

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JOÃO EDUARDO AZEVEDO RAMOS DA SILVA

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO DISCRETA PARA ANALISAR O
SISTEMA INTEGRADO DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR E
APROVEITAMENTO DE BIOMASSA**

**SÃO CARLOS
2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JOÃO EDUARDO AZEVEDO RAMOS DA SILVA

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO DISCRETA PARA ANALISAR O
SISTEMA INTEGRADO DE COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR E
APROVEITAMENTO DE BIOMASSA**

**Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade
Federal de São Carlos, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
doutor em Engenharia de Produção.**

**Orientação: Prof. Dr. Miguel Antonio Bueno da Costa
Co-orientação: Prof. Dr. João Alberto Camarotto**

**SÃO CARLOS
2011**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

S586ms

Silva, João Eduardo Azevedo Ramos da.

Um modelo de simulação discreta para analisar o sistema integrado de colheita de cana-de-açúcar e aproveitamento de biomassa / João Eduardo Azevedo Ramos da Silva. -- São Carlos : UFSCar, 2012.
223 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Simulação. 2. Simulação de sistemas. 3. Logística. 4. Transporte. 5. Agroindústria canavieira. 6. Setor sucroalcooleiro. I. Título.

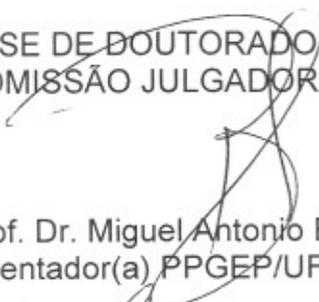
CDD: 658.40352 (20^a)

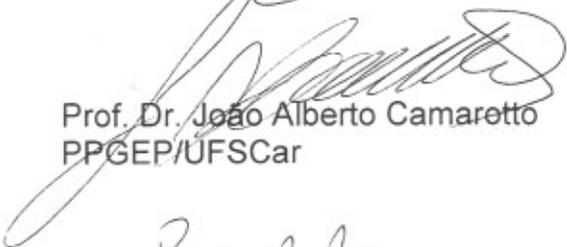


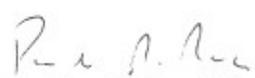
FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 28/11/2011 PELA
COMISSÃO JULGADORA:


Prof. Dr. Miguel Antonio Bueno da Costa
Orientador(a) PPGE/UFSCar


Prof. Dr. João Alberto Camaretto
PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Paulo Rogério Politano
DC/PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Marcos Milan
ESALQ/USP


Prof. Dr. Luiz Henrique Antunes Rodrigues
FEAGRI/UNICAMP


Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE

DEDICATÓRIA

A Deus.

À minha família.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (Piracicaba/SP) - uma escola com grandes mestres.

Ao meu orientador pela paciência, disposição para ouvir e muitos conselhos.

Aos Professores participantes da banca pelos aprendizados nas disciplinas, pela disponibilidade de tempo e pelas contribuições valiosas para este trabalho.

Aos amigos da sala 13 da UFSCar/Sorocaba.

Aos colegas do SimuCAD/Ergo&Ação, pela confiança e incentivo.

Aos alunos, professores e funcionários da UFSCar/Sorocaba e do DEP/UFSCar.

A todas as pessoas que, de certa forma ficaram privadas de minha presença ao longo da execução deste trabalho.

Dedico.

EPÍGRAFE

“A utopia está lá no horizonte.

Me aproximo dois passos, ela se afasta dois passos.

Caminho dez passos e o horizonte corre dez passos.

Por mais que eu caminhe, jamais alcançarei.

Para que serve a utopia?

Serve para isso: para que eu não deixe de caminhar.”

Eduardo Galeano

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, com processamento superior a 620 milhões de toneladas na safra 2010/2011. A perspectiva para os próximos anos é de forte crescimento da produção de açúcar e de etanol, impulsionada pelo aumento das vendas decorrentes do baixo custo de produção e do aumento do consumo de etanol, interno e externo, em substituição ao uso de combustíveis fósseis. Simultaneamente, a maior preocupação ambiental levou à implantação de leis que estipulam a redução gradativa da queima controlada, tradicionalmente utilizada no manejo da cana-de-açúcar previamente ao corte manual. Este fato estabeleceu uma mudança de cenário, pois, a biomassa que outrora era queimada, surgiu como subproduto passível de utilização, seja para a fabricação de etanol, por tecnologias ainda em desenvolvimento para escala comercial, ou para a geração de energia, da mesma forma que o bagaço (cogeração). Independente da destinação, o processamento da cana-de-açúcar e de sua biomassa caracteriza um sistema logístico complexo, pois grandes volumes de material são movimentados, utilizando equipamentos de alto custo e com alto grau de interação. Diversos sistemas podem ser configurados com a finalidade de processamento da cana e da biomassa, variando equipamentos e operações. A seleção destas opções constitui uma das principais tarefas da gestão das operações das usinas. Com o objetivo de auxiliar tomadas de decisão, neste trabalho desenvolveu-se um modelo de simulação de eventos discretos dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar com aproveitamento da biomassa. Os processos de colheita de cana-de-açúcar com limpeza convencional e colheita com limpeza parcial foram representados em um único modelo, bem como as alternativas de recolhimento e entrega da biomassa. As características operacionais dos sistemas foram parametrizadas, sendo possível configurar cenários de interesse por meio de planilhas eletrônicas, que interagem com o modelo e facilitam a inserção de dados e a análise de resultados. Ensaios de campo foram conduzidos para testar o desempenho dos equipamentos e gerar dados para o modelo de simulação, que foi usado para realizar dois estudos. No primeiro estudo simularam-se três alternativas de sistemas de colheita de cana-de-açúcar e processamento de biomassa diferentemente, reproduzindo as condições operacionais observadas em cada ensaio de campo. No segundo estudo, os três sistemas foram novamente comparados, porém em igualdade de condições, com o mesmo conjunto de premissas, de forma a poder compará-los. Em todos os cenários adotou-se como padrão uma usina com capacidade de processamento de dois milhões de toneladas de cana por safra. O modelo permitiu avaliar os sistemas selecionados, tanto do ponto de vista operacional, com análise das produções de cana-de-açúcar e de biomassa, como também do ponto de vista econômico.

Palavras-Chave: Cana-de-açúcar. Biomassa. Logística. Colheita. Simulação de eventos discretos.

ABSTRACT

Brazil is one of the greatest sugarcane producers of the world, with figures that exceeds 620 million tons in 2010/2011 harvest season. There is an expectation of strong increase of Brazilian sugarcane production in next years due to increase in sales estimated by the low production cost of sugar and alcohol and also the increase of the internal and external demands for ethanol, in substitution to fossil fuels. At the same time, environmental issues led the publication of a specific legislation that established a schedule to the next years to stop sugarcane burning previous to hand cutting, a traditional activity. This legal restriction brought a new scenario, as an increasing amount of biomass, that used to be burnt, will be available for other uses such as ethanol extra production, by technologies still in development or to energy generation, similar to what is done with bagasse (by means of cogeneration). Independent of its use, sugarcane and its biomass processing configures a complex operation as big volumes of materials are handled using high cost equipment which a high interaction among them. Several systems can be configured to do this task, varying equipments and settings of the operations performed by them. The selection of equipment and operational proceedings is one of the main tasks of managers at sugarcane mills. In order to help in decision taking situations, in this study, a discrete event simulation model was designed and modeled to represent sugarcane harvesting systems with biomass recovery. Conventional sugarcane harvesting and partial cleaning sugarcane harvesting were represented in a unique simulation model, as well as the correspondent alternatives of biomass recovery and delivery at mills. The operational characteristics of these systems were previously set in the model and can be modified through electronic spreadsheets, interfaced with the simulation model that manages the input and output of data. Field tests were done to evaluate equipment performance and generate data to the simulation model, which was used in two studies. In the first study, three sugarcane harvesting and biomass recovery systems were simulated using the data collected at each field test, representing those systems differently, under their own observed conditions. In the second study, the three systems were again compared, however, under the same conditions, with the same set of assumptions, in order to permit their comparison in equal basis. All scenarios considered a typical mill operation that processes two million tons of sugarcane per harvest season. The simulation model enabled the evaluation of the selected systems considering sugarcane and biomass production as well as their economic evaluation.

Keywords: Sugarcane. Biomass. Logistics. Harvest. Discrete event simulation.

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Graus Celsius
AHP	Analytic Hierarchy Process
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
CCT	Corte, carregamento e transporte
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
cv	Cavalo vapor
CVC	Combinação veicular de carga
FGVA	Função de geração de variáveis aleatórias
g	Gramas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNA	Geração de números aleatórios
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
ha	Hectare
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
kg	Quilogramas
kcal	Quilocalorias
km	Quilômetros
kW	kiloWatt
kWh	kiloWatt-hora
L	Litros
m	Metro
m ²	Metros quadrados
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>

min	Minuto
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo.
PBTC	Peso bruto total combinado
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PO	Pesquisa Operacional
Proálcool	Programa Nacional do Álcool
rpm	Rotações por minuto
t	Tonelada
t CO ₂ eq.m ⁻³	Toneladas de dióxido de carbono equivalente por metro cúbico
t.ha ⁻¹	Toneladas por hectare
TWh	TeraWatt-hora
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
US\$	Dólares americanos

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Comparação de cargas para três sistemas de colheita.....	27
TABELA 5.1 – Quantidade de fardos transportados por viagem conforme composição de transporte.....	100
TABELA 5.2 – Dados para cálculo do custo fixo.....	119
TABELA 5.3 – Dados para cálculo do custo variável.....	120
TABELA 5.4 – Resumo dos índices dos custos fixo e variável.....	121
TABELA 6.1 – Tempo de produção de colhedoras.....	123
TABELA 6.2 – Índices relativos à colhedora.....	123
TABELA 6.3 – Índices relativos ao transporte.....	124
TABELA 6.4 – Índices relativos ao sistema de CCT.....	125
TABELA 6.5 – Índices relativos ao palhicho e a eficiência de limpeza das colhedoras.....	126
TABELA 6.6 – Divisão das atividades apontadas na operação de enleiramento de palhicho.....	130
TABELA 6.7 – Dados levantados no ensaio com a enleiradora de palhicho.....	130
TABELA 6.8 – Índices levantados para o conjunto trator-enleiradora de palhicho.....	131
TABELA 6.9 – Divisão das atividades apontadas na operação de enfardamento.....	131
TABELA 6.10 – Dados levantados no ensaio com a enfardadora de palhicho.....	132
TABELA 6.11 - Cálculo do percentual de utilização da enfardadora.....	133
TABELA 6.12 – Índices levantados para o conjunto trator-enfardadora.....	134
TABELA 6.13 – Dados relativos ao transporte dos fardos.....	135
TABELA 6.14 – Estatísticas de impureza mineral nos fardos.....	135
TABELA 6.15 – Palhicho remanescente sobre o solo e umidade.....	136
TABELA 6.16 – Divisão das atividades apontadas na operação de enleiramento de palhicho.....	137
TABELA 6.17 – Dados levantados no ensaio com a enleiradora de palhicho.....	137
TABELA 6.18 – Índices levantados para o conjunto trator-enleiradora de palhicho.....	138
TABELA 6.19 – Divisão das atividades apontadas na operação de enfardamento.....	138
TABELA 6.20 – Dados levantados no ensaio com a enfardadora de palhicho.....	138
TABELA 6.21 - Cálculo do percentual de utilização da enfardadora.....	139
TABELA 6.22 – Índices levantados para o conjunto trator-enfardadora.....	139
TABELA 6.23 – Divisão das atividades apontadas na operação de recolhimento de fardos.....	140

