brasil, 2009b. Anais eletrônicos [...] Porto Seguro. 2009. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2009/artigos/54371.pdf>, acesso em: 19 jan. 2021.

RIPOLI, T. C. C. Ensaio e certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudo “Luiz de Queiroz”. cap.13, p.635-673, 1996.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; VICENTI; CASAGRANDI, D.; IDE, B. Y. **Plantio de Cana-de-Açúcar: Estado da Arte**. 2ª Ed. Piracicaba. 2007.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográficas, histórica e ambiental**. 1ª Ed. Uberlândia: Edufu, 2020.

ROSA, J.H.M. **Avaliação do desempenho efetivo e econômico de uma colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) em espaçamento duplo alternado**. 2013. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

ROSA, J.H.M. **Dimensionamento operacional e econômico da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): modelo computacional como ferramenta de apoio a tomadas de decisão**. 2017. 96 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. **Estudo comparativo de softwares de simulação de eventos discretos aplicados na modelagem de um exemplo de Loja de Serviços**. – in XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Ouro Preto, MG, Brasil, 2003. Anais eletrônicos [...] Ouro Preto. 2017. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2003\\_tr0104\\_0436.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2003_tr0104_0436.pdf), acesso em: 19 jan. 2021.

SALASSI, M.E; CHAMPAGNE, L.P. A spreadsheet-based cost model for sugarcane harvesting systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, 20 p. 215-227. 1998.

SALIBY, E. Softwares para simulação. **Anais do Workshop de Simulação**, Rio de Janeiro: Coppead, p. 17 – 22, 1997.

SCHRIBER, T. J.; BRUNNER, D. T.; SMITH, J. S. Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters. In - **Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference**, p. 735 – 749, 2017.

SCOPINHO, R. A. Controle social do trabalho no setor sucroalcooleiro: reflexões sobre o comportamento das empresas, do Estado e dos movimentos sociais organizados. **Cadernos de Psicologia Social do Trabalho**. São Paulo, v. 7, p. 11-29, 2004

SCOPINHO, R.A.; EID, F., VIAN, C.E.F.; SILVA, P.R.C. Novas tecnologias e Saúde do Trabalhador: a mecanização do corte da cana-de-açúcar. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 15(1), p. 147-161, jan-mar, 1999.

SHANNON, R.E. Introduction to the art and science of simulation. **Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference**, p.65-73, 1992.

SHANNON, R.E. **Simulation Modeling and Methodology**, Simuletter, v.8, n.3,1977.

SILVA, A.T.B. **Modelagem e simulação de processos (corte, carregamento e transporte) na produção agrícola de açúcar e álcool**. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia Civil Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2012

SILVA, F. I. C.; GARCIA, A.. Colheita mecânica e manual da cana-de-açúcar: histórico e análise. **Nucleus**, v.6, n.1, abr., p. 233 – 248. 2009.

SILVA, J.E.A.R.; ALVES, M.R.P.A.; COSTA, M.A.B. Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. **Gestão & Produção**. São Carlos v. 18 n. 1 p. 73-90, 2011.

SILVA, J.E.A.R. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 2006.

SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial**. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 1996.

SINGH, G; PATHAK, B.K. A decision support system for mechanical harvesting and transportation of sugarcane in Thailand. **Computers and Electronics in Agriculture** 11 p. 173-182, 1994.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R.. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009.

SOUZA, O. T. D.; BAGOLIN, I. P.; CORONA, H. M. P. A publicização do campo: políticas agrícolas e de desenvolvimento frente às múltiplas funções do espaço rural. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 18, n. 1, p. 193-219, 2010.

TOMAZELA, M. G. J. M.; LEANDRO, C. R.; OLIVEIRA, M. C.; CAMPOS, F. C. Simulação de eventos discretos na avaliação de um processo de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. **Revista Espacios**, vol. 38, nº 21. p. 41, 2017.

TUMAY, K. Business process simulation. **Winter Simulation Conference**, SCS, San Diego, CA, p.93-98, 1996.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P.. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção: Estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. Apostila do curso de especialização em qualidade e produtividade (Pós-Graduação) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2012.

VAISHNAVI, V. K., e KUECHLER, W. **Design science research methods and patterns: innovating information and communication technology**. Crc Press. 2015.

VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004. DOI: 10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x

VEIGA FILHO, A. A. Análise da mecanização do corte da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.24, n.10, p.44-59, out.1994.

VEIGA FILHO, A. A. Estudo do processo de mecanização do corte na cana-de-açúcar: o caso do Estado de São Paulo. **Recitec**, Recife, v. 3, n.1, p.74-99, 1999.

VEIGA, C.F.M.; VIEIRA, J.R.; MORGADO, I. F. **Diagnóstico da cadeia produtiva de cana-de-açúcar do estado do Rio de Janeiro**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 107p. 2006.

VERNADAT, F. B. **Enterprise Modeling and Integration**. London: Chapman & Hall. 1996.

VIAN, C. E. F.; SILVA, G. P.; BARICELO, L. G.; PISSINATO, B. Evolução da produção e mecanização da cana. Evolução da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: Desafios e Perspectivas. In: BELARDO, G. C. *et al.* **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar**. Jaboticabal: SBEA, p.73-88, 2015.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

ZAKIDIZAJI, I.H., BOUGARI E., KHORASANI, M.E. Simulation of economic damage at mechanized wheat harvesting in Khuzestan province of Iran. **Iran Agricultural Research** (2017) 36(1), 2016.

ZANELLI, J. C. Pesquisa qualitativa em estudos da gestão de pessoas. **Estudos da Psicologia**, n. 7, p. 79-88, 2002.

ZHOU, K. **Simulation Modelling for In-field Planning of Sequential Machinery Operations in Cropping Systems**. PhD Thesys Aarhus University Department of Engineering. Denmark. 2015.