TABELA 6.24 - Dados levantados para o conjunto trator-recolhedor de fardos.....	140
TABELA 6.25 – Índices levantados para o conjunto trator-recolhedor de fardos.....	141
TABELA 6.26 – Dados relativos ao transporte dos fardos.....	141
TABELA 6.27 – Ensaio de impureza nos fardos.....	142
TABELA 6.28 – Quantidade total de palhiço disponível e unidade.....	142
TABELA 6.29 – Comparação dos índices da enleiradora de palhiço.....	143
TABELA 6.30 – Comparação dos índices da enfardadora de palhiço.....	144
TABELA 6.31 – Comparação de índices do carregamento e transporte.....	145
TABELA 6.32 – Comparação dos índices referentes ao palhiço.....	147
TABELA 6.33 – Quantidade de equipamentos de CCT utilizada na simulação.....	156
TABELA 6.34 – Resultados operacionais médios para o Estudo A.....	159
TABELA 6.35 – Tempos médios de ciclo dos veículos para o Estudo A.....	161
TABELA 6.36 – Quantidade de material (cana+palhiço) a ser entregue na usina, conforme o sistema de limpeza adotado.	165
TABELA 6.37 – Resultados operacionais médios para o Estudo B.....	166
TABELA 6.38 – Tempos médios de ciclo dos veículos para o Estudo B.....	168
TABELA 6.39 – Redução dos tempos médios de ciclo dos veículos para o Estudo B.....	169
TABELA 6.40 – Resumo das simulações adicionais do cenário B3.....	170
TABELA 6.41 – Destinação da biomassa nas simulações do Estudo B.....	174
TABELA 6.42 – Produções e áreas processadas nos cenários do Estudo B.....	175

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – Comparação entre a produção de etanol brasileira e americana.....	9
QUADRO 2.2 – Prazos para a eliminação da queima da palha da cana no Estado de São Paulo.....	11
QUADRO 3.1 – Configurações de transporte utilizadas no setor sucroalcooleiro.....	22
QUADRO 4.1 – Funções dos blocos de programação do <i>software Arena</i>	44
QUADRO 5.1 – Descrição das atividades para a operação de enleiramento de palhiço....	74
QUADRO 5.2 – Descrição dos eventos apontados para a operação de enfardamento.....	78
QUADRO 5.3 – Descrição dos eventos apontados para a operação de recolhimento de fardos.....	89
QUADRO 5.4 – Parâmetros a serem configurados na planilha de dados de entrada.....	113
QUADRO 5.5 – Parâmetros a serem apresentados na planilha de dados de saída.....	116
QUADRO 6.1 - Distribuições de probabilidade referentes ao tempo de colheita.....	148
QUADRO 6.2 - Distribuições de probabilidade referentes à operação de recolhimento de fardos.....	149
QUADRO 6.3 – Resumo dos resultados das simulações para o Estudo A.....	157
QUADRO 6.4 – Resumo dos resultados das simulações para o Estudo B.....	164

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Estrutura da tese de doutorado.....	6
FIGURA 2.1 - Partes da cana.....	13
FIGURA 3.1 – Sistemas de processamento de cana e palhiço.....	21
FIGURA 3.2 - Localização do extrator primário em colhedoras.....	23
FIGURA 3.3 – Rodotrem canavieiro.....	24
FIGURA 3.4 – Vista de uma câmara de ventilação da estação de limpeza a seco.....	25
FIGURA 3.5 – Tacômetro e potenciômetro para regulagem da rotação do extrator primário da colhedora.....	26
FIGURA 3.6 – Colhedora em operação com extrator primário e secundário acionados...	27
FIGURA 3.7 – Enleiradora de palhiço em operação.....	28
FIGURA 3.8 – Fardo cilíndrico.....	29
FIGURA 3.9 – Fardo prismático.....	29
FIGURA 3.10 – Carregamento de caminhão para transporte de fardos à usina.....	30
FIGURA 3.11 – Recolhedora de forragem.....	31
FIGURA 4.1 – Esquema do processo de modelagem.....	34
FIGURA 4.2 – Programação de veículos em uma borracharia.....	37
FIGURA 4.3 – Programação resultante do sistema da borracharia.....	37
FIGURA 4.4 – Ajuste de distribuição teórica de probabilidade a histograma de dados....	40
FIGURA 4.5 – Programação de manutenção preventiva.....	40
FIGURA 4.6 – Ambiente de programação no <i>software Arena</i>	44
FIGURA 5.1 – Resumo esquemático da metodologia adotada no estudo.....	53
FIGURA 5.2 – Caminhão baú com infraestrutura para experimentação agrícola.....	54
FIGURA 5.3 – Colhedoras utilizadas nos ensaios de campo.....	55
FIGURA 5.4 – Faca para corte da cana em rebolos.....	55
FIGURA 5.5 – Conjunto de rolos picadores.....	56
FIGURA 5.6 - Caminhão transbordo recebendo cana processada pela colhedora.....	56
FIGURA 5.7 – Colhedoras operando sequencialmente em uma mesma área.....	57
FIGURA 5.8 – Rodotrem recebendo a carga de um transbordo.....	57
FIGURA 5.9 – Sensor de pulso eletrônico para medição da distância percorrida pela colhedora.....	59
FIGURA 5.10 – Sensores de fluxo para medição do consumo de combustível da colhedora.....	59
FIGURA 5.11 – Painel para registro das informações da colhedora.....	60

FIGURA 5.12 – Coleta de material processado sobre o transbordo.....	63
FIGURA 5.13 – Material utilizado no ensaio de impurezas.....	64
FIGURA 5.14 – Duas equipes de separação para o ensaio de impurezas.....	65
FIGURA 5.15 – Separação da amostra em cana, ponteiro, palha e terra.....	65
FIGURA 5.16 – Preparação de amostras para determinação de umidade.....	66
FIGURA 5.17 – Conjunto trator-enleiradora de palhão.....	69
FIGURA 5.18 - Aspecto da área de colheita após a passagem do conjunto trator-enleiradora de palhão.....	70
FIGURA 5.19 - Conjunto trator-enfardadora posicionado sobre leira de biomassa.....	70
FIGURA 5.20 – Enfardadora coletando a leira de biomassa e formando fardo prismático.....	71
FIGURA 5.21 – Fardos prismáticos grandes dispostos na área de recolhimento.....	71
FIGURA 5.22 – Carregamento de fardos no caminhão prancha.....	72
FIGURA 5.23 – Caminhão prancha carregado com os fardos.....	72
FIGURA 5.24 – Descarregamento dos fardos na usina.....	73
FIGURA 5.25 – Colocação de fardo no equipamento de trituração de fardos.....	73
FIGURA 5.26 – Área para mensuração do palhão remanescente sobre o solo.....	82
FIGURA 5.27 - Conjunto trator-enleiradora de biomassa.....	85
FIGURA 5.28 – Conjunto trator-enfardadora utilizado no ensaio.....	85
FIGURA 5.29 – Conjunto trator-recolhedor de fardos em operação.....	86
FIGURA 5.30 – Transferência de fardos para a lateral do carreador.....	86
FIGURA 5.31 – Carregamento de caminhão por carregadora, realizado no carreador.....	87
FIGURA 5.32 – Retirada de amostra para realização do ensaio de impurezas e umidade no fardo.....	88
FIGURA 5.33 – Modelo de simulação com distinção da parte lógica e da parte de animação.....	102
FIGURA 5.34 – Fluxograma das operações na área industrial.....	103
FIGURA 5.35 – Fluxograma das operações de CCT.....	105
FIGURA 5.36 – Fluxograma das operações de recolhimento de palhão.....	106
FIGURA 5.37 – Animação de uma frente de colheita de cana, com sistema de recuperação do palhão anexo.....	110
FIGURA 5.38 – Representação da área industrial com displays indicativos da simulação.....	111
FIGURA 5.39 – Animação das operações realizadas na área industrial.....	112
FIGURA 5.40 – Planilha de inserção de dados. Seção Sistema.....	114
FIGURA 5.41 – Planilha de inserção de dados. Seções Máquinas e Transporte de cana...	114

FIGURA 5.42 – Planilha de inserção de dados. Seção Enfardamento com carregamento direto.....	115
FIGURA 5.43 – Planilha de inserção de dados. Seções Enfardamento com transbordo interno, Colheita Integral e Colheita com Limpeza Parcial.....	115
FIGURA 5.44 – Planilha de exportação de dados. Seções Produção de cana e palhiço e Máquinas – cana.....	116
FIGURA 5.45 – Planilha de exportação de dados. Seções Transporte - cana e Máquinas – palhiço.....	117
FIGURA 5.46 – Planilha de exportação de dados. Seção Transporte – palhiço.....	117
FIGURA 6.1 – Percentual de impurezas vegetais (b.u.) – valores mínimo, médio e máximo por tratamento.....	127
FIGURA 6.2 – Carga transportada por viagem – valores mínimo, médio e máximo por tratamento.....	128
FIGURA 6.3 – Carga transportada por viagem em função das impurezas vegetais (b.u.).	129
FIGURA 6.4 – Amarração dos fardos com seis cordões.....	132
FIGURA 6.5 – Fardo com cordões cortados e camadas de palhiço abertas.....	133
FIGURA 6.6 – Enleiradora de palhiço fabricada pela Bowman.....	147
FIGURA 6.7 – Enleiradora de palhiço New Holland.....	147
FIGURA 6.8 – Média móvel da variável tempo de permanência do veículo na usina.....	150
FIGURA 6.9 – Indicação da correlação da variável tempo de permanência do veículo na usina.....	151
FIGURA 6.10 – Indicação da quantidade de lotes formados em 45 dias de simulação.....	152
FIGURA 6.11 – Valor médio da variável de referência em cada lote formado.....	153
FIGURA 6.12 – Intervalo de confiança de 95% no entorno da média para o período de 45 dias.....	153
FIGURA 6.13 – Intervalo de confiança de 95% no entorno da média para o período de 100 dias.....	154
FIGURA 6.14 – Comparativo da produção e custos dos cenários do Estudo B.....	172

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 CANA-DE-AÇÚCAR: AÇÚCAR, ETANOL E ENERGIA	7
2.1 Sustentabilidade	8
2.2 Biomassa e Palhiço.....	12
2.3 Geração de Energia	14
2.4 Etanol de Segunda Geração.....	16
3 SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR	18
3.1 Colheita Integral.....	22
3.2 Colheita com Limpeza Parcial	25
3.3 Colheita com Limpeza Convencional	27
3.3.1 Enfardamento.....	29
3.3.2 Recolhimento com Forrageiras	31
4 PESQUISA OPERACIONAL E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS.....	33
4.1 Simulação.....	34
4.2 Simulação de Eventos Discretos	36
4.3 Diferenciais da Simulação Frente a Outras Abordagens.....	38
4.4 O Método de Monte Carlo e os <i>Softwares</i> de Simulação de Eventos Discretos.....	41
4.5 Estudos de Simulação Discreta Aplicados ao Setor Sucroalcooleiro	45
5 METODOLOGIA: ENSAIOS DE CAMPO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	50
5.1 Ensaio de Campo	54
5.1.1 Ensaio de Colheita	54
5.1.1.1 Índices da Colhedora de Cana-de-açúcar.....	58
5.1.1.2 Índices do Transporte de Cana-de-açúcar.....	61
5.1.1.3 Índices do Sistema de Corte, Carregamento e Transporte (CCT)	62
5.1.2 Ensaio de Enfardamento com Carregamento de Fardos em Caminhões	69
5.1.2.1 Índices do Conjunto trator-enleiradora de Palhiço	74
5.1.2.2 Índices do Conjunto Trator-enfardadora.....	77
5.1.2.3 Índices do Carregamento, Transporte e Impureza dos Fardos.....	81
5.1.2.4 Índices do Palhiço	81

5.1.3 Ensaio de Enfardamento com Transbordo Interno de Fardos.....	84
5.1.3.1 Índices do Conjunto Trator-recolhedor de Fardos.....	88
5.1.3.2 Índices do Palhiço.....	91
5.2 Modelagem e Simulação.....	93
5.2.1 Premissas do modelo de simulação.....	94
5.2.1.1 Sistemas de Corte, Carregamento e Transporte de Cana-de-açúcar... ..	96
5.2.1.2 Sistema de Recolhimento de Biomassa.....	99
5.2.2 Descrição do Modelo de Simulação.....	102
5.2.2.1 Descrição da Lógica do Modelo de Simulação.....	103
5.2.2.2 Descrição da Animação do Modelo de Simulação.....	109
5.2.3 Interfaces de Entrada e Saída de Dados do Modelo.....	113
5.2.4 Planilha de custo.....	118
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	122
6.1 Ensaios de Campo.....	122
6.1.1 Ensaio de Colheita.....	122
6.1.2 Ensaio de Enfardamento com Carregamento de Fardos em Caminhões.....	130
6.1.3 Ensaio de Enfardamento com Transbordo Interno de Fardos.....	137
6.1.4 Comparação Entre os Ensaios de Enfardamento.....	143
6.2 Simulação.....	148
6.2.1 ESTUDO A - Comparação dos Sistemas de Colheita de Cana e Aproveitamento de Biomassa, Configurados a Partir das Condições Operacionais dos Ensaios de Campo.....	156
6.2.2 ESTUDO B - Comparação de Sistemas de Colheita de Cana e Aproveitamento de Biomassa em Igualdade de Condições Operacionais.....	163
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	176
REFERÊNCIAS.....	181
APÊNDICES.....	187
ANEXOS.....	198

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é um produto cuja exploração econômica é importante para o Brasil desde os tempos coloniais. Nos últimos 40 anos, porém, seu cultivo foi particularmente dinamizado por seu uso não apenas como insumo para a produção de açúcar, mas também para a fabricação de etanol.

A tecnologia do álcool combustível colocou o Brasil em evidência quanto à autonomia energética, uma vez que dispor de combustíveis derivados de fontes alternativas ao petróleo protege o país de flutuações de oferta e demanda desse produto, gerando vantagens estratégicas que já foram confirmadas pela história. Atualmente, outros países se espelham na experiência brasileira como modelo para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e o próprio governo tem interesse em sua padronização como uma *commodity* internacional.

Adicionalmente, o desenvolvimento de motores bicombustível (tecnologia *flex-fuel*), também ampliou o mercado nacional automotivo para o etanol, permitindo ao consumidor ter opções quanto ao combustível a ser adquirido, que passou a ser avaliado duplamente por preço e por desempenho.

O fato de que o etanol é obtido a partir de uma fonte renovável e com menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) em comparação aos combustíveis fósseis também ampliou sua maior aceitação no mercado. Em uma sociedade mais consciente quanto ao impacto ambiental de determinadas escolhas, tais vantagens constituem um diferencial de extrema importância, especialmente para aplicações em grandes centros urbanos. Simultaneamente, as tecnologias nacionais desenvolvidas para a exploração comercial da cana-de-açúcar, tanto na área agrícola como na área industrial, foram determinantes para que o Brasil se tornasse uma referência na produção de açúcar e etanol a baixo custo.

Assim, quatro fatores podem resumir a atratividade recente da produção brasileira de açúcar e etanol: a forte perspectiva de ampliação de mercados interno e externo; a adequação ambiental; a disponibilidade de terras para expansão – boa parte em áreas já degradadas de outras culturas - e o baixo custo de produção. Graças a estes fatores, o setor sucroalcooleiro brasileiro se expandiu rapidamente nos últimos anos, mediante a abertura de novas unidades de grupos empresariais já consolidados e alguns até sem tradição na área de açúcar e álcool. Esse cenário também atraiu investidores estrangeiros que entenderam que o sistema de produção brasileiro constitui uma ótima oportunidade de negócio.

No entanto, a mesma temática ambiental que ressalta a importância de adoção do álcool combustível como alternativa ao petróleo, levou ao questionamento do sistema de produção da cana-de-açúcar. A queima controlada, uma operação tradicional que antecede o corte manual, passou a ser criticada por questões de emissões e agressão ao meio ambiente. Esta operação é realizada com o objetivo de eliminar parcialmente as folhas do canavial, para facilitar o corte manual, evitando danos físicos aos trabalhadores rurais, além de afugentar animais peçonhentos.

Como consequência, no Estado de São Paulo foi promulgada a lei 11.241 em 2002, estipulando um cronograma para eliminar totalmente a queima controlada até o ano de 2031. No entanto, o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro, lançado em junho de 2007 conjuntamente pelo setor sucroalcooleiro e pelo governo do Estado propôs a antecipação do cronograma para a eliminação das queimadas até 2014 nas áreas mecanizáveis e até 2017 nas áreas não mecanizáveis. Este protocolo é de adesão voluntária, mas apesar disso, uma parcela significativa das unidades produtoras do Estado já aderiu ao documento.

Diante da restrição da queima, o corte manual torna-se muito desvantajoso, uma vez que as folhas de cana são cortantes e sua presença traz risco e reduz a capacidade de processamento do cortador de cana, onerando esta operação e praticamente obrigando a adoção do sistema mecanizado de colheita. Por outro lado, o desenvolvimento tecnológico atual das colhedoras permite que estas executem a separação da cana e do palhiço¹ com boa eficiência, mediante a regulagem de seus dispositivos de limpeza. Uma parte das usinas já opera com a colheita mecanizada, sem queima prévia do canavial, há anos. Outras, com tradição de colheita de cana inteira queimada, estão em processo de adaptação.

Empreendimentos recentes, que visam a instalação de novas usinas, já contemplam a colheita totalmente mecanizada sem queima prévia na fase de projeto, incluindo no planejamento a aquisição de colhedoras e instalações industriais adequadas para a recepção de cana colhida mecanicamente. De qualquer forma, mediante a exigência da legislação e com o aumento da quantidade de usinas, a perspectiva indica o crescimento da colheita mecanizada de cana-de-açúcar, sem queima, e o aumento do volume de biomassa deixada sobre o solo, o que demanda novos aprendizados em termos de manejo, ao mesmo tempo em que gera oportunidades de utilização deste resíduo.

¹palhiço: composto de folhas secas; folhas verdes; ponteiros; rebolos e colmos e suas frações (RIPOLI, 1991).

Até certa quantidade, a presença da biomassa no campo é benéfica, porém seu excesso pode trazer problemas agrônômicos, tornando necessária a adoção de operações adicionais para seu processamento.

Frente à maior disponibilidade de biomassa, algumas linhas de pesquisa aplicada buscam destinação para este produto, sendo que as opções mais discutidas giram em torno de duas alternativas: a utilização do palhiço para geração de energia elétrica, da mesma maneira que o bagaço, e o seu processamento para a fabricação de etanol com tecnologia de segunda geração. Assim, a utilização do palhiço do canavial pode gerar benefício de ordem econômica.

Independente da destinação, energia ou etanol, várias opções de manejo podem ser utilizadas para promover a recuperação da biomassa e sua movimentação até as usinas. As operações de colheita e transporte comercial da cana-de-açúcar utilizam máquinas e veículos de grande porte, com alto custo de aquisição e alto grau de interação operacional, formando um sistema logístico interdependente. Os sistemas que envolvem o processamento da biomassa são igualmente complexos e requerem infraestrutura própria, também de alto custo, com o agravante de que a tendência de porte das usinas em termos de moagem é aumentar, por uma questão de escala de produção, o que implicará no aumento da biomassa gerada.

O planejamento da infraestrutura e o delineamento de políticas operacionais para atender aos objetivos de processamento de uma usina constituem uma tarefa típica da gerência agrícola, para a qual é indicado o uso de ferramentas de maior poder de análise. Diante do exposto, algumas questões são colocadas para investigação a respeito da análise sistêmica das operações de colheita de cana e aproveitamento da biomassa:

- É possível promover a integração da colheita de cana-de-açúcar e do processamento da biomassa?
- Há interesse nesta integração?
- Modelos podem representar tais operações de forma adequada?
- Um modelo seria capaz de suportar tomadas de decisão dessa natureza?

Para responder às questões, esta pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo de simulação discreta para representar os principais sistemas de colheita de cana-de-açúcar com manejo de biomassa integrado, de forma a auxiliar nas tomadas de decisões operacionais desses sistemas, considerados complexos do ponto de vista logístico.

As características físicas distintas dos colmos de cana-de-açúcar e do palhão, como a densidade, por exemplo, condicionam as operações de colheita e transporte o que dificulta a análise do sistema como um todo. Dessa forma, justifica-se a adoção da simulação neste estudo pela possibilidade de representação da interação das operações e conseqüentemente, dos sistemas. Assim, o modelo de simulação fornece subsídios para avaliar os sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar com enfoque também no aproveitamento da biomassa e explorar as interfaces entre os dois sistemas (colheita de cana e aproveitamento da biomassa), de maneira mais adequada.

O modelo de simulação foi previamente parametrizado, para ser capaz de representar a operação de colheita de cana-de-açúcar com aproveitamento da biomassa, conforme suas principais alternativas logísticas.

Dentro dos sistemas selecionados também é possível encontrar variações interessantes, como distâncias, velocidades, largura de trabalho de equipamentos, tipos de configuração de transporte e adoção de operações auxiliares. Estas variações podem ser reproduzidas pelo modelo de simulação para estudos de análise de sensibilidade, subsidiando a tomada de decisão previamente às implementações desses sistemas.

Para auxiliar no desenvolvimento e na verificação do modelo de simulação, testes de campo foram conduzidos para compreender os sistemas de manuseio de biomassa e levantar dados para realizar a modelagem e simulação e a posterior comparação dos sistemas selecionados. Nesse formato, a pesquisa desenvolvida é classificada como empírica descritiva, uma vez que visa a criação de um modelo que explora relações causais entre suas variáveis. A abordagem é quantitativa e o método de pesquisa baseado em modelagem e simulação. A metodologia utilizada é detalhada no capítulo 5.

As diversas configurações operacionais dos sistemas de processamento de cana e biomassa também possuem impacto no custo dos respectivos sistemas. Assim, a análise comparativa dos sistemas contempla duplamente os objetivos de produção e os conseqüentes custos dos cenários. Com este objetivo, o modelo de simulação desenvolvido neste trabalho possui interface com planilhas eletrônicas para a entrada e a saída de dados. O uso de planilhas eletrônicas é bastante difundido em empresas devido à sua interface amigável ao usuário e versatilidade para efetuar cálculos com diversos propósitos: do levantamento de custos ao suporte à produção.

Ao executar o modelo de simulação, as planilhas permitem a configuração dos cenários de interesse e a análise dos resultados operacionais e de custo. O modelo foi utilizado para dois estudos, sendo que no primeiro estudo reproduziu-se os sistemas observados nos ensaios de campo e no segundo estudo comparou-se os sistemas de processamento de cana-de-açúcar e biomassa em igualdade de condições operacionais.

Este trabalho é composto por sete capítulos que se relacionam de uma maneira estruturada:

- O Capítulo 1 – Introdução - expõe a atualidade do tema, o problema de pesquisa e seu objetivo, a motivação e justificativa para o desenvolvimento do estudo e a estrutura do trabalho.
- Os Capítulos 2, 3 e 4, respectivamente: “Cana-de-açúcar: açúcar, etanol e energia”; “Sistemas de aproveitamento de biomassa de cana-de-açúcar” e “Simulação de sistemas”, compõem a base teórica para a tese e fundamentam a escolha da metodologia adotada para abordar o problema de pesquisa.
- O Capítulo 5 detalha a metodologia utilizada na tese, subdividida em duas etapas: a condução dos ensaios de campo, que visou levantar dados operacionais dos equipamentos de processamento do palhiço, e a modelagem e simulação dos sistemas de recolhimento de biomassa.
- O Capítulo 6 apresenta os resultados dos ensaios de campo e as discussões relativas à modelagem e comparação dos sistemas de recolhimento de palhiço por meio de simulação.
- O Capítulo 7 conclui o trabalho indicando suas contribuições, lições aprendidas e sugestões de trabalhos que podem ser desdobrados a partir das atividades que foram conduzidas.