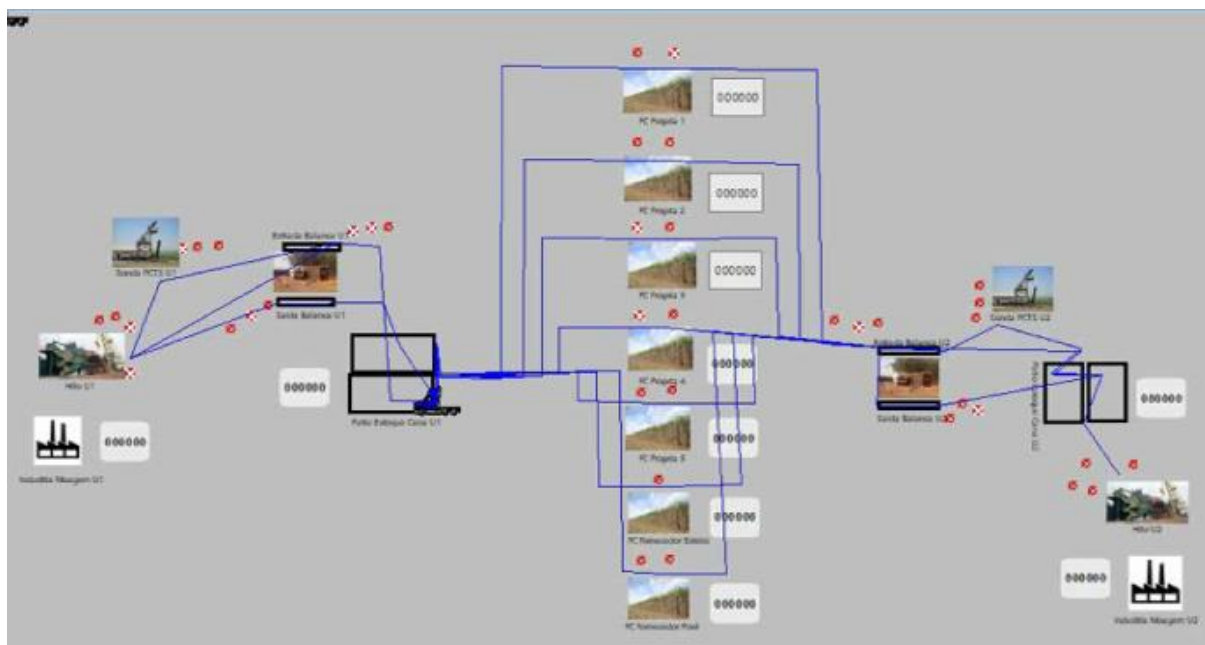
## APÊNDICE A – VÍDEOS: PROCESSO CTT E SIMULAÇÃO DO MODELO

### Vídeo – Processo CTT



Link: <https://youtu.be/ru6nNg3ImtY>

### Vídeo – Simulação do Modelo no Promodel



Link: <https://youtu.be/jCs9M2VNVeQ>

## APÊNDICE B – PROTOCOLO DE PESQUISA

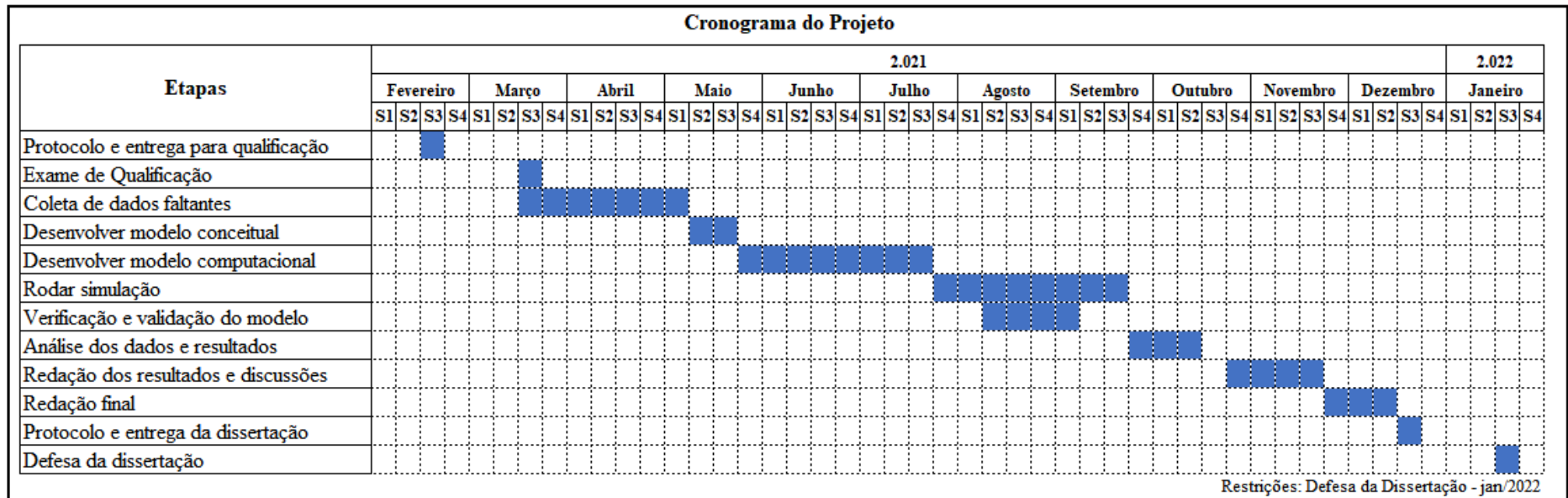
<b>Problema de Pesquisa</b>	Como desenvolver um modelo de simulação computacional, que seja capaz de antecipar situações e contribuir com a tomada de decisão no gerenciamento das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, de modo que aumente a linearidade do abastecimento industrial sem sobredimensionar a estrutura de CTT?			
<b>Objetivo Geral</b>	O objetivo desta dissertação é desenvolver um modelo de simulação computacional, capaz de realizar uma abordagem probabilística e integrativa das operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, para apoiar a tomada de decisão no gerenciamento operacional, com foco na linearidade do abastecimento industrial.			
<b>Descrição da Unidade de Análise</b>	Será realizado um estudo de caso nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, em uma das unidades de negócio de um grupo francês com atuação no setor sucroenergético, o qual apresenta suas operações voltadas ao agronegócio e que conta com 7 unidades de processamento de cana-de-açúcar no Noroeste do estado de São Paulo.			
<b>Etapa da pesquisa</b>	<b>Relevância</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Instrumento de Coleta</b>	<b>Fonte dos dados</b>
Etapa 1: Definição do escopo e mapeamento dos processos	Esta etapa é importante para: a. documentar o processo e suas variáveis, garantindo o conhecimento das relações existentes; b. delimitar o escopo do modelo que será criado, a partir da definição do seu objetivo, sua métrica e do software que será usado para desenvolvê-lo; c. desenvolver um protocolo de pesquisa para estruturar a coleta de dados de forma organizada e objetiva.	Espera-se como resultado dessa etapa: a. as operações de CTT mapeadas, a partir de fluxogramas de processos, contendo todas suas variáveis, de forma completa, mas objetiva; b. as diretrizes para a construção do modelo definidas (objetivo, perguntas a serem respondidas e métrica), e o software que será usado selecionado, de forma a contribuir com a construção do modelo das operações de CTT; c. o protocolo de pesquisa desenvolvido, contemplando todo o planejamento de coleta de dados.	Entrevistas; Observação; Análise de documentos	Todos entrevistados (Roteiro de Pesquisa); Frentes de colheita; Entrada da unidade industrial; Fluxo de processos; Literatura e manuais (definição software)
Etapa 2: Modelagem do processo	Esta etapa é importante para: a. identificar as variáveis que são mais significativas para o modelo; b. garantir que os valores usados no modelo representam a realidade e são adequados à métrica adotada; c. confeccionar um modelo representativo com usabilidade e utilidade operacional, capaz de realizar uma abordagem probabilística e integrativa das operações do CTT.	Espera-se como resultado dessa etapa: a. a relação das variáveis que serão integradas ao modelo, com seu impacto no processo mensurado e adequada à métrica de cálculo definida; b. um modelo de simulação computacional das operações de CTT, desenvolvido no software de simulação escolhido, contendo as variáveis selecionadas e representativo frente à realidade.	Análise de documentos (Base de dados); Entrevistas	Softwares de apoio à gestão (ERP, Solinftec, etc); Gerente de Operações Agrícolas e Gestor de Motomecanização.
Etapa 3: Teste e validação da representatividade do modelo	Esta etapa é importante para: a. revisar se a seleção de variáveis foi adequada e se as relações do modelo são coerentes; b. garantir que o modelo de simulação computacional criado é representativo frente à realidade do processo, com usabilidade e utilidade operacional; c. marcar o término do desenvolvimento do modelo.	Espera-se como resultado dessa etapa: a. a validação do modelo de simulação computacional criado, a partir da realização de testes e comprovação da sua representatividade perante à realidade das operações de CTT.	Observação; Análise de documentos (Base de dados)	Entrada da unidade industrial; Softwares de apoio à gestão (ERP, Solinftec, etc)
Etapa 4: Utilização do modelo	Esta etapa é importante para: a. documentar como o modelo de simulação pode ser inserido na organização para apoiar a tomada de decisão no gerenciamento operacional; b. evidenciar a capacidade do modelo de melhorar as operações de CTT com foco na linearidade do abastecimento industrial.	Espera-se como resultado dessa etapa: a. oportunidades de melhorias, nas operações de CTT, elencadas, a partir da simulação do modelo desenvolvido; b. um fluxo de utilização do modelo, que possibilite sua utilização na rotina organizacional, para apoiar a tomada de decisão no gerenciamento operacional das operações de CTT.	Entrevistas	Gerente de Operações Agrícolas e Gestor de Motomecanização