A Figura 1.1 apresenta a estrutura da tese de forma esquemática.

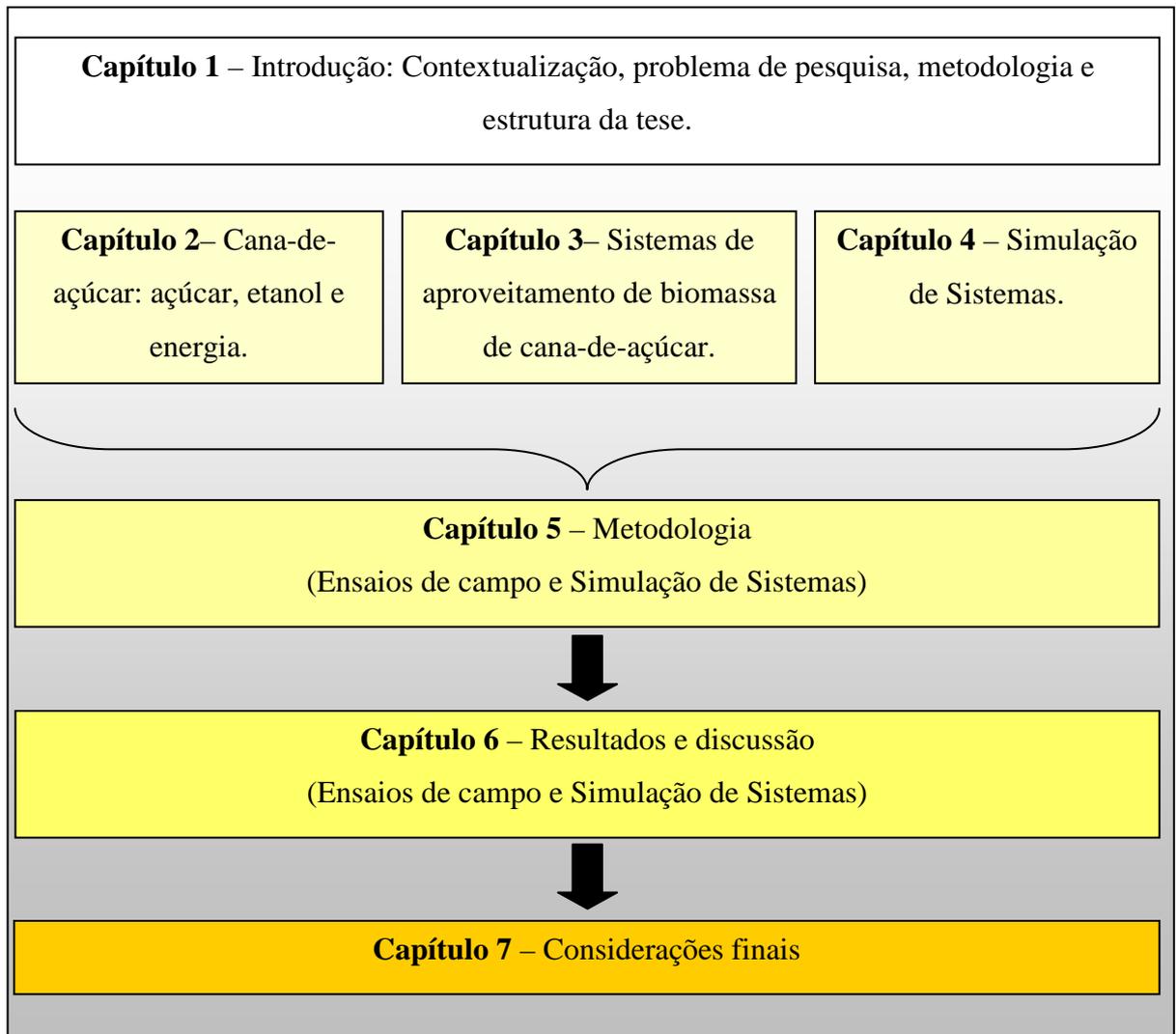


FIGURA 1.1 – Estrutura da tese de doutorado.

2 CANA-DE-AÇÚCAR: AÇÚCAR, ETANOL E ENERGIA

A cana-de-açúcar é uma gramínea de origem asiática e foi introduzida no Brasil na época da colonização em 1532, configurando um ciclo econômico importante que proporcionou o desenvolvimento das regiões que correspondem aos atuais Estados de Pernambuco, Bahia, Rio de Janeiro e São Paulo. As atividades envolviam o plantio, o processamento e a fabricação de açúcar, visando o abastecimento do mercado europeu via Portugal. O sucesso do sistema de produção despertou interesse de outras nações, sendo esta uma das razões que motivou a invasão holandesa no nordeste brasileiro entre 1630 e 1654.

A produção brasileira entrou em declínio em virtude da concorrência com o açúcar das colônias holandesas na América Central e posteriormente na própria Europa a partir da beterraba açucareira. Ainda assim, o setor sempre esteve presente como atividade econômica de forte representação até os dias atuais, com vários desdobramentos políticos e sociais. Como exemplo de influência, o núcleo organizado da produção, formado no entorno dos engenhos e usinas, originou o desenvolvimento de muitas cidades com atividades econômicas ligadas à cana-de-açúcar em estruturas que perduram até os dias atuais.

No final do Século XX, as usinas de açúcar diversificaram a produção e passaram a produzir etanol para fins automotivos, em resposta à instabilidade proporcionada pelos choques do petróleo em 1973 e 1979. O Brasil foi pioneiro na utilização do etanol como combustível veicular, com iniciativas na década de 1920, mas com impulso efetivo na década de 1970 com a introdução do Proálcool, quando o etanol passou a fazer parte da matriz energética brasileira definitivamente (JANK e NAPPO, 2009).

O etanol veicular é utilizado de duas maneiras: hidratado, destinado a veículos com motorização exclusivamente a etanol ou com tecnologia bicombustível (*flex-fuel*); ou anidro, em mistura compulsória à gasolina em percentual que pode variar entre 20 e 25%. Considerando apenas o ano de 2010, a participação dos veículos bicombustíveis no mercado nacional de veículos leves foi de 86,5%. Não apenas automóveis, mas também motocicletas, aviões agrícolas e mais recentemente ônibus têm sido desenvolvidos com motores a álcool (MDIC, 2011, em cópia no ANEXO A).

Nos últimos anos a produção brasileira de cana-de-açúcar aumentou, de 382 milhões de toneladas na safra 2005/2006 para 623 milhões de toneladas na safra 2010/2011, quando foram produzidos 38,1 milhões de toneladas de açúcar e 27,6 milhões de m³ de álcool. (MAPA, 2011, em cópia no ANEXO B).

Dados acumulados de janeiro a setembro de 2010 indicam que o setor está na sétima posição em valores exportados, frente a outras divisas, com US\$9,6 bilhões; o que representa um acréscimo de 45,3% em relação ao mesmo período no ano anterior (MDIC, 2010). Tais números refletem a crescente importância desse setor na geração de divisas para o Brasil, particularmente nas duas macrorregiões produtoras: Centro-Sul, que compreende os Estados do Sudeste, acrescidos de Paraná, Mato Grosso do Sul e Goiás; e região Nordeste.

2.1 Sustentabilidade

Os motivos que levaram ao maior consumo do etanol como combustível nos últimos anos foram vários, como o desenvolvimento recente de motores a etanol com maior confiabilidade do ponto de vista do consumidor, a melhor compensação (*trade-off*) entre desempenho ($L.km^{-1}$) e custo ($R\$.L^{-1}$) e uma mudança de postura do poder público e do próprio mercado consumidor de utilizar combustíveis renováveis com menor emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Macedo et al. (2004) quantificou as emissões de GEE evitadas pela substituição da gasolina pelo etanol e de óleo combustível pelo bagaço excedente em $2,6 t CO_2 eq.m^{-3}$ de etanol anidro ou de $1,7 t CO_2 eq.m^{-3}$ de etanol hidratado para valores médios de produção. Adotando-se as melhores práticas de produção, esses valores sobem cerca de 4%.

Zuurbier e Vooren (2008) atestam que a produção brasileira de etanol de cana-de-açúcar, aliada à produção norte americana, baseada na cultura do milho, corresponde a aproximadamente 90% da produção mundial (referente a 2007). Do total de energia global, o setor de transportes consome uma parcela de 30%, dos quais 98% são supridos por fontes fósseis. Os autores citados apresentam razões que justificam o interesse nos biocombustíveis: do ponto de vista do mercado, há consenso sobre o término do petróleo barato e a volatilidade de seu preço no futuro. Em termos de regulamentação, os biocombustíveis proporcionam segurança energética, redução de gases de efeito estufa e possibilidade de aumento e diversificação de recursos às comunidades agrícolas. Outros motivos a favor são o fato do etanol ser renovável, gerar empregos e que as fontes de produção podem ser disponibilizadas facilmente, considerando tecnologias já existentes.

O etanol pode ser produzido a partir de outras fontes, porém, estudos apresentam o melhor desempenho da cana-de-açúcar. Macedo et al. (2004), apresenta um balanço de energia produzida sobre a energia consumida, onde o etanol de cana-de-açúcar possui razão de 8,3 para sistemas convencionais de produção, podendo chegar até a 10,2 no caso de uso das melhores tecnologias. O mesmo cálculo aplicado à produção de etanol a partir do milho apresenta balanço de 1,3 apenas. Hofstrand (2009) comparou os sistemas de produção de etanol dos Estados Unidos, a partir do milho e do Brasil, a partir da cana-de-açúcar, cujos parâmetros foram resumidos no Quadro 2.1.

QUADRO 2.1 – Comparação entre a produção de etanol brasileira e americana.

Brasil – Cana-de-açúcar	Estados Unidos – Milho
O açúcar da cana pode ser convertido diretamente em etanol.	O amido do milho é primeiramente convertido em açúcar e posteriormente em etanol.
Cana-de-açúcar é plantada a cada seis anos utilizando mudas (própria cana cortada).	Milho é plantado todo ano utilizando sementes.
Fornece cinco cortes em seis anos e depois é replantada.	Fornece uma colheita por ano, tendo que ser replantado anualmente.
Produtividade: 86,6 t.ha ⁻¹ (planta inteira)	Produtividade: 20,8 t.ha ⁻¹ (planta inteira)
Produz cerca de 10,4 t.ha ⁻¹ de sacarose.	Produz cerca de 5,9 t.ha ⁻¹ de amido.
São produzidos 5.247 l.ha ⁻¹ de etanol.	São produzidos 3.935 l.ha ⁻¹ de etanol.
Os insumos são mais baratos por m ³ de etanol.	Os insumos são mais caros por m ³ de etanol.
Custo de produção mais baixo.	Custo de produção mais alto.
Resulta o bagaço como subproduto	O subproduto é utilizado como ração animal.
A fonte de energia para a produção é o bagaço.	As fontes de energia para produzir são gás natural, carvão e diesel.
3,6 milhões de hectares usados na produção.	11,3 milhões de hectares usados na produção.
O Brasil possui potencial de expansão de áreas sem restrição a outras culturas.	A expansão de milho ocorrerá à custa da redução da área de soja e de outras culturas.
Não há subsídios para o etanol.	Há subsídio de US\$0,51 por galão.
Não há tarifas de importação no etanol.	Há uma tarifa de US\$0,54 por galão.

Fonte: adaptado de Hofstrand, 2009, em cópia no ANEXO C. Tradução e conversão de unidades nossa.

No caso específico brasileiro, argumentos freqüentes contrários à produção de etanol a partir da cana-de-açúcar têm sido motivados pelo risco de ocupação desordenada de biomas naturais como a Amazônia e o Pantanal, disputa de áreas para a produção de alimentos, risco ambiental derivado da contaminação de solos (vinhaça, por exemplo), assoreamento de cursos d'água e redução da biodiversidade animal e vegetal. Esta preocupação é legítima e requer legislação específica e monitoramento freqüente por órgãos como CETESB, IBAMA e pelo Governo Federal.

Com finalidade de regulação, o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (MAPA, 2009) foi elaborado com o intuito de disciplinar a expansão e a produção de cana-de-açúcar no território brasileiro de maneira sustentável. Dentre as diretrizes do Zoneamento constam a preservação dos biomas Amazônia, Pantanal e Bacia do Alto Paraguai, assim como as áreas com vegetação preservada original. O zoneamento considera ainda a aptidão de áreas com declividade que proporcione a colheita mecanizada com a tecnologia existente (limite de 12%) e áreas com diminuição do risco de competição com a produção de alimentos.

Simultaneamente à maior demanda mundial por etanol, a temática ambiental também levou ao questionamento de algumas práticas do sistema de produção sucroalcooleiro. Os argumentos relativos à sustentabilidade e seus três pilares (social, ambiental e econômico) ganharam força como premissa a ser respeitada em todos os processos produtivos. Como consequência, na área industrial foram desenvolvidos e implantados sistemas mais eficientes de lavagem de gases e de tratamento e disposição de efluentes, por exemplo. Na área agrícola, dentre outras consequências, a queima controlada do palhço da cana-de-açúcar previamente à colheita também foi considerada atividade desconforme e que deveria ser revista.

Em função da nova realidade, o governo do Estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do país, decretou a Lei 11.241/02 que estipula a eliminação gradativa da queima do palhço da cana-de-açúcar. Complementarmente, a União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA), representando o setor sucroalcooleiro, e o Governo do Estado de São Paulo, assinaram em 04 de junho de 2007 o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro, de adesão voluntária por parte das usinas, que, dentre diversas determinações, estipula a antecipação dos prazos para a eliminação da prática da queima da cana-de-açúcar em relação à Lei nº 11.241/02.

Há uma diferenciação do cronograma para eliminação da queima conforme a possibilidade de inserção de máquinas para efetuar a colheita. Segundo o Protocolo Agroambiental, nas áreas mecanizáveis, com declividade até 12%, a antecipação em relação à legislação estadual é de 7 anos e nas áreas não mecanizáveis, a antecipação é de 14 anos (Quadro 2.2).

QUADRO 2.2 – Prazos para a eliminação da queima da palha da cana no Estado de São Paulo

Áreas mecanizáveis			Áreas não mecanizáveis		
Lei Estadual 11241/02	Protocolo Agroambiental	Redução	Lei Estadual 11241/02	Protocolo Agroambiental	Redução
2021	2014	7 anos	2031	2017	14 anos

Fonte: Elaborado a partir de UNICA (2011a), em cópia no ANEXO D

A diferenciação de prazos, conforme a declividade das áreas, deve-se também à preocupação com a substituição do sistema de produção vigente, pois, com o término da queima, a operação de corte manual deverá ser eliminada. A substituição deve-se a motivos econômicos, que inviabiliza o corte manual do canavial sem queima, uma vez que a produtividade diária do cortador de cana é reduzida a menos da metade ao processar a cana sem queima (HASSUANI, LEAL e MACEDO, 2005).

Frente a esta perspectiva, e ao fato de que há um grande contingente de trabalhadores em geral sem formação, que dependem da atividade de corte manual, a perspectiva de aumento da mecanização é um fator de grande risco social.

Complementarmente, mortes de cortadores de cana por excesso de trabalho foram associadas às condições de trabalho e à forma de remuneração. ALVES (2008), aborda especificamente os problemas gerados pela remuneração do cortador, por produção, e os danos à saúde do ambiente de corte de cana. No trabalho são propostas alterações na divisão do trabalho do cortador em etapas, por um grupo coletivo de trabalhadores em um mesmo eito, além da alteração da remuneração do trabalhador com pagamento fixo, por horas trabalhadas.

Em ALVES (2006), as causas das mortes de cortadores já haviam sido exploradas e a modificação completa do processo de produção, substituindo o trabalho manual por máquinas, já era apontada como a solução para a questão. Ainda assim, segundo o autor, essa possibilidade esbarrava na criação de postos de trabalho que pudessem compensar a perda de ocupações decorrente do aumento da mecanização, o que poderia ser feita mediante programas públicos de reforma agrária.

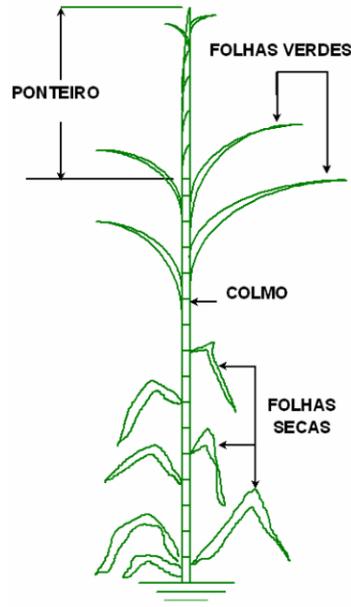
A quantidade de trabalhadores no corte manual gira em torno de 500 mil pessoas no Brasil e 140 mil apenas no Estado de São Paulo (UNICA, 2011b, em cópia no ANEXO E). Assim, iniciativas passaram a ser tomadas para a capacitação dos cortadores para exercer outras atividades, dentro ou fora do setor sucroalcooleiro, seja por iniciativa de cada usina isoladamente ou coordenada por instituições como, por exemplo, o programa RenovAÇÃO, coordenado pela UNICA.

De qualquer modo, em maior ou menor prazo, o aumento da colheita de cana sem queima prévia traz a perspectiva de se dispor no futuro de áreas extensas e com grande quantidade de palhico sobre o solo (biomassa). A destinação do palhico é um assunto recente e com várias pesquisas ainda em curso que permitirão o seu uso comercial, dentre os quais a utilização da biomassa como insumo energético, a ser queimado nas caldeiras das usinas de maneira similar ao bagaço ou a sua utilização para a fabricação de etanol de segunda geração, a partir da quebra da celulose.

2.2 Biomassa e Palhico

Segundo CENBIO (2011), em cópia no ANEXO F, do ponto de vista energético, biomassa “seria todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para a produção de energia.” Assim, são considerados biomassa os produtos agrícolas e florestais como madeira e restos de cultura, resíduos animais, dentre outros.

O colmo da cana-de-açúcar é a parte da matéria-prima de maior interesse comercial, cuja moagem permite a extração do caldo e a fabricação do açúcar e do etanol. Como subproduto resultante da moagem dos colmos, o bagaço já é utilizado pelas usinas como insumo energético para queima nas caldeiras, para a geração de energia para o próprio processo industrial e venda de excedentes à rede. Os resíduos da colheita da cana, não são um material uniforme e podem ser divididos em três porções: ponteiros, folhas secas e folhas verdes (Figura 2.1). O ponteiro se situa na parte superior dos colmos, a partir do último entrenó de cana. As folhas secas possuem coloração marrom e as verdes possuem a coloração verde ou amarela. (HASSUANI, LEAL e MACEDO, 2005)



Fonte: HASSUANI, LEAL e MACEDO, 2005, p.21

FIGURA 2.1 - Partes da cana.

A definição de “palhicho”, apresentada por Ripoli (1991) é mais abrangente e constantemente referenciada em publicações acadêmicas, envolvendo não apenas a palha, considerada pelo autor apenas como as folhas secas, mas também as folhas verdes, ponteiros, colmos ou suas frações, rebolos ou suas frações, com terra a eles agregados.

O palhicho remanescente da colheita de cana pode ser caracterizado como biomassa, uma vez que há interesse em sua utilização para a geração de energia. Este processo pode ocorrer diretamente, pela queima nas caldeiras das usinas ou indiretamente como combustível automotivo, em função das tecnologias em desenvolvimento para a fabricação de etanol de segunda geração.

A manutenção da biomassa sobre o solo após a colheita possui vantagens e desvantagens que foram resumidas por Hassuani, Leal e Macedo (2005). Os argumentos a favor se baseiam na possibilidade de obter benefícios agrônômicos em relação ao solo, como a proteção contra a erosão causada pelo vento e pela chuva, redução da variação da temperatura, aumento da atividade biológica, aumento da infiltração e da disponibilidade de água e o efeito inibidor para o surgimento de ervas daninhas. Os argumentos contrários justificam que a presença da biomassa traz risco de incêndio e prejuízos como a dificuldade de visualização das linhas de cana para o cultivo, atraso na brotação e ocorrência de falhas das soqueiras de cana em regiões com temperaturas menores e/ou com solo úmido e maior propensão à proliferação de insetos.

Buscando conciliar os interesses agrônômicos e os econômicos, mediante o uso de tecnologia é possível estabelecer operações que possam manejar adequadamente a biomassa presente no canavial. Pode-se efetuar regulagens para deixar o volume adequado de material sobre o solo, de maneira a garantir os benefícios apresentados e retirar a parcela excedente.

Com base em diversos levantamentos com variedades e estágios de corte diferentes, Hassuani, Leal e Macedo (2005) concluíram que o potencial disponível de palhiço (ponteiros, folhas verdes e folhas secas), em matéria seca, corresponde a 14% da massa dos colmos. Ensaio de campo dentro do mesmo projeto concluíram que o volume de biomassa sobre o solo de $7,5 \text{ t.ha}^{-1}$ seria suficiente para promover o chamado “efeito herbicida”, inibidor do desenvolvimento de ervas daninhas no canavial.

2.3 Geração de Energia

A busca por novas fontes de energia representa uma medida de resguardo para o cenário econômico para os anos futuros. A manutenção do ritmo de crescimento brasileiro dos últimos anos irá requerer que novas fontes sejam desenvolvidas sob o risco de o país vivenciar uma nova situação de crise energética, por limitação na oferta de energia, como ocorreu em 2001.

Esse assunto é recorrente quando as perspectivas de crescimento suspeitam barrar na infraestrutura. O aumento da atratividade do preço da energia gerada pelas usinas, com bagaço de cana, constitui uma medida de curto prazo que poderia ser adotada para aumentar a oferta de energia.

O fornecimento de energia por parte das usinas possui características peculiares que a tornam mais interessantes do ponto de vista estratégico:

- (i) a safra e a geração de energia elétrica coincidem com o período de seca, quando os reservatórios de água, origem da maior parte da energia elétrica brasileira, estão com capacidade reduzida;
- (ii) as usinas encontram-se distribuídas dentro do território nacional, mais próximas aos locais de consumo, reduzindo as perdas na operação de distribuição;
- (iii) projetos de menor complexidade e com menores danos ambientais quando comparados com projetos de geração de energia por usinas hidroelétricas.

Macedo (2005, p.28) afirma que o setor sucroalcooleiro já apresenta uma expressiva contribuição (sustentabilidade responsiva) para a substituição dos combustíveis fósseis, indo além da autossuficiência em energia elétrica e térmica. De acordo com o autor, o setor:

Gera 9,7 TWh de energia elétrica e mecânica (3% da eletricidade gerada no país)

Usa bagaço como combustível: 17,5 Mtep (equivalente à soma de todo o gás natural – GN – e óleo combustível usados no país)

Produz 180.000 barris/dia de etanol (o equivalente a 50% de toda a gasolina usada no país)

O autor considera ainda que os objetivos energéticos do setor incluem aumentar a eficiência de uso do bagaço, desenvolver a recuperação e utilização da palha e de novos produtos da sacarose. Confirmando o uso da biomassa, o pesquisador reforça que, para aumentar a produção da energia gerada pelo setor, há duas opções, sendo a primeira o aumento da geração de energia elétrica e a segunda a produção de etanol a partir dos resíduos (bagaço excedente e palha recuperada).