## APÊNDICE C – ROTEIRO DE PESQUISA

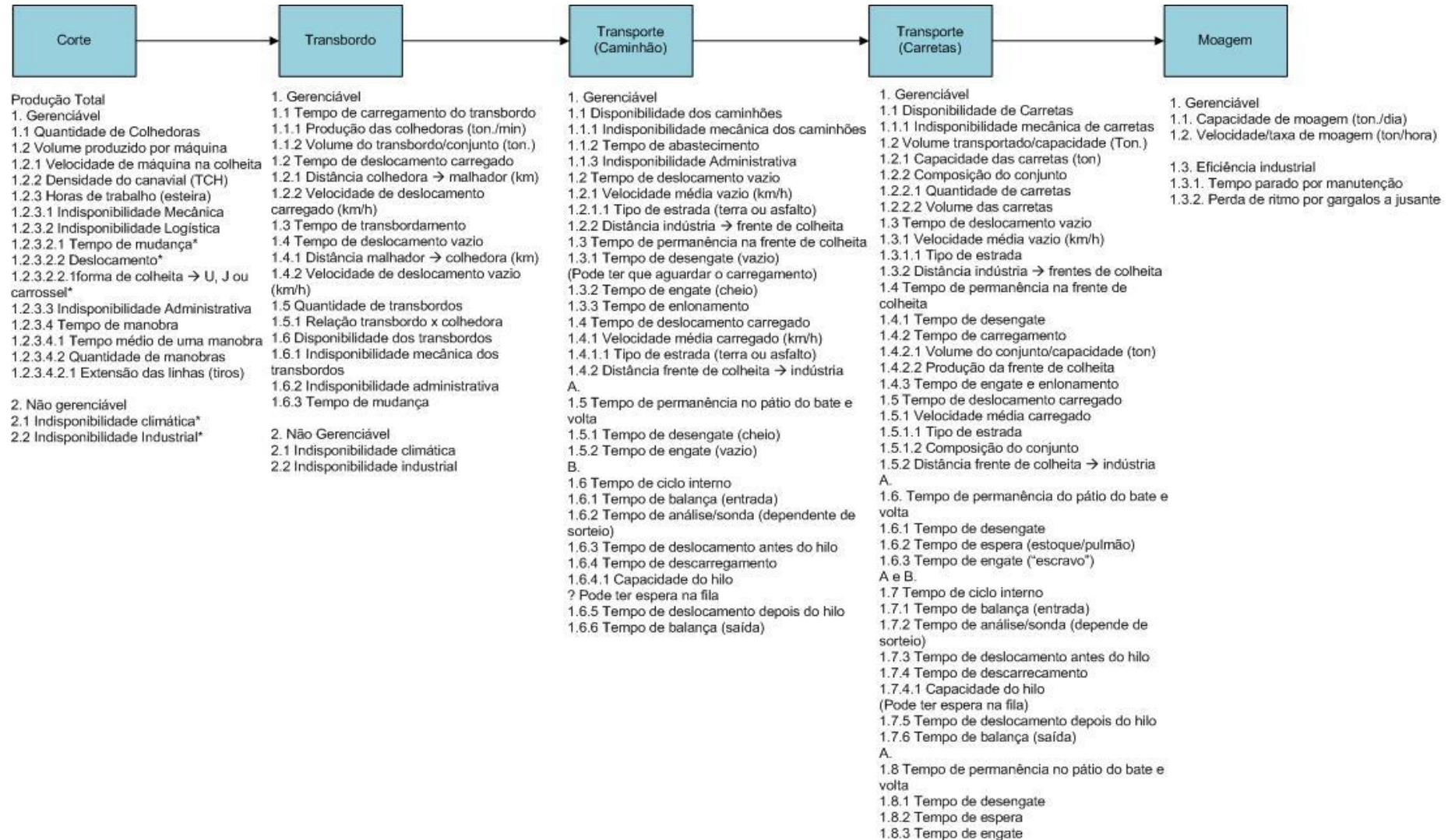
Legenda: <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> E1 Etapa 1: Definição do escopo e mapeamento dos processos</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> E2 Etapa 2: Modelagem do processo</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> E3 Etapa 3: Teste e validação da representatividade do modelo</div> <div style="display: flex; align-items: center;"><span style="width: 15px; height: 10px; background-color: #FF4500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> E4 Etapa 4: Utilização do modelo</div> </div>	Pessoas						Documentos/Base de dados				Locais		Literatura	
	Gerente de Op. Agrícolas	Gestor de Motomecanização	Supervisor de Operação	Engenheiro CTT	Gestor de Extração	Especialista de Op. Integradas	Solinftec	Logtrac	ERP	Fluxogramas de processos	Frentes de Colheita	Entrada da usina		
Qual software utilizar para desenvolver o modelo?														E1
Como funciona os processos de CTT da cana-de-açúcar?	E1	E1	E1	E1						E1	E1	E1		
Quais variáveis impactam no processo de corte e transbordo?	E1	E1	E1	E1						E1	E1	E1		
Existe uma classificação que estratifica essas variáveis (corte e transbordo)?	E1	E1	E1	E1										
O que impacta na colheabilidade?	E1	E1	E1	E1										
Existe uma classificação dos blocos, de acordo com sua produtividade? Se sim, qual?	E1	E1	E1	E1										
Quais variáveis impactam no processo de transporte?	E1	E1	E1	E1						E1	E1	E1		
Qual é a distância média das frentes de colheita? Máxima? Mínima?		E2	E2				E2		E2					
Qual a velocidade média do transporte?		E2	E2				E2							
Quais as diferenças/impacto do transporte em estrada de terra e rodovias?	E2	E2	E2	E2			E2				E2			
Como é o processo a partir do momento que a cana-de-açúcar chega na usina (pátio)?	E1	E1	E1	E1	E1	E1							E1	
Como é feito o sequenciamento das carretas que entram na usina?		E1		E1									E1	
Como são selecionados os equipamentos que passam pela sonda?		E2		E2									E2	
Existe diferenciação entre terceiros e próprios para entrada na usina?		E2		E2									E2	
Quanto tempo os caminhões ficam dentro da usina? Onde encontrar esse dado?		E2		E2			E2	E2	E2				E2	
Quantas frentes de colheita existem? Quantas próprias? Quantas terceiras?	E1	E1	E1	E1							E1			
Qual estrutura de equipamentos atende cada frente? Quantas colhedoras? Quantos transbordos?	E1	E1	E1	E1			E1				E1			
Qual a densidade de cana-de-açúcar (TCH) das frentes de colheita? Há como classificá-la?	E2	E2		E2					E2					
Qual a disponibilidade dos equipamentos nas frentes de colheita (colhedoras e transbordos)?				E2			E2							
Quais tipos de carretas existem no parque? Qual a capacidade de carga de cada tipo?	E1	E1	E1	E1									E1	
Quantas carretas existem de cada tipo?	E1	E1	E1	E1				E1						
Qual a formação dos conjuntos (quantos treminhados e quantos bi-trems)?	E1	E1		E1										
Quantos caminhões faz o transporte? Quantos próprios? Quantos terceiros?	E1	E1		E1					E1					
Quantos caminhões são usados para descarregamento ("escravos")?	E1	E1		E1										
Qual a disponibilidade dos equipamentos de transporte (caminhões e carretas)?		E2		E2			E2	E2						
Qual é o ritmo de moagem industrial?					E2	E2			E2					
Como é contabilizada a medição da entrada de cana-de-açúcar? Onde está o histórico?					E2	E2			E2					
Como é medido o volume de moagem? Onde é feita a medição? Quando é contabilizada a moagem?					E1	E1								
Como é feito o planejamento das operações de CTT?	E4	E4		E4										
Qual a frequência do planejamento das operações do CTT?	E4	E4		E4										
Quais informações são consideradas para o planejamento (visando o volume de cana)?	E4	E4		E4										
Qual o volume (fila) de cana-de-açúcar na entrada da usina (pátio)?		E3		E3					E3				E3	
Qual o volume (fila) de cana-de-açúcar no hilo (início moagem)?		E3		E3					E3				E3	

### APÊNDICE D – CRONOGRAMA DO PROJETO

Este apêndice apresenta o cronograma com as etapas finais da dissertação e como foi realizada a modelagem e simulação das operações de CTT. Neste cronograma, são abordados desde o protocolo e entrega para qualificação da pesquisa até a data da defesa da dissertação, de modo que entre essas etapas foram realizados: a) coleta de dados; b) desenvolvimento do modelo conceitual; c) desenvolvimento do modelo computacional; d) rodadas de simulação; e) verificação e validação do modelo; f) análise dos dados e resultados; g) redação dos resultados e discussões; e h) redação final. Destaca-se que o cronograma está de acordo com os prazos do Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Administração.



## APÊNDICE E – MAPEAMENTO VARIÁVEIS DAS ETAPAS DO PROCESSO



Obs. A maior parte da indisponibilidade logística é dada pela inter-relação entre as etapas e se transformará em filas no modelo

**APÊNDICE F – DISTRIBUIÇÃO TEMPOS PRODUTIVOS DE COLHEDORA**

FC Próprias	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Corte de Cana	Manobra
<b>Localização</b>					
<b>Média</b>	2,63%	15,76%	8,31%	61,27%	12,15%
<b>Mínimo</b>	0,00%	4,31%	0,00%	46,00%	2,13%
<b>Máximo</b>	10,86%	39,70%	31,46%	80,33%	26,62%
<b>Percentis</b>					
<b>1%</b>	0,18%	5,57%	0,22%	46,25%	3,81%
<b>3%</b>	0,77%	7,79%	1,48%	46,96%	5,29%
<b>5%</b>	0,94%	8,29%	2,14%	48,88%	6,40%
<b>8%</b>	1,11%	9,00%	2,87%	49,97%	6,88%
<b>10%</b>	1,18%	9,52%	3,22%	51,32%	7,28%
<b>15%</b>	1,42%	10,34%	4,09%	53,14%	8,05%
<b>20%</b>	1,59%	11,15%	4,93%	54,69%	8,61%
<b>25%</b>	1,70%	12,00%	5,38%	56,27%	9,17%
<b>30%</b>	1,81%	12,75%	5,73%	57,02%	9,77%
<b>35%</b>	1,98%	13,21%	6,18%	57,72%	10,30%
<b>40%</b>	2,12%	13,72%	6,64%	59,02%	10,85%
<b>45%</b>	2,21%	14,43%	7,26%	60,14%	11,31%
<b>50%</b>	2,31%	14,84%	7,89%	61,27%	11,72%
<b>55%</b>	2,58%	15,57%	8,46%	62,00%	12,24%
<b>60%</b>	2,77%	16,16%	8,75%	63,41%	12,75%
<b>65%</b>	2,90%	17,16%	9,36%	64,27%	13,45%
<b>70%</b>	3,06%	17,73%	9,97%	65,70%	13,98%
<b>75%</b>	3,24%	18,56%	10,37%	66,83%	14,77%
<b>80%</b>	3,38%	19,56%	11,22%	67,81%	15,59%
<b>85%</b>	3,67%	21,21%	12,60%	69,08%	16,29%
<b>90%</b>	4,15%	23,49%	13,96%	70,22%	17,53%
<b>92%</b>	4,57%	24,25%	14,52%	70,99%	18,07%
<b>95%</b>	5,12%	25,69%	15,83%	72,65%	19,41%
<b>97%</b>	6,00%	27,33%	18,22%	74,45%	21,05%
<b>99%</b>	9,85%	35,70%	22,94%	78,32%	23,44%