A partir da década de 1990, o excedente de bagaço nas usinas brasileiras teve um aumento significativo, em virtude da melhoria dos processos produtivos, criando um mercado dessa biomassa para outras indústrias. Porém, em virtude da crise energética de 2001, a remuneração da energia vendida para a rede passou a viabilizar investimentos nas usinas para a implantação de caldeiras de alta pressão e processos mais eficientes, tornando possível a geração de energia elétrica adicional. Assim, usinas que comercializavam o bagaço passaram a consumi-lo internamente para aumentar a exportação da energia elétrica (CTC, 2011, em cópia no ANEXO G).

A projeção de maior disponibilidade da palhaço, aliada à necessidade nacional de se dispor de novas fontes de energia fazem aumentar o interesse de utilização da biomassa como insumo energético, de maneira similar ao bagaço. Conforme Macedo (2005, p.62), “a operação com sistemas convencionais (vapor) em alta pressão, com 40% de palha recuperada, se implantada em 80% dos sistemas poderia levar, com a produção atual de cana a cerca de 30 TWh de excedente (9% do consumo atual de energia)”.

As usinas utilizam tradicionalmente tecnologia de cogeração com capacidade de apenas garantir o seu próprio suprimento energético. Mesmo esses sistemas, com implantação de caldeiras com maior pressão, podem gerar cerca de 40 kWh por tonelada de cana processada (CORREA NETO e RAMON, 2002 apud CASTRO, BRANDÃO e DANTAS, 2010).

No entanto, tecnologias mais novas (extração-condensação) são capazes de produzir até 96 kWh por tonelada de cana, que em média podem exportar 80 kWh, com a utilização total do bagaço. Ao se adicionar a palha não queimada no campo, seria possível gerar até 200kWh por tonelada de cana processada (KITAYMA, 2008 apud CASTRO, BRANDÃO e DANTAS, 2010).

Atenta-se porém, que uma das condições de maior interesse para a venda de energia é a remuneração paga por ela. O setor de geração e distribuição de energia é regulamentado, com forte interferência estatal. No passado recente, frente à crise energética algumas usinas fecharam bons contratos de venda de energia, o que contribuiu para a melhoria dos processos internos para o interesse de utilização da biomassa com essa finalidade.

2.4 Etanol de Segunda Geração

Uma segunda alternativa para destinação do palhiço da cana-de-açúcar e do próprio bagaço resultante da moagem é a fabricação de etanol de segunda geração ou etanol lignocelulósico, que segundo Rodrigues (2010, em cópia no ANEXO H), difere do etanol de primeira geração por obter este produto a partir de toda a planta e não apenas da fermentação de parte dela.

Marques, (2009, em cópia no ANEXO I) cita que “O alvo é aproveitar o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, fontes de celulose que respondem por dois terços da energia da planta, mas não são convertidos em biocombustíveis.” O processo envolve uma reação de hidrólise, que é uma quebra de moléculas que pode ser desenvolvida em diferentes rotas tecnológicas, mas que ainda não é viável do ponto de vista comercial.

Além do bagaço e do palhiço da cana-de-açúcar, diversos materiais poderiam ser utilizados para a fabricação de etanol de segunda geração, dentre os quais restos de culturas, aparas de madeira e forrageiras diversas. Porém, no caso brasileiro, a consolidação da tecnologia possibilitaria ampliar ainda mais os benefícios de aumento da produção de etanol a partir de subprodutos da cana-de-açúcar, ou seja, matérias primas já disponíveis.

Sugimoto (2008) diz que o desafio de converter a lignina presente no bagaço e no palhiço em açúcares e posteriormente em etanol por meio da fermentação é que esses materiais são muito resistentes aos ataques de agentes físicos e biológicos, com uma estrutura muito difícil de ser quebrada. Para isso, dois processos estão sendo pesquisados: a adição de

ácido sulfúrico (hidrólise ácida) ou a adição de enzimas (hidrólise enzimática), para quebrar os polímeros da celulose e da hemicelulose, transformando-os em açúcares fermentáveis.

Segundo Ereno (2007, p.29), “espera-se obter o etanol por via enzimática utilizando celulasas, enzimas produzidas por micro-organismos capazes de quebrar o açúcar da celulose, que será transformado em álcool combustível após o processo de fermentação”. A produção enzimática poderia gerar um adicional de 150 mil litros por dia para uma usina que produz 1 milhão de litros de etanol por dia (aumento de 15%), que pode chegar a 400 mil litros por dia com a otimização da técnica (aumento de 40%).

O domínio da tecnologia de produção comercial de etanol de segunda geração é esperado mundialmente em decorrência do ganho de se produzir etanol a partir de diversas fontes disponíveis em larga escala, sem a necessidade de aumento de área de produção, reduzindo o risco de se substituir áreas de produção de alimentos para a produção de biocombustíveis.

3 SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR

O planejamento de operações em cadeias produtivas agroindustriais é particularmente diferenciado de outros setores em virtude de características próprias, as quais foram resumidas por Batalha e Silva (2007) em cinco tópicos:

- Sazonalidade de disponibilidade de matéria-prima
- Variações da qualidade da matéria-prima
- Percibilidade da matéria-prima
- Sazonalidade de consumo
- Percibilidade do produto final

As atividades do setor sucroalcooleiro se enquadram neste perfil, particularmente nos quesitos de sazonalidade, percibilidade e de variações da qualidade da matéria-prima. A sazonalidade refere-se ao ciclo vegetativo dos produtos, que em função do clima e das estações, determina épocas ideais de plantio, maturação e colheita. A percibilidade está relacionada à vida útil do produto, enquanto este ainda preserva suas características originais. A qualidade diz respeito ao atendimento das expectativas do cliente quanto ao produto (ou serviço) oferecido.

A maneira como as operações nas cadeias produtivas são projetadas e conduzidas, torna mandatória a adoção de um mecanismo de coordenação, de forma a explorar possibilidades operacionais que possam reduzir custos e maximizar lucros, particularmente quando lidam com *commodities*, cujo valor agregado é geralmente baixo.

A logística é uma área do conhecimento que basicamente lida com o planejamento de operações com o intuito de atender os clientes finais, com qualidade percebida e custos adequados:

A logística empresarial trata de todas as atividades de movimentação e armazenagem que facilitam o fluxo de produtos desde o ponto de aquisição da matéria-prima até o ponto de consumo final, assim como dos fluxos de informação que colocam os produtos em movimento, com o propósito de providenciar níveis de serviço adequados aos clientes a um custo razoável. (BALLOU, 1993, p.24)

Aplicada ao setor sucroalcooleiro, o planejamento logístico das operações de abastecimento de matérias primas e insumos deve ser coordenado pelas usinas para alcançar os objetivos de produção de açúcar, etanol e energia a baixo custo e com alta eficiência

operacional. A estrutura de produção brasileira tem a usina como empresa focal da cadeia que determina a cadência de todo o sistema de produção agroindustrial.

Em termos de sazonalidade, no Brasil, o setor sucroalcooleiro possui operação concentrada no período de 8 meses aproximadamente (safra de abril a novembro na região Centro-Sul), com o consumo de açúcar e etanol distribuídos ao longo de todo o ano. Essa característica ressalta a importância de dispor de sistemas logísticos adequados de movimentação e armazenagem, tanto de matéria-prima como de produtos acabados. Como as escalas de produção são altas, maior é o desafio de coordenar as operações a baixo custo.

No tocante à perecibilidade, o tempo decorrido entre o corte da cana no campo e a sua moagem na usina deve ser o menor possível, uma vez que com o passar do tempo, há perda de sacarose na matéria-prima.

Já no quesito qualidade, a cana destinada à moagem deve possuir algumas características ideais: conter alta concentração de sacarose e estar limpa, ou seja, possuir baixos índices de impurezas minerais (terra), impurezas vegetais (ponteiros, folhas secas e folhas verdes) e soqueiras (rizomas) arrancadas. A presença das impurezas interfere na eficiência de extração, no arraste de açúcar e no processo de fabricação de açúcar e etanol.

O planejamento das operações de colheita e transporte de cana e mais recentemente, de movimentação de biomassa são influenciados pelos fatores recém apresentados. Considerando a usina como um empreendimento que foca a produção de açúcar, etanol e energia, há que se considerar um sistema de produção integrado, uma vez que, dependendo do sistema adotado, há compartilhamento de recursos materiais (máquinas e veículos) e humanos e de políticas para a operação destes recursos (regimes de turnos de trabalho, políticas de manutenção, procedimentos de refeições, estabelecimento de cotas de produção diária, etc.).

Novamente, chama-se a atenção de que as decisões envolvendo esses sistemas tornam-se mais complexas com o aumento da escala de produção, o que é tendência no setor sucroalcooleiro em virtude do aumento da capacidade de moagem das usinas. Esse fato requer maior quantidade de equipamentos, que são recursos de alto custo, além de funcionários adicionais.

Na definição de Taylor (1970, apud FREITAS FILHO, 2001, p.6), um sistema corresponde a “um conjunto de objetos, como pessoas ou máquinas, por exemplo, que atuam e interagem com a intenção de alcançar um objetivo ou propósito lógico”. Nesse sentido, as operações logísticas sofrem a interferência de vários elementos, que condicionam as suas atividades, dentre os quais:

- Recursos humanos (motoristas, operadores);
- Infraestrutura (máquinas, veículos, implementos, estradas, estoques);
- Legislação (trabalhistas, de transporte, tributação);
- Questões ambientais (emissões, clima).

Durante o período de safra, a manutenção do abastecimento de cana-de-açúcar para o processamento industrial é o principal desafio da equipe gerencial da área agrícola, sob o risco de interrupção da produção. O sistema de corte, carregamento e transporte (CCT) de cana-de-açúcar constitui um grupo de operações que responde por cerca de 30% do custo total de produção da cana (VIAN e MARIN, 2010, em cópia no ANEXO J).

O interesse no processamento da biomassa da cana-de-açúcar levou ao desenvolvimento de diversos sistemas que possibilitam o manuseio do palhicho resultante da colheita da cana com o objetivo de geração de energia elétrica ou fabricação de etanol de segunda geração. De qualquer maneira, o recolhimento, o processamento e o transporte da biomassa para a usina ainda não é uma questão que está consolidada do ponto de vista logístico. Uma das questões principais é a interface do sistema de recuperação do palhicho com o sistema de CCT, pois algumas alternativas de processamento da biomassa consideram a operação conjunta para a movimentação dos dois materiais.

Sistemas logísticos para o manuseio da biomassa da cana-de-açúcar foram descritos e comparados por diversos autores, dentre os quais destacam-se os estudos realizados por Michelazzo e Braunbeck (2008), Ripoli e Ripoli (2004) e Hassuani, Leal e Macedo (2005). No estudo de Michelazzo e Braunbeck (2008) foram avaliados os sistemas de enfardamento, picado a granel (processamento por forrageiras), briquetagem, peletização, fardo algodoeiro e colheita integral; o sistema de colheita integral apresentou o menor custo de recuperação de palhicho.

Adicionalmente, Ripoli e Ripoli (2004) descreveram várias alternativas para o processamento de biomassa da cana-de-açúcar e suas interfaces com o meio ambiente e geração de energia. Hassuani, Leal e Macedo (2005) testaram diversas alternativas de recuperação de palhicho, dos quais os sistemas de colheita integral, colheita com limpeza parcial e colheita convencional com posterior recolhimento de palhicho foram considerados em uma avaliação de custo. Neste estudo destacaram-se os sistemas de colheita integral, que apresentou o menor custo por tonelada recuperada em base seca - US\$13,70 e a colheita convencional com posterior recolhimento do palhicho por meio de enfardamento, com custo de US\$ 18,49.