FC1	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Corte de Cana	Manobra
<b>Localização</b>					
<b>Média</b>	2,94%	16,09%	9,72%	59,80%	11,31%
<b>Mínimo</b>	0,37%	7,89%	1,48%	46,25%	2,13%
<b>Máximo</b>	6,82%	34,30%	28,36%	75,08%	19,58%
<b>Percentis</b>					
<b>1%</b>	-	-	-	-	-
<b>3%</b>	0,70%	8,98%	3,44%	46,90%	4,10%
<b>5%</b>	1,16%	9,94%	3,99%	47,09%	5,46%
<b>8%</b>	1,23%	10,44%	4,87%	49,58%	6,97%
<b>10%</b>	1,31%	10,65%	5,02%	49,67%	7,15%
<b>15%</b>	1,70%	11,12%	5,62%	52,41%	7,36%
<b>20%</b>	1,81%	11,54%	5,88%	53,13%	7,92%
<b>25%</b>	2,05%	12,23%	6,24%	54,56%	8,22%
<b>30%</b>	2,24%	13,38%	6,60%	56,42%	8,57%
<b>35%</b>	2,65%	13,78%	7,40%	57,18%	9,54%
<b>40%</b>	2,79%	14,52%	8,12%	57,88%	9,91%
<b>45%</b>	2,87%	14,77%	8,64%	58,92%	10,34%
<b>50%</b>	3,06%	15,40%	8,77%	59,25%	11,29%
<b>55%</b>	3,15%	15,85%	9,23%	60,37%	11,71%
<b>60%</b>	3,29%	16,63%	9,69%	61,61%	12,26%
<b>65%</b>	3,36%	17,22%	10,27%	62,89%	12,77%
<b>70%</b>	3,45%	17,59%	11,11%	63,84%	13,45%
<b>75%</b>	3,55%	18,38%	12,22%	65,38%	14,05%
<b>80%</b>	3,75%	19,14%	13,11%	66,92%	14,89%
<b>85%</b>	4,06%	21,16%	14,20%	67,82%	15,77%
<b>90%</b>	4,52%	23,04%	15,88%	69,01%	16,64%
<b>92%</b>	4,62%	24,12%	17,25%	70,55%	17,05%
<b>95%</b>	5,08%	26,77%	18,66%	72,62%	18,03%
<b>97%</b>	5,44%	27,57%	21,73%	73,65%	18,57%
<b>99%</b>	-	-	-	-	-

FC2	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Corte de Cana	Manobra
<b>Localização</b>					
<b>Média</b>	2,27%	19,58%	7,78%	58,21%	12,06%
<b>Mínimo</b>	0,00%	8,56%	0,95%	46,36%	5,30%
<b>Máximo</b>	6,05%	37,35%	18,78%	71,25%	22,86%
<b>Percentis</b>					
<b>1%</b>	-	-	-	-	-
<b>3%</b>	0,81%	12,56%	1,55%	47,46%	6,47%
<b>5%</b>	1,03%	12,87%	2,00%	48,19%	6,72%
<b>8%</b>	1,16%	13,31%	2,44%	48,64%	7,21%
<b>10%</b>	1,19%	14,38%	2,67%	49,20%	7,49%
<b>15%</b>	1,32%	15,23%	3,43%	51,62%	8,38%
<b>20%</b>	1,48%	15,59%	4,23%	52,28%	8,67%
<b>25%</b>	1,58%	16,13%	4,94%	54,07%	8,93%
<b>30%</b>	1,63%	17,08%	5,25%	55,20%	9,15%
<b>35%</b>	1,70%	17,55%	5,75%	56,11%	9,77%
<b>40%</b>	1,90%	18,15%	6,16%	56,57%	10,73%
<b>45%</b>	2,04%	18,63%	6,64%	57,23%	11,17%
<b>50%</b>	2,13%	19,00%	7,12%	57,97%	11,87%
<b>55%</b>	2,25%	19,72%	7,78%	58,78%	12,11%
<b>60%</b>	2,42%	20,45%	8,57%	60,50%	12,92%
<b>65%</b>	2,57%	21,18%	8,73%	61,02%	13,49%
<b>70%</b>	2,75%	21,73%	9,71%	61,42%	13,87%
<b>75%</b>	2,86%	22,21%	11,02%	62,43%	14,31%
<b>80%</b>	3,11%	23,80%	11,14%	63,55%	15,10%
<b>85%</b>	3,28%	24,49%	12,60%	64,42%	15,74%
<b>90%</b>	3,40%	25,20%	13,95%	67,19%	16,58%
<b>92%</b>	3,48%	25,34%	14,11%	68,89%	17,99%
<b>95%</b>	4,24%	26,31%	15,11%	69,55%	20,67%
<b>97%</b>	4,52%	28,51%	16,07%	70,12%	21,78%
<b>99%</b>	-	-	-	-	-

FC3	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Corte de Cana	Manobra
<b>Localização</b>					
<b>Média</b>	2,62%	13,44%	8,85%	60,94%	13,69%
<b>Mínimo</b>	0,12%	4,58%	0,70%	48,31%	2,66%
<b>Máximo</b>	10,30%	35,49%	22,29%	76,22%	24,94%
<b>Percentis</b>					
<b>1%</b>	-	-	-	-	-
<b>3%</b>	0,71%	5,18%	1,62%	49,33%	5,83%
<b>5%</b>	0,95%	5,90%	2,62%	49,70%	6,78%
<b>8%</b>	1,17%	7,90%	3,28%	50,43%	7,38%
<b>10%</b>	1,30%	8,18%	3,70%	50,69%	7,85%
<b>15%</b>	1,57%	8,72%	5,27%	53,41%	8,94%
<b>20%</b>	1,70%	9,35%	5,60%	55,42%	9,51%
<b>25%</b>	1,77%	9,64%	5,77%	55,95%	10,58%
<b>30%</b>	1,89%	10,46%	6,40%	56,79%	10,89%
<b>35%</b>	2,05%	11,50%	7,28%	57,31%	11,51%
<b>40%</b>	2,16%	12,16%	7,80%	58,04%	11,73%
<b>45%</b>	2,27%	12,84%	8,05%	59,11%	12,31%
<b>50%</b>	2,47%	13,17%	8,82%	61,50%	13,15%
<b>55%</b>	2,73%	13,45%	9,31%	62,70%	14,10%
<b>60%</b>	2,83%	14,33%	9,52%	64,19%	14,72%
<b>65%</b>	2,95%	14,84%	9,89%	65,54%	15,70%
<b>70%</b>	3,02%	15,63%	10,04%	66,79%	15,99%
<b>75%</b>	3,10%	16,45%	10,48%	67,90%	16,71%
<b>80%</b>	3,32%	17,09%	11,61%	69,13%	17,58%
<b>85%</b>	3,64%	17,52%	12,17%	69,77%	18,22%
<b>90%</b>	4,07%	18,35%	13,91%	70,33%	19,90%
<b>92%</b>	4,25%	19,16%	15,16%	70,42%	21,96%
<b>95%</b>	4,63%	20,16%	16,91%	71,10%	23,10%
<b>97%</b>	5,05%	26,30%	20,30%	74,06%	23,92%
<b>99%</b>	-	-	-	-	-

FC4	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Corte de Cana	Manobra
<b>Localização</b>					
<b>Média</b>	2,97%	14,84%	6,88%	64,23%	11,03%
<b>Mínimo</b>	0,26%	6,53%	0,72%	48,65%	3,59%
<b>Máximo</b>	8,85%	30,85%	24,08%	79,14%	23,47%
<b>Percentis</b>					
<b>1%</b>	-	-	-	-	-
<b>3%</b>	0,71%	8,39%	0,96%	49,45%	4,06%
<b>5%</b>	0,90%	9,20%	2,16%	51,97%	5,13%
<b>8%</b>	1,00%	9,76%	2,87%	53,73%	6,45%
<b>10%</b>	1,09%	10,11%	3,14%	54,21%	6,76%
<b>15%</b>	1,41%	10,78%	3,44%	57,26%	7,76%
<b>20%</b>	1,80%	11,30%	3,97%	58,72%	8,25%
<b>25%</b>	1,90%	11,99%	4,44%	60,49%	8,81%
<b>30%</b>	2,04%	12,38%	4,93%	60,73%	9,50%
<b>35%</b>	2,15%	12,90%	5,30%	61,47%	9,82%
<b>40%</b>	2,27%	13,13%	5,41%	62,88%	10,25%
<b>45%</b>	2,39%	13,32%	5,75%	64,16%	10,52%
<b>50%</b>	2,60%	13,55%	6,13%	65,72%	10,83%
<b>55%</b>	2,77%	13,96%	6,93%	66,01%	11,29%
<b>60%</b>	2,85%	14,46%	7,23%	66,81%	11,64%
<b>65%</b>	3,13%	15,09%	7,97%	67,56%	12,00%
<b>70%</b>	3,51%	16,02%	8,42%	67,88%	12,31%
<b>75%</b>	3,73%	17,41%	8,72%	69,19%	12,88%
<b>80%</b>	3,81%	17,98%	9,54%	69,87%	13,40%
<b>85%</b>	4,79%	19,27%	10,11%	70,71%	13,79%
<b>90%</b>	5,59%	21,23%	11,11%	71,77%	14,82%
<b>92%</b>	5,91%	21,52%	12,27%	72,55%	15,93%
<b>95%</b>	6,67%	23,96%	13,32%	74,15%	17,24%
<b>97%</b>	7,75%	28,05%	14,53%	75,71%	20,28%
<b>99%</b>	-	-	-	-	-

FC5	Indisp. Administrativa	Indisp. Logística	Indisp. Mecânica	Tempo Produtivo	
				Corte de Cana	Manobra
<b>Localização</b>					
<b>Média</b>	2,32%	13,92%	8,68%	63,00%	12,55%
<b>Mínimo</b>	0,12%	6,96%	0,00%	50,19%	4,97%
<b>Máximo</b>	10,86%	26,56%	31,46%	78,48%	20,15%
<b>Percentis</b>					
<b>1%</b>	-	-	-	-	-
<b>3%</b>	0,20%	7,38%	0,00%	51,23%	5,25%
<b>5%</b>	0,77%	7,74%	1,30%	52,58%	5,64%
<b>8%</b>	0,95%	8,11%	1,88%	54,27%	6,70%
<b>10%</b>	1,02%	8,70%	2,80%	54,72%	7,82%
<b>15%</b>	1,16%	9,06%	3,33%	55,95%	8,43%
<b>20%</b>	1,29%	9,97%	4,81%	56,43%	9,26%
<b>25%</b>	1,50%	10,19%	5,56%	57,66%	10,00%
<b>30%</b>	1,66%	11,02%	6,35%	58,55%	10,46%
<b>35%</b>	1,72%	12,04%	6,57%	59,74%	10,81%
<b>40%</b>	1,84%	12,54%	7,06%	60,67%	11,09%
<b>45%</b>	1,90%	12,97%	7,85%	61,77%	11,75%
<b>50%</b>	2,10%	13,92%	8,04%	61,95%	12,31%
<b>55%</b>	2,17%	14,03%	8,63%	63,07%	12,80%
<b>60%</b>	2,22%	14,43%	9,26%	64,22%	13,60%
<b>65%</b>	2,25%	14,93%	9,87%	65,27%	14,28%
<b>70%</b>	2,42%	15,88%	10,51%	65,78%	15,13%
<b>75%</b>	2,82%	16,37%	11,71%	67,23%	15,42%
<b>80%</b>	2,99%	17,21%	12,39%	68,13%	15,97%
<b>85%</b>	3,12%	18,55%	13,66%	68,92%	16,69%
<b>90%</b>	3,48%	19,72%	15,10%	70,96%	18,11%
<b>92%</b>	3,94%	20,87%	15,62%	72,10%	18,53%
<b>95%</b>	4,63%	23,45%	16,16%	73,95%	18,82%
<b>97%</b>	7,62%	23,70%	19,22%	75,38%	19,31%
<b>99%</b>	-	-	-	-	-

## APÊNDICE G – TESTE DE HIPÓTESE ENTRE VELOCIDADE MÉDIA E DISTÂNCIA DAS FRENTES DE COLHEITA

### ANOVA com um fator: Vel. Vazio (km/h) versus Classe por distância

#### Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
Linhas não usadas	675

*Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise*

#### Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Classe por distância	4	Acima de 50 km; Até 10 km; De 10 km a 30 km; De 30 km a 50 km

#### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Classe por distância	3	3130785	24,88%	3130785	1043595	10321,35	0,000
Erro	93489	9452704	75,12%	9452704	101		
Total	93492	12583489	100,00%				

#### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
10,0554	24,88%	24,88%	9453556	24,87%

#### Médias

Classe por distância	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Acima de 50 km	2529	48,029	11,385	(47,637; 48,421)
Até 10 km	10595	22,2597	9,1066	(22,0682; 22,4512)
De 10 km a 30 km	61469	31,6132	9,9509	(31,5337; 31,6927)
De 30 km a 50 km	18900	41,0345	10,6904	(40,8911; 41,1778)

*DesvPad Combinado = 10,0554*

## ANOVA com um fator: Vel Carregado (km/h) versus Classe distância

### Método

Hipótese nula	Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa	Nem todas as médias são iguais
Nível de significância	$\alpha = 0,05$
Linhas não usadas	976

*Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise*

### Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Classe distância	4	Acima de 50 km; Até 10 km; De 10 km a 30 km; De 30 km a 50 km

### Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Classe distância	3	1045939	8,83%	1045939	348646	2984,17	0,000
Erro	92429	10798640	91,17%	10798640	117		
Total	92432	11844578	100,00%				

### Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
10,8089	8,83%	8,83%	10799622	8,82%

### Médias

Classe distância	N	Média	DesvPad	IC de 95%
Acima de 50 km	2554	40,431	10,831	(40,012; 40,851)
Até 10 km	10209	25,122	12,417	(24,912; 25,331)
De 10 km a 30 km	60819	28,4240	10,6739	(28,3381; 28,5099)
De 30 km a 50 km	18851	34,5268	10,2903	(34,3725; 34,6811)




*DesvPad Combinado = 10,8089*

## APÊNDICE H – PROGRAMAÇÃO DO PROMODEL

### Locais

Nome	Cap.	Unidade	Paradas...	Estatísticas	Regras...
IAux	INF	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Proprias_1	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_1_Consolidado	3	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_1_Movimentacao	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Proprias_2	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_2_Consolidado	3	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_2_Movimentacao	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Proprias_3	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_3_Consolidado	3	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_3_Movimentacao	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Proprias_4	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_4_Consolidado	3	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_4_Movimentacao	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Proprias_5	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_5_Consolidado	3	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Proprias_5_Movimentacao	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Fornecedor_Esteira	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_fornecedor_esteira_Consolidado	INF	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
FC_Fornecedor_Pool	inf	1	Relógio,	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Fornecedor_Pool_Consolidado	15	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFC_Fornecedor_Pool_Movimentacao	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Patio_Estoque_Cana_U1	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Patio_Carreta_Vazia_U1	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Entrada_Balança_U1	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Entrada_Balança_U1	1	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Saída_Balança_U1	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Saída_Balança_U1	1	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Sonda_PCTS_U1	Inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Sonda_PCTS_U1	1	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Hilo_U1	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Hilo_U1	2	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Ihilo_U1_Aux	INF	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Industria_Moagem_U1	INF	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Entrada_Balança_U2	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Entrada_Balança_U2	1	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Saída_Balança_U2	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Saída_Balança_U2	1	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Sonda_PCTS_U2	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Sonda_PCTS_U2	1	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Patio_Estoque_Cana_U2	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Patio_Carreta_Vazia_U2	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
IFila_Hilo_U2	inf	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Hilo_U2	2	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Ihilo_U2_Aux	INF	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho
Industria_Moagem_U2	INF	1	Nenhuma	Série de Tempo	O Mais Velho





## Entidades

Ícone	Nome	Velocidade (mpm)	Estatísticas
	eCanadeAcucar_ton	50	Série de Tempo
	eConsolidadoCarreta	548	Série de Tempo
	eMovimentacao	50	Série de Tempo
	eAux	50	Série de Tempo


## Taxas de Chegada

Entidade.	Local...	QTD. por Vez...	Primeira Vez...	Ocorrências	Frequência	Lógica...	Desab.
eAux	IFC_Proprias_1_Movimentacao	1	0	1	1		Não
eAux	IFC_Proprias_2_Movimentacao	1	0	1	1		Não
eAux	IFC_Proprias_3_Movimentacao	1	0	1	1		Não
eAux	IFC_Proprias_4_Movimentacao	1	0	1	1		Não
eAux	IFC_Proprias_5_Movimentacao	1	0	1	1		Não
eAux	IFC_Fornecedor_Pool_Movimentacao	1	0	1	1		Não
eAux	Patio_Carreta_Vazia_U1	1	0	1	1		Não
eAux	Patio_Carreta_Vazia_U2	1	0	1	1		Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_1	N(32, 4)	2 hr	INF	15 min	Inc V_ProducaoFCprop1	Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_2	N(37, 4)	2 hr	INF	15 min	Inc V_ProducaoFCprop2	Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_3	N(32, 4)	2 hr	INF	15 min	Inc V_ProducaoFCprop3	Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_4	N(32, 3)	2 hr	INF	15 min	Inc V_ProducaoFCprop4	Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_5	N(22, 2)	2 hr	INF	15 min	Inc V_ProducaoFCprop5	Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Fornecedor_Esteira	N(18, 2)	2 hr	INF	15 min	Inc V_ProducaoFCfornesteira	Não
eCanadeAcucar_ton	FC_Fornecedor_Pool	N(36,4)	2 hr	INF	3 min	Inc V_ProducaoFCfornpool	Não

## Recursos

Ícone	Nome	Unid.	Paradas...	Estatísticas	Especificações	Pesquisar...
	Caminhao_de_Linha	49	Relógio	Por Unidade, Série de	FCs_Usina_Industria, P	Nenhuma
	Caminhao_Bate_e_Volta_U1	13	Relógio	Por Unidade, Série de	FCs_Usina_Industria, P	Nenhuma
	Caminhao_Bate_e_Volta_U2	3	Relógio	Por Unidade, Série de	FCs_Usina_Industria, P	Nenhuma
	Conjunto_Carretas	111	Relógio	Por Unidade, Série de	FCs_Usina_Industria, P	Nenhuma

## Rede de Caminho

Imagem...	Nome	Tipo	T/S	Caminhos...	Interfaces...	Mapeamento...	Nós
	FCs_Usina_Industria	Passante	Velocidade & Distância	27	44	34	18