A Figura 3.1 apresenta uma estrutura dos sistemas de colheita de cana com recuperação de palhiço mais comumente estudados. Todos os sistemas principiam com a colheita mecanizada, com diferentes níveis de regulação do sistema de limpeza das colhedoras.

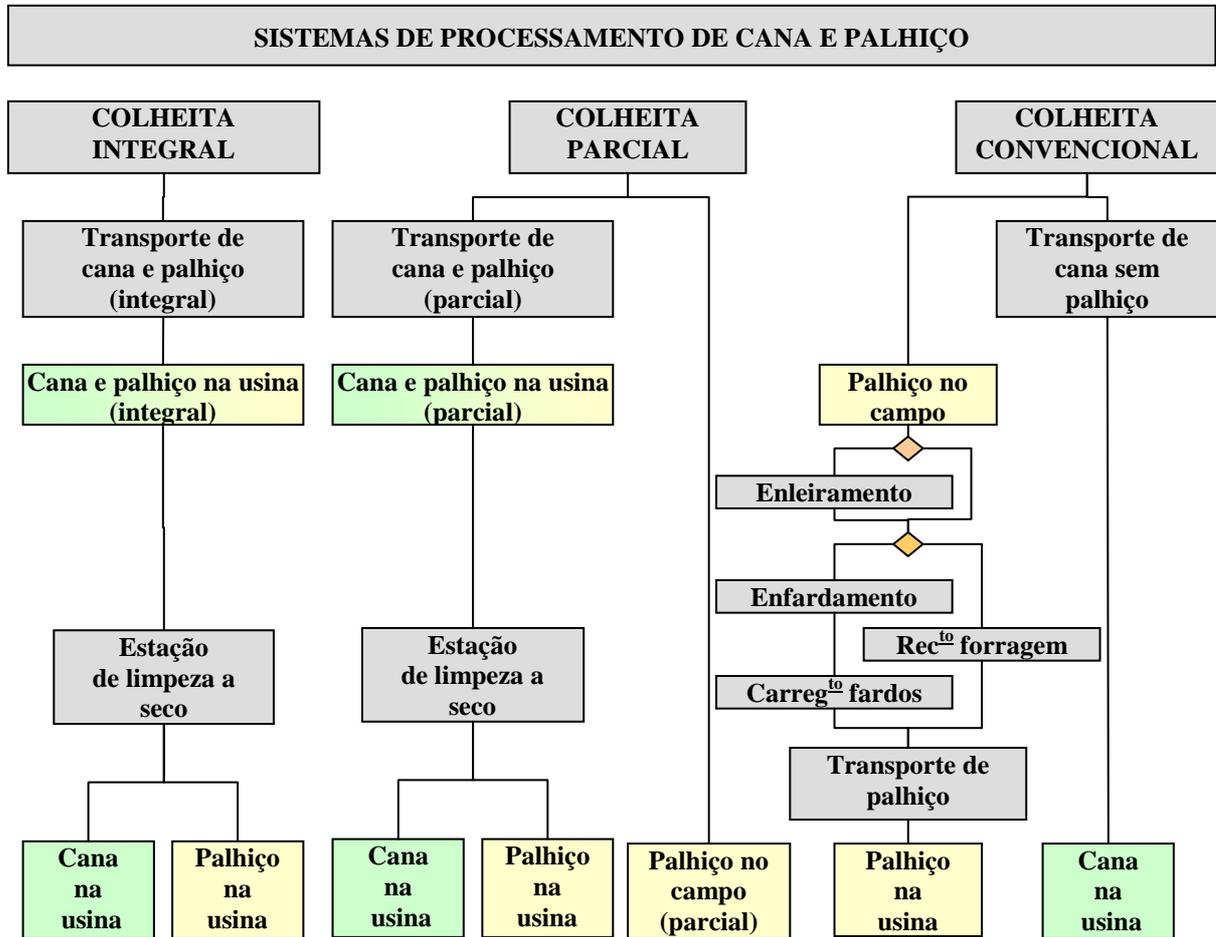


FIGURA 3.1 – Sistemas de processamento de cana e palhiço.

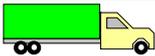
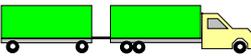
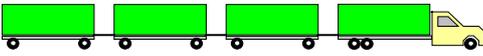
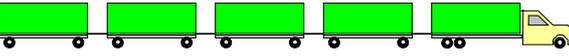
Visando reforçar a importância do planejamento das operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar para o setor sucroalcooleiro, Macedo (2005) apresenta as fronteiras tecnológicas que podem contribuir para aumentar a competitividade da produção de etanol, onde o palhiço também é previsto:

As reduções de custo do etanol do Brasil desde o início do programa ocorreram por avanços tecnológicos, gerenciais e por investimentos na infraestrutura. A implementação mais ampla de tecnologias já comerciais poderá promover reduções adicionais de custo no Centro-Sul; mas as maiores perspectivas vêm de novas tecnologias em desenvolvimento. Elas incluem a agricultura de precisão, novos sistemas de transporte de cana e palha e modificações genéticas da cana. (MACEDO, 2005, p.35).

Nota-se que o sistema de transporte de cana e palhiço constitui uma das áreas apontadas pelo autor como destaque para o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem redução de custo. O setor sucroalcooleiro utiliza várias opções de combinação veicular de carga (CVC), configuradas a partir das combinações de unidades tratoras (caminhões plataforma ou cavalos mecânicos) com carretas (reboques e/ou semirreboques).

O Quadro 3.1 apresenta algumas das principais configurações de transporte utilizadas pelo setor sucroalcooleiro para o transporte de cana-de-açúcar, com ou sem palhiço, ou fardos. A última composição representa uma opção para o transporte de fardos, que podem ser acomodados sobre o semirreboque utilizado para acomodar máquinas e implementos.

QUADRO 3.1 – Configurações de transporte utilizadas no setor sucroalcooleiro.

Descrição	Esquema	Nome Popular
Caminhão plataforma		“Truck”
Caminhão plataforma com um reboque acoplado		“Romeu e Julieta”
Caminhão plataforma com dois reboques acoplados		“Treminhão”
Caminhão plataforma com três reboques acoplados		“Tetraminhão”
Caminhão plataforma com quatro reboques acoplados		“Pentaminhão”
Cavalo mecânico com dois semireboques acoplados		“Rodotrem”
Cavalo mecânico com um semirreboque de transporte de equipamentos acoplado		“Caminhão prancha” ou “Carrega tudo”

Elaborado a partir de Silva, Alves e Costa, 2011.

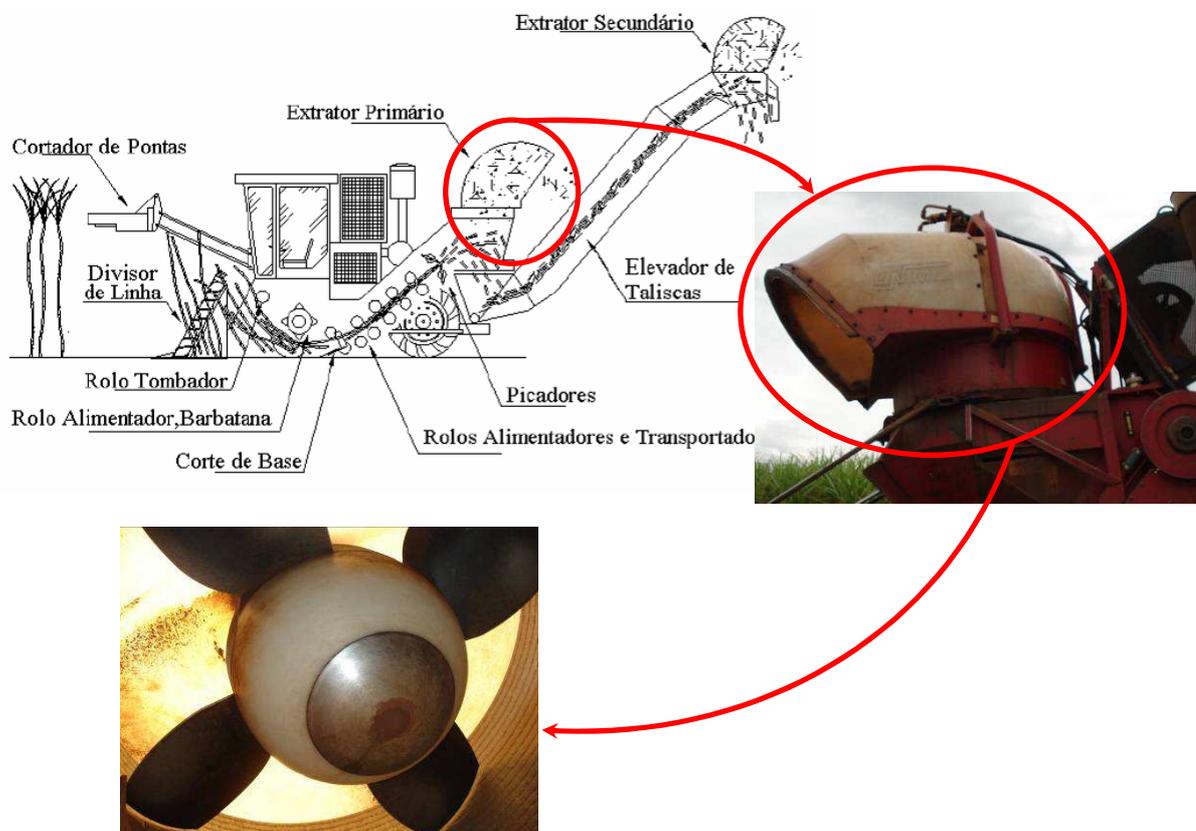
3.1 Colheita Integral

As colhedoras são máquinas compostas por uma série de dispositivos que realizam operações combinadas, como corte, picagem, limpeza e movimentação dos colmos de cana-de-açúcar. No tocante à limpeza, o projeto das colhedoras considera a remoção dos ponteiros e folhas por meio de três dispositivos: o cortador de pontas, que remove os ponteiros nas áreas com perfil de cana ereta; o extrator primário que remove por sucção as folhas verdes e secas dos rebolos de cana recém picados; e no extrator secundário, também

por sucção, imediatamente antes dos rebolos de cana serem direcionados ao transbordo ou outro veículo de transbordo interno, ao término do elevador de taliscas.

No sistema de colheita integral, os colmos e o palhiço da cana-de-açúcar são processados juntos a partir da colheita. O cortador de pontas, o extrator primário e o extrator secundário são mantidos desligados e dessa forma, o palhiço permanece junto com a cana até a separação na estação de limpeza a seco da usina.

A Figura 3.2 apresenta uma colhedora de cana-de-açúcar em corte, com identificação de seus dispositivos e destaque para o extrator primário, onde as pás que promovem a limpeza são apresentadas.



Fonte: Elaborado a partir de NEVES, 2003

FIGURA 3.2 - Localização do extrator primário em colhedoras.

Como consequência da colheita integral, a presença do palhiço com os rebolos compromete a carga por viagem para a usina, devido à uma redução de densidade, requerendo uma maior infraestrutura de transporte. Hassuani, Leal e Macedo (2005) apresentam resultados em que a carga média transportada é reduzida a menos da metade ao operar com o sistema de limpeza desligado.

Outro ponto limitante nesse sistema é o elevador de taliscas da colhedora, no qual, dependendo da condição do canavial e da velocidade da colhedora, este componente pode apresentar problemas como embuchamento devido ao acúmulo de impurezas vegetais.