Caminhos X			
De	Para	BI	Distância
FCprop1	PatioBateVolta	Bi	12000, 1]
FCprop2	PatioBateVolta	Bi	19000, 2]
FCprop3	PatioBateVolta	Bi	27000
FCprop4	PatioBateVolta	Bi	8100
FCprop5	PatioBateVolta	Bi	33100
FCforn.est	PatioBateVolta	Bi	21000
FCforn.pool	PatioBateVolta	Bi	21000
FCprop1	EntradaBalancaU2	Bi	15000
FCprop2	EntradaBalancaU2	Bi	29000
FCprop3	EntradaBalancaU2	Bi	18200
FCprop4	EntradaBalancaU2	Bi	11700
FCprop5	EntradaBalancaU2	Bi	18200
FCforn.est	EntradaBalancaU2	Bi	21000
FCforn.pool	EntradaBalancaU2	Bi	21000
EntradaBalancaU2	SondaU2	Uni	308
EntradaBalancaU2	PatioBateVoltaU2	Bi	531
SondaU2	PatioBateVoltaU2	Uni	223
PatioBateVoltaU2	SaidaBalancaU2	Uni	709
SaidaBalancaU2	EntradaBalancaU2	Uni	0
PatioBateVoltaU2	HiloU2	Bi	157
PatioBateVolta	EntradaBalancaU1	Uni	413
EntradaBalancaU1	SondaU1	Uni	148
SondaU1	HiloU1	Uni	541
EntradaBalancaU1	HiloU1	Uni	689
HiloU1	SaidaBalancaU1	Uni	412
SaidaBalancaU1	PatioCarretaVaziaU1	Uni	25.18
PatioCarretaVaziaU1	PatioBateVolta	Bi	11.33

## Variáveis

Variáveis X				
Ícone	Nome	Tipo	Valor Inicial	Estatísticas
Não	V_Sort_PCTS	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_Decisão_Indústria	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCprop1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCprop1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCprop2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCprop2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCprop3	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCprop3	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCprop4	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCprop4	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCprop5	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCprop5	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCformpool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCformpool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_ProducaoFCforneiteira	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_SaidaFCforneiteira	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_Estoque_Ind1	Inteiro	1000	Série de Tempo, Temp
Sim	V_Estoque_Ind2	Inteiro	210	Série de Tempo, Temp
Sim	V_Moagem_Ind1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Sim	V_Moagem_Ind2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_FC1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_FC1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Carreta_Disponivel_FC1	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_FC1	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_FC2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_FC2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Carreta_Disponivel_FC2	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_FC2	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_FC3	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_FC3	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Carreta_Disponivel_FC3	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_FC3	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_FC4	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_FC4	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Carreta_Disponivel_FC4	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_FC4	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_FC5	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_FC5	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Carreta_Disponivel_FC5	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_FC5	Real	0	Série de Tempo, Temp

Não	V_peso_consolidado_FCPool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_FCPool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Carreta_Disponivel_FCPool	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_FCPool	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCaminhao_de_Linha_na_U1	Inteiro	34	Série de Tempo, Temp
Não	vCaminhao_de_Linha_na_U2	Inteiro	15	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_FCEsteira	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_carreta_esteira	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_peso_consolidado_esteira	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Quantidade_Produzida_esteira	Real	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFC1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFC2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFC3	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFC4	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFC5	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFCFornEsteira	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_ParaChegadaFCFornPool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	V_Qtd_Chegadas_Total	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FC1	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FC2	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FC3	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FC4	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FC5	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FCPool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vCarreta_Local_FCEsteira	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	vRetornoPool	Inteiro	0	Série de Tempo, Temp
Não	v_Espera_Caminhão_Bate_e_Volta_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Espera_Caminhão_Bate_e_Volta_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Entrada_Balanca_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Saida_Balanca_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Sonda_PCTS_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Hilo_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Entrada_Balanca_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Saida_Balanca_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Sonda_PCTS_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Fila_Hilo_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_LeadTime_FC_Moagem_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_LeadTime_FC_Moagem_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_escravo_ida_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_escravo_volta_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_linha_ida_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_escravo_ida_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_escravo_volta_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_linha_ida_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs
Não	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U2	Real	0	Série de Tempo, Obs

## Atributos

Atributos X		
Nome	Tipo	Classificação
AT_Sort_PCTS	Real	Ent
AT_Dest_PósBalança	Real	Loc
AT_Decisão_Indústria	Real	Ent
AT_Dest_Cana	Real	Loc
AT_Tipo_Carreta	Real	Ent
AT_Peso_Consolidado	Inteiro	Ent
At_Returno_FC_U1	Real	Ent
At_Returno_FC_U2	Real	Ent
AT_Origem_FC_esteira	Real	Ent
AT_Inicio_Movimentação	Real	Ent
AT_Espera_Caminhão_Bate_e_Volta	Real	Ent
AT_Fila_Entrada_Balanca	Real	Ent
AT_Fila_Saida_Balanca	Real	Ent
AT_Fila_Sonda_PCTS	Real	Ent
AT_Fila_Hilo	Real	Ent
AT_LeadTime_FC_Moagem	Real	Ent
AT_Ciclo_Cam_escravo_ida	Real	Ent
AT_Ciclo_Cam_escravo_volta	Real	Ent
AT_Ciclo_Cam_linha_ida	Real	Ent
AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1	Real	Ent
AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U2	Real	Ent

## Distribuições do Usuário

Distrib. do Usuário X				Layout Tabela X	
Nome	Tipo	Cumulativa	Tabela	Porcentagem	Valor
Dist_Sort_Análise_PCTS	Discreto	Não	Definido	50%	1
Dist_Tipo_Carreta	Discreto	Não	Definido	50%	2
Dist_Cana_FCProp1	Discreto	Não	Definido		
Dist_Cana_FCProp2	Discreto	Não	Definido		
Dist_Cana_FCProp3	Discreto	Não	Definido		
Dist_Cana_FCProp4	Discreto	Não	Definido		
Dist_Cana_FCProp5	Discreto	Não	Definido		
Dist_Cana_FCForPool	Discreto	Não	Definido		
Dist_Cana_FCForEst	Discreto	Não	Definido		
Dist_Vai_Sonda	Discreto	Não	Definido		
Dist_Returno_FC_U1	Discreto	Não	Definido		
Dist_Returno_FC_U2	Discreto	Não	Definido		

## Paradas

### a) Caminhões

Recursos Relógio X

Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Lista	Nó	Lógica...	Desab.
N (19.2,3.6) hr	47 hr		Não	47		wait 301+P6(0.933, 1.76, 1.61e+003) sec	Não
N (19.2,3.6) hr	48 hr		Não	48		wait 301+P6(0.933, 1.76, 1.61e+003) sec	Não
N (19.2,3.6) hr	49 hr		Não	49		wait 301+P6(0.933, 1.76, 1.61e+003) sec	Não
N (22.4,2.2) hr	12 hr		Não	1		Wait 301+W(1.09, 905) sec	Não
N (22.4,2.2) hr	13 hr		Não	2		Wait 301+W(1.09, 905) sec	Não
N (22.4,2.2) hr	14 hr		Não	3		Wait 301+W(1.09, 905) sec	Não
N (22.4,2.2) hr	15 hr		Não	4		Wait 301+W(1.09, 905) sec	Não

### b) Carretas

Recursos Relógio X

Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Lista	Nó	Lógica...	Desab.
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	1 hr		Não	1		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	2 hr		Não	2		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	3 hr		Não	3		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	4 hr		Não	4		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	5 hr		Não	5		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	6 hr		Não	6		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não
102+P6(1.69, 51.3, 3e+003) hr	7 hr		Não	7		wait T(2, 6.31, 20.5) hr	Não

### c) Frentes de Colheita

Locais Relógio X

Frequência	Primeira Vez	Prioridade	Planejado...	Lógica...	Desab.
N (136.61,21.02) hr	0 hr		Não	v_ParaChegadaFC1 = 1wait N (2.06,0.21)	Sim
240 hr	240 hr		Não	v_ParaChegadaFC1 = 1wait 24 hrv_ParaC	Sim

## Processamento

Entidade...	Local...	Operação...
eAux	IFC_Proprias_1_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)Get 4 Conjunto_Carreta:
eAux	IFC_Proprias_2_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)Get 4 Conjunto_Carretas
eAux	IFC_Proprias_3_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)Get 4 Conjunto_Carretas
eAux	IFC_Proprias_4_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)Get 4 Conjunto_Carretas
eAux	IFC_Proprias_5_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)Get 4 Conjunto_Carretas
eAux	IFC_Fornecedor_Pool_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)Get 29 Conjunto_Carreta
eAux	Patio_Carreta_Vazia_U1	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as unidades)Get 39 Conjunto_U
eAux	Patio_Carreta_Vazia_U2	// Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as unidades)Get 23 Conjunto_U
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_1	If v_ParaChegadaFC1 = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregadaIf v_peso,
eConsolidadoCarreta	IFC_Proprias_1_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Requisitar recurso:
eMovimentacao	IFC_Proprias_1_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1v_Ciclo_Cam_linha_volta
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_2	If v_ParaChegadaFC2 = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregadaIf v_peso,
eConsolidadoCarreta	IFC_Proprias_2_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Requisitar recurso:
eMovimentacao	IFC_Proprias_2_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1v_Ciclo_Cam_linha_volta
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_3	If v_ParaChegadaFC3 = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregadaIf v_peso,
eConsolidadoCarreta	IFC_Proprias_3_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Requisitar recurso:
eMovimentacao	IFC_Proprias_3_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1v_Ciclo_Cam_linha_volta
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_4	If v_ParaChegadaFC4 = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregadaIf v_peso,
eConsolidadoCarreta	IFC_Proprias_4_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Requisitar recurso:
eMovimentacao	IFC_Proprias_4_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1v_Ciclo_Cam_linha_volta
eCanadeAcucar_ton	FC_Proprias_5	If v_ParaChegadaFC5 = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregadaIf v_peso,
eConsolidadoCarreta	IFC_Proprias_5_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Requisitar recurso:
eMovimentacao	IFC_Proprias_5_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1v_Ciclo_Cam_linha_volta
eCanadeAcucar_ton	FC_Fornecedor_Esteira	If v_ParaChegadaFCFornEsteira = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregada
eConsolidadoCarreta	IFC_Fornecedor_Esteira_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Zerar variáveis de
eCanadeAcucar_ton	FC_Fornecedor_Pool	If v_ParaChegadaFCFornPool = 0 Then//Define qual o peso da carreta a ser carregadaIf
eConsolidadoCarreta	IFC_Fornecedor_Pool_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo_Cam_linha_ida = clock()// Requisitar recurso:
eMovimentacao	IFC_Fornecedor_Pool_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1v_Ciclo_Cam_linha_volta
eConsolidadoCarreta	Patio_Estoque_Cana_U1	// Desengate da carreta; liberação do caminhão de linha e entrada no estoqueWait n(11:
eConsolidadoCarreta	IFila_Entrada_Balanca_U1	AT_Fila_Entrada_Balanca = Clock()
eConsolidadoCarreta	Entrada_Balanca_U1	v_Fila_Entrada_Balanca_U1 = Clock() - AT_Fila_Entrada_Balanca// Operação de pesagem e
eConsolidadoCarreta	IFila_Sonda_PCTS_U1	AT_Fila_Sonda_PCTS = Clock()
eConsolidadoCarreta	Sonda_PCTS_U1	v_Fila_Sonda_PCTS_U1 = Clock() - AT_Fila_sonda_pcts// Operação Sonda PCTSWait Dist,Si
eConsolidadoCarreta	IFila_Hilo_U1	AT_Fila_Hilo = Clock()
eConsolidadoCarreta	Hilo_U1	v_Fila_hilo_U1 = Clock() - AT_Fila_hilo//Tempo de descarregamento e liberação das entida
eMovimentacao	IHilo_U1_Aux	Jointly Get Caminhao_Bate_e_Volta_U1 And Conjunto_CarretasAT_Ciclo_Cam_escravo_volta
eConsolidadoCarreta	IFila_Entrada_Balanca_U2	AT_Fila_Entrada_Balanca = Clock()
eConsolidadoCarreta	Entrada_Balanca_U2	v_Fila_Entrada_Balanca_U2 = Clock() - AT_Fila_Entrada_Balanca// Operação de pesagem e
eConsolidadoCarreta	IFila_Sonda_PCTS_U2	AT_Fila_Sonda_PCTS = Clock()
eConsolidadoCarreta	Sonda_PCTS_U2	v_Fila_Sonda_PCTS_U2 = Clock() - AT_Fila_sonda_pcts// Operação Sonda PCTSWait AT_Tipi
eConsolidadoCarreta	Patio_Estoque_Cana_U2	// Desengate da carreta; liberação do caminhão de linha e entrada no estoqueWait n(11:
eConsolidadoCarreta	IFila_Hilo_U2	AT_Fila_Hilo = Clock()
eConsolidadoCarreta	Hilo_U2	v_Fila_hilo_U2 = Clock() - AT_Fila_hilo//Tempo de descarregamento e liberação das entida
eMovimentacao	IHilo_U2_Aux	Jointly Get Caminhao_Bate_e_Volta_U1 And Conjunto_CarretasAT_Ciclo_Cam_escravo_volta
eConsolidadoCarreta	Industria_Moagem_U2	//Ritmo de moagemWait AT_Peso_Consolidado / N (526,36) hrInc V_Moagem_Ind2, AT_Pe
eConsolidadoCarreta	Industria_Moagem_U1	//Ritmo de moagemWait AT_Peso_Consolidado / N(892,51) hrInc V_Moagem_Ind1, AT_Pe:
eMovimentacao	Patio_Carreta_Vazia_U1	// Diferenciação de carretas carregadas e tempo de desengate do caminhão escravoIf A
eMovimentacao	IFila_Saida_Balanca_U1	AT_Fila_saida_balanca = Clock()
eMovimentacao	Saida_Balanca_U1	v_Fila_saida_Balanca_U1 = Clock() - AT_Fila_saida_Balanca// Operação de pesagem Wait T
eConsolidadoCarreta	IFila_Saida_Balanca_U1	
eConsolidadoCarreta	Saida_Balanca_U1	// Operação de pesagem Wait N(77, 27) sec
eMovimentacao	Patio_Carreta_Vazia_U2	// Diferenciação de carretas carregadas e tempo de desengate do caminhão escravoIf A
eMovimentacao	IFila_Saida_Balanca_U2	AT_Fila_saida_balanca = Clock()
eMovimentacao	Saida_Balanca_U2	v_Fila_saida_Balanca_U2 = Clock() - AT_Fila_saida_Balanca// Operação de pesagem Wait T
eConsolidadoCarreta	IFila_Saida_Balanca_U2	
eConsolidadoCarreta	Saida_Balanca_U2	// Operação de pesagem Wait N(77, 27) sec

### a) Configuração inicial – “eAux”

The screenshot displays two windows: 'Processo' and 'Roteamento'.

**Processo**

Entidade...	Local...	Operação...
eAux	IFC_Proprias_1_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema
eAux	IFC_Proprias_2_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema
eAux	IFC_Proprias_3_Movimentacao	// Configuração inicial do sistema

**Roteamento**

BI	Saída...	Destino...	Regra...
1	eAux	EXIT	FIRST 1

**Ferramentas**

Operação

```

1 // Configuração inicial do sistema (envio de recursos para as FC)
2 Get 4 Conjunto_Carretas
3 Free All
  
```

**Layout**

Lógica de Movimento

```

1
  
```

### b) Frentes de Colheita (própria e forn. pool) – “eCanadeAçúcar”

The screenshot displays two windows: 'Processo' and 'Ferramentas'.

**Processo**

Entidade...	Local...	Operação...
eCanadeAçucar_ton	FC_Proprias_1	If v_ParaChegadaFC1 = 0 Then{ //Defi

**Ferramentas**

Operação

```

1 If v_ParaChegadaFC1 = 0 Then
2 {
3     //Define qual o peso da carreta a ser carregada
4     If V_peso_carreta_FC1 = 0 Then
5     {
6         AT_tipo_carreta = Dist_Tipo_Carreta()
7         if AT_Tipo_Carreta = 2 Then {
8             AT_Peso_Consolidado = 2 * N(35, 3)
9         }
10        Else AT_Peso_Consolidado = 3 * N(35, 3)
11        V_peso_carreta_FC1 = AT_Peso_Consolidado
12    }
13    //Verifica se ainda há espaço na carreta
14    If V_peso_consolidado_FC1 < V_peso_carreta_FC1 Then
15    {
16        Inc V_peso_consolidado_FC1
17    }
18    Else
19    {
20        Wait Until V_peso_consolidado_FC1 < V_peso_carreta_FC1
21        Inc V_peso_consolidado_FC1
22    }
23    //Verifica se a carreta já esta cheia e cria a entidade de cana consolidada
24    If V_peso_consolidado_FC1 = V_peso_carreta_FC1 Then
25    {
26        Wait Until vCarreta_Local_FC1 < 4
27        AT_Peso_Consolidado = V_peso_consolidado_FC1
28
29        Order 1 eConsolidadoCarreta To lFC_Proprias_1_Consolidado
30        Inc vCarreta_Local_FC1
31    }
32 }
  
```

### c) Frentes de Colheita – “eConsolidado”

Entidade...	Local...	Operação...
eConsolidadoCarreta	IFC_Proprias_1_Consolidado	AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()AT_Ciclo...

BI	Saída...	Destino...	Regra...
1	eConsolidadoCarreta	Patio_Estoque_Cana_U1	FIRST 1

```

1 AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()
2 AT_Ciclo_Cam_linha_ida = cclock()
3
4 // Requisitar recursos para transporte e zerar variáveis de peso
5 SubDebug()
6 Jointly Get Conjunto_Carretas And Caminhao_de_Linha
7
8 Inc v_Quantidade_Produzida_FC1, v_peso_consolidado_FC1
9 V_peso_carreta_FC1 = 0
10 V_peso_consolidado_FC1 = 0
11
12 // Engate do caminhão de linha no conjunto carreta
13 Wait N(279,65) sec
14
15 Inc V_SaidaFCprop1, AT_Peso_Consolidado
16
17 // Decisão de qual indústria enviar a cana
18 AT_Decisão_Indústria = Dist_Cana_FCProp1()
19 If AT_Decisão_Indústria=1 Then
20 {
21     Route 1
22 }
23 Else
24 {
25     Route 2
26 }
  
```

```

1 Move With OwnedResource() // Locomoção_FC_Pátio
2 Dec vCarreta_Local_FC1
  
```

### d) Frente de Colheita (esteira) – “eCanaAçúcar”

Entidade...	Local...	Operação...
eConsolidadoCarreta	IFC_fornecedor_esteira_Consolid	AT_LeadTime_FC_Moagem =

BI	Saída...	Destino...	Regra...
1	eConsolidadoCarreta	Patio_Estoque_Cana_U1	FIRST 1

```

1 AT_LeadTime_FC_Moagem = Clock()
2 AT_Ciclo_Cam_linha_ida = cclock()
3
4 // Zerar variáveis de peso
5 SubDebug()
6 Inc v_Quantidade_Produzida_esteira, V_peso_consolidado_esteira
7 V_peso_carreta_esteira = 0
8 V_peso_consolidado_esteira = 0
9 AT_Origem_FC_esteira = 1
10
11 Inc V_SaidaFCfornesteira, AT_Peso_Consolidado
12
13 // Decisão de qual indústria enviar a cana
14 AT_Decisão_Indústria = Dist_Cana_FCForNEst()
15 If AT_Decisão_Indústria=1 Then
16 {
17     Route 1
18 }
19 Else
20 {
21     Route 2
22 }
  
```

```

1 Move On FCs_Usina_Industria
2 Dec vCarreta_Local_FCEsteira
  
```

### e) Frentes de Colheita – “eMovimentação”

Entidade...	Local...	Operação...
eMovimentacao	IFC_Proprias_1_Movimentacao	v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = cclock() - AT_Cic...