Outra consequência decorrente do desligamento do sistema de limpeza, desta vez positiva é a redução do índice de perdas de cana. No sistema de colheita mecanizada convencional, ao promover a limpeza da cana, é comum que ocorra a sucção de rebolos de cana pelo extrator primário da colhedora. Os rebolos acabam se chocando contra o extrator e são lançados ao campo, gerando as perdas. Uma vez que o sistema de limpeza é desligado, as perdas de cana são reduzidas a um patamar mínimo, geradas por queda de rebolos da colhedora ou do transbordo ou por ocasião do corte dos colmos rentes ao solo. Adicionalmente, o desligamento do sistema de limpeza também proporciona redução do consumo de combustível da colhedora.

Em virtude da redução da carga transportada, a composição de transporte considerada mais vantajosa para a movimentação conjunta de palhiço e cana é o rodotrem, que permite trabalhar com o limite do volume transportado por viagem, reduzindo o custo de transporte (Figura 3.3).



FIGURA 3.3 – Rodotrem canavieiro.

Além de ser a composição de transporte que permite maior peso bruto total combinado (PBTC) das composições previstas no Anexo 1 da resolução 68 do Código de Trânsito Brasileiro (CTB), o rodotrem permite a realização da chamada operação “bate e volta”. Nessa operação, a unidade tratora (cavalo mecânico) pode ser desacoplada dos compartimentos de carga (semirreboques) e efetuar a troca destes por conjuntos reserva ao chegar à frente de colheita ou na usina. Este procedimento aumenta a utilização do cavalo mecânico.

Ao chegar à usina, os caminhões são direcionados aos pontos de descarga onde, após a transferência, o material (cana + palhiço) segue para a estação de limpeza a seco,

que promove a separação do palhiço. A estação de limpeza a seco é uma instalação anexa aos pontos de descarga, dotada de sistema de separação pneumática (Figura 3.4). Há diversos diferentes projetos para a estação, alguns dos quais utilizam adicionalmente discos e escovas rotativas e outros dispositivos para a separação do palhiço. Após a separação, a cana segue para moagem e o palhiço e as impurezas são retiradas para posterior processamento (picagem) e destinação.



Fonte: HASSUANI, LEAL e MACEDO (2005, p. 52)

FIGURA 3.4 – Vista de uma câmara de ventilação da estação de limpeza a seco.

3.2 Colheita com Limpeza Parcial

O sistema de colheita com limpeza parcial é bastante similar ao sistema de colheita integral, em termos dos equipamentos utilizados. No entanto, mediante a regulagem do sistema de limpeza das colhedoras, é possível alcançar níveis diferenciados de biomassa remanescente no campo, e conseqüentemente, enviados à usina juntamente com a cana. O material (cana + palhiço) que chega à usina é processado na estação de limpeza a seco da mesma maneira que o sistema de colheita integral.

O sistema de colheita com limpeza parcial visa deixar na lavoura uma parcela da biomassa suficiente para promover os benefícios agrônômicos relacionados à preservação da umidade e à possibilidade de ocorrência do “efeito herbicida”. Inclui-se nesse sistema a manutenção do cortador de pontas ligado, para deixar os ponteiros no campo e também a regulagem da rotação do extrator primário, que é responsável pela extração das folhas verdes e folhas secas. Quando o porte do canavial encontra-se ereto e com altura uniforme, é possível

operar com o cortador de pontas para remover os ponteiros do canavial. No entanto, algumas variedades de cana apresentam tombamento excessivo, devido ao grande porte e idade (cana planta de 18 meses). Nessas situações, o despontador e o extrator secundário são desligados e a separação do palhiço é feita apenas pelos extrator primário.

A Figura 3.5 indica o painel indicador da rotação do extrator primário de uma colhedora de cana, assim como o botão regulador correspondente. A faixa de rotação mais usual no sistema de limpeza convencional situa-se entre 900 e 1200 rpm, dependendo da colhedora e das condições físicas do canavial e umidade no momento da colheita.



FIGURA 3.5 – Tacômetro e potenciômetro para regulagem da rotação do extrator primário da colhedora.

Em termos de transporte, uma vez que parte das folhas permanece no campo, as cargas transportadas para a usina têm uma maior densidade e conseqüentemente massa, em comparação com as cargas do sistema de colheita integral.

A possibilidade de manter acionado o cortador de pontas e desligados os extratores primário e secundário é interessante por direcionar à usina apenas as folhas verdes e as folhas secas juntamente com os colmos de cana. Essa porção do palhiço é diferenciada dos colmos de cana em termos de massa, o que não ocorre se os ponteiros estão presentes. Ao serem picados, os ponteiros possuem similaridade física com os rebolos de cana, e, uma vez que a separação na estação de limpeza a seco ocorre por diferenciação física, a eficiência de separação é comprometida.

3.3 Colheita com Limpeza Convencional

Nesse sistema, as colhedoras de cana são reguladas de forma a remover as impurezas mineral e vegetal da carga de cana, deixando o palhiço no campo. A Figura 3.6 apresenta uma colhedora com o sistema de limpeza em operação. Percebe-se a presença de ponteiros sobre o solo, removidos pelo cortador de pontas, no entre eixos do transbordo e os extratores primário e secundário em funcionamento, removendo o palhiço do material que está sendo encaminhado à usina, depositando-o sobre o solo.



FIGURA 3.6 – Colhedora em operação com extrator primário e secundário acionados.

Sem a presença do palhiço, a carga transportada por viagem é significativamente maior. Nos estudos conduzidos por Hassuani, Leal e Macedo (2005), a carga mensurada para os três sistemas (colheita integral, colheita com limpeza parcial e colheita convencional) foi crescente, como indica a Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Comparação de cargas para três sistemas de colheita.

Variável	Colheita		
	Integral	Limpeza Parcial	Convencional
Carga por transbordo (t)	2,8	3,6	6,0
Perdas visíveis (%)	1,4	1,6	2,7
Palhiço sobre o solo (t.ha ⁻¹ b.s.)	1,4	7,0	16,0

Fonte: adaptado de Hassuani, Leal e Macedo, 2005, p.69

No prazo de 10 dias após a colheita, a biomassa já pode ser recolhida pois o percentual de umidade já foi reduzido, tornando o palhicho mais denso e um combustível de melhor qualidade. Há métodos variados para efetuar o recolhimento da biomassa disponível no campo, apresentados na sequência. Com o intuito de aumentar a produtividade das operações subsequentes, pode-se fazer o enleiramento do palhicho.

Esta operação adicional é realizada por um implemento (enleiradora de palhicho) montado na barra de tração de um trator (Figura 3.7). Por meio da ação do implemento, a biomassa é concentrada em uma única leira, facilitando o posterior recolhimento. Pode-se fazer o agrupamento de sucessivas leiras em uma leira única, para reduzir a movimentação no campo dos equipamentos que farão o processamento da biomassa.



FIGURA 3.7 – Enleiradora de palhicho em operação.

Há duas opções para a recuperação da biomassa sobre o solo, o enfardamento e a utilização de máquinas forrageiras. Os sistemas de recolhimento de palhicho que partem da colheita convencional têm a característica de fazer a coleta do material depositado sobre o solo, o que pode gerar acúmulo de impurezas minerais (terra) na biomassa destinada à usina.

Na colheita convencional, a desvinculação das operações de colheita de cana e de recolhimento de fardos gera uma situação que configura duas “colheitas” independentes: a colheita de cana e a posterior colheita da biomassa, que possuem vinculação quanto a matéria-prima, mas possuirão estruturas diferentes de equipamentos (máquinas e veículos) para a execução das operações.

3.3.1 Enfardamento

As enfardadoras são máquinas acopladas na barra de tração e acionadas pela tomada de potência (TDP) dos tratores. As operações realizadas por estes equipamentos são o recolhimento (*pick-up*) da biomassa, o adensamento, a amarração e a liberação do fardo sobre o solo. Alguns modelos de enfardadora possuem ventiladores para fazer a limpeza do material na câmara de compressão (retirada de terra) e outros possuem ainda discos acoplados junto ao mecanismo de recolhimento para fazer a picagem do material que será enfardado.

O enfardamento de palhiço de cana-de-açúcar vem sendo testado já há alguns anos como objeto de pesquisa e apenas recentemente algumas usinas estão operando com essa hipótese, com finalidade de recuperação da biomassa para geração de energia. No setor sucroalcooleiro, a vantagem proporcionada pelo enfardamento é o adensamento da biomassa, que favorece a operação de transporte, assim como a armazenagem.

As enfardadoras recolhem o palhiço depositado sobre o solo, enleirado ou não, e o acondiciona no formato de fardos adensados de dimensões variadas. Os mais comuns são fardos cilíndricos (Figura 3.8) e fardos prismáticos (Figura 3.9), de grande ou pequeno porte.



FIGURA 3.8 – Fardo cilíndrico.



FIGURA 3.9 – Fardo prismático.

Torrezan (2003) elaborou estudo com uma enfardadora New Holland BB940, de fardos prismáticos grandes, com enleiramento prévio simples, duplo e triplo. O enleiramento triplo apresentou melhor desempenho da enfardadora em termos de capacidades efetivas de produção e de campo, com médias de 20,29 t.h⁻¹ e 1,45 ha.h⁻¹, respectivamente. Outra conclusão do estudo foi a maior presença de terra nos enleiramentos com mais camadas, com os percentuais em massa de 6,41%, 6,31% e 5,71%, respectivamente para os enleiramentos triplo, duplo e simples.

Mais recentemente, Mello (2009) também estudou o enfardamento do palhicho da cana-de-açúcar com uma enfardadora Nogueira Express 5040, de fardos prismáticos pequenos: 0,5m x 0,4 m x 0,5m a 1,2m (largura x altura x comprimento) em três situações: sem enleiramento, enfardamento com enleiramento prévio simples e enfardamento com enleiramento prévio duplo. Em termos de capacidades efetivas, os melhores resultados foram obtidos para o enleiramento simples, com capacidade de produção efetiva de 8,1 t.h⁻¹ e capacidade de campo efetiva de 9,2 ha.h⁻¹

O sistema de colheita convencional com enfardamento da biomassa requer a operação adicional de recolhimento dos fardos e carregamento em um veículo de transporte para a usina. Variações podem ser implementadas nestas operações com objetivo de agilizar este processo. A Figura 3.10 apresenta um sistema em que uma carregadora com carreta acoplada, recolhe e transporta os fardos distribuídos na lavoura e os carrega em um caminhão que aguarda no carreador.



FIGURA 3.10 – Carregamento de caminhão para transporte de fardos à usina.

Outros sistemas podem ser igualmente configurados mediante a variação da capacidade da carreta de transporte e o estabelecimento de procedimentos de recolhimento dos fardos, por exemplo.

Este sistema se encerra com a recepção e descarga dos fardos na usina e o seu processamento (desenfardamento e trituração) e destinação para estoque ou queima.

3.3.2 Recolhimento com Forrageiras

As recolhedoras de forragem são máquinas que possuem um sistema de recolhimento e logo após, um conjunto de corte que tritura a biomassa e faz o seu encaminhamento para um transporte intermediário (transbordo) ou direto para a usina (caminhões telados, por exemplo). Há forrageiras menores que são montadas em tratores, assim como outros modelos, de maior potência, que são auto propelidos (Figura 3.11).



FIGURA 3.11 – Recolhedora de forragem.

O sistema com recolhedoras de forragem também foi estudado por Michelazzo e Braunbeck (2008), apresentando o segundo melhor resultado em termos de custo de recolhimento de palhço, atrás apenas do custo do sistema de colheita integral. Os autores indicam nas conclusões que nas usinas em que a estação de limpeza a seco não esteja disponível, esse sistema poderia ser utilizado para distâncias superiores a 30 km enquanto o sistema de enfardamento (fardos cilíndricos) poderia ser utilizado para distâncias menores.

A grande vantagem desse sistema é a granulometria do material resultante do recolhimento, que dispensa processamento adicional na usina e pode ser incorporado ao estoque de bagaço para posterior queima.

Como desvantagem desse sistema, o transporte é bastante penalizado devido à baixa densidade