BI	Saída...	Destino...	Regra...
1	eMovimentacao	EXIT	FIRST 1

```

1 v_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = cclock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1
2 v_Ciclo_Cam_linha_volta_U2 = cclock() - AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U2
3 Free All
4
  
```

```

1
  
```

## f) Pátio Estoque de Cana

Processo X			Roteamento X			
Entidade...	Local...	Operação...	BI	Saída...	Destino...	Regra...
eConsolidadoCarreta	Patio_Estoque_Cana_U1	// Desengate da carreta; liberaçã	1	eConsolidadoCarreta	Ifila_Entrada_Balança_U1	FIRST 1

Ferramentas		Operação X		Layout		Lógica de Movimento X	
<pre> 1 // Desengate da carreta; liberação do caminhão de linha e entrada no estoque 2 Wait n(113,30) sec 3 Free Caminhao_de_Linha 4 Inc vCaminhao_de_Linha_na_U1 5 Inc V_Estoque_Ind1, AT_Peso_Consolidado 6 v_Ciclo_Cam_linha_ida_U1 = Clock() - AT_Ciclo_Cam_linha_ida 7 8 //Solicitação do caminhão bate e volta; engate da carreta e saída do estoque 9 AT_Espera_Caminhao_Bate_e_Volta = Clock() 10 AT_Ciclo_Cam_escravo_ida = Clock() 11 Get Caminhao_Bate_e_Volta_U1 12 v_Espera_Caminhao_Bate_e_Volta_U1 = Clock() - AT_Espera_Caminhao_Bate_e_Volta 13 14 Wait N(137,27) sec 15 16 Dec V_Estoque_Ind1, AT_Peso_Consolidado </pre>		<pre> 1 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 2 { 3   Move With OwnedResource() // Locomoção_Pátio_Hilo_U1 4 } 5 Else Move On FCs_Usina_Industria </pre>					

## g) Entrada da Balança

Processo X			Roteamento X			
Entidade...	Local...	Operação...	BI	Saída...	Destino...	Regra...
eConsolidadoCarreta	Entrada_Balanca_U1	v_Fila_Entrada	1	eConsolidadoCarreta	Ifila_Sonda_PCTS_U1	FIRST 1

Ferramentas		Operação X		Layout		Lógica de Movimento X	
<pre> 1 v_Fila_Entrada_Balanca_U1 = Clock() - AT_Fila_Entrada_Balanca 2 3 // Operação de pesagem e sorteio entre Sonda PCTS ou Hilo 4 Wait N(159, 17) sec 5 6 AT_Sort_PCTS = Dist_Vai_Sonda() 7 8 If AT_Sort_PCTS = 1 Then 9 { 10   Route 1 11 } 12 Else Route 2 </pre>		<pre> 1 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 2 { 3   Move With OwnedResource() 4 } 5 Else Move On FCs_Usina_Industria </pre>					

## h) Sonda PCTS

Processo X			Roteamento X			
Entidade...	Local...	Operação...	BI	Saída...	Destino...	Regra...
eConsolidadoCarreta	Sonda_PCTS_U1	v_Fila_	1	eConsolidadoCarreta	Ifila_Hilo_U1	FIRST 1

Ferramentas		Operação X		Layout		Lógica de Movimento X	
<pre> 1 v_Fila_Sonda_PCTS_U1 = Clock() - AT_Fila_sonda_pcts 2 3 // Operação Sonda PCTS 4 Wait Dist_Sort_Análise_PCTS() * N(190,14) sec </pre>		<pre> 1 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 2 { 3   Move With OwnedResource() 4 } 5 Else Move On FCs_Usina_Industria </pre>					

### i) Hilo

Processo			Roteamento			
Entidade...	Local...		Bl	Saída...	Destino...	Regra...
eConsolidadoCarreta	Hilo_U1	v_Fila_hilo_U1 =	1	eConsolidadoCarreta	Industria_Moagem_U1	FIRST 1

Ferramentas		Operação		Layout		Lógica de Movimento	
<pre> 1 v_Fila_hilo_U1 = Clock() - AT_Fila_hilo 2 3 //Tempo de descarregamento e liberação das entidades 4 wait AT_Tipo_Carreta * N(280,20) sec 5 Free All 6 v_Ciclo_Cam_escravo_ida_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_escravo_ida 7 8 // Solicitação de entidade para retorno dos recursos 9 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 10 { 11     Order 1 eMovimentacao To IHilo_U1_Aux 12 } </pre>				1			

### j) Hilo Aux.

Processo			Roteamento			
Entidade...	Local...		Bl	Saída...	Destino...	Regr
eMovimentacao	IHilo_U1_Aux	Jointly Get	1	eMovimentacao	IFila_Saída_Balança_U1	FIRST 1

Ferramentas		Operação		Layout		Lógica de Movimento	
<pre> 1 Jointly Get Caminhao_Bate_e_Volta_U1 And Conjunto_Carretas 2 AT_Ciclo_Cam_escravo_volta = clock() </pre>				<pre> 1 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 2 { 3     Move With OwnedResource() 4 } 5 Else Move On FCs_Usina_Industria </pre>			

### k) Indústria Moagem

Processo			Roteamento			
Entidade...	Local...		Bl	Saída...	Destino...	Regra...
eConsolidadoCarreta	Industria_Moagem_U1	//Ritmo de	1	eConsolidadoCarreta	EXIT	FIRST 1

Ferramentas		Operação		Layout		Lógica de Movimento	
<pre> 1 //Ritmo de moagem 2 Wait AT_Peso_Consolidado / N(892,51) hr 3 Inc V_Moagem_Ind1, AT_Peso_Consolidado 4 5 v_LeadTime_FC_Moagem_U1 = clock() - AT_LeadTime_FC_Moagem 6 7 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 8 { 9     Route 1 10 } 11 Else 12 { 13     Route 2 14 } </pre>				1			

## l) Pátio Carreta Vazia

Processo			Roteamento			
Entidade...	Local...	Operação...	Bl	Saída...	Destino...	Regra...
eMovimentacao	Patio_Carreta_Vazia_U1	// Diferenciação de carretas carregadas e tempo de desengate do caminhão escravo	1	eMovimentacao	IFC_Proprias_1_Movimenta	FIRST 1

Ferramentas		Layout	
Operação	Lógica de Movimento		
<pre> 1 // Diferenciação de carretas carregadas e tempo de desengate do caminhão escravo 2 If AT_Inicio_Movimentacao = 0 Then 3 { 4     Wait N(112,23) sec 5     Free Caminhao_Bate_e_Volta_U1 6     v_Ciclo_Cam_escravo_volta_U1 = clock() - AT_Ciclo_Cam_escravo_volta 7 } 8 Else Get Conjunto_Carretas 9 10 AT_Ciclo_Cam_linha_volta_U1 = clock() 11 12 //Solicitação e tempo de engate do caminhão de linha 13 Dec vCaminhao_de_Linha_na_U1 14 Get Caminhao_de_Linha 15 Wait N(279,65) sec 16 17 //Decisão de retorno para as frentes de colheita 18 At_Retorno_FC_U1 = Dist_Retorno_FC_U1() 19 If At_Retorno_FC_U1 = 1 Then Route 1 20 Else If At_Retorno_FC_U1 = 2 Then Route 2 21 Else If At_Retorno_FC_U1 = 3 Then Route 3 22 Else If At_Retorno_FC_U1 = 4 Then Route 4 23 Else If At_Retorno_FC_U1 = 5 Then Route 5 24 Else 25 { 26     Inc vRetornoPool 27     Route 6 28 } -- </pre>	<pre> 1 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 2 { 3     Move With OwnedResource() 4 } 5 Else Move On FCs_Usina_Industria </pre>		

## m) Saída da Balança

Processo			Roteamento			
Entidade...	Local...	Operação...	Bl	Saída...	Destino...	Regra...
eMovimentacao	Saida_Balanca_U1	v_Fila_sai	1	eMovimentacao	Patio_Carreta_Vazia_U1	FIRST 1

Ferramentas		Layout	
Operação	Lógica de Movimento		
<pre> 1 v_Fila_saida_Balanca_U1 = Clock() - AT_Fila_saida_Balanca 2 3 // Operação de pesagem 4 Wait N(77, 27) sec </pre>	<pre> 1 If AT_Origem_FC_esteira = 0 Then 2 { 3     Move With OwnedResource() 4 } 5 Else Move On FCs_Usina_Industria </pre>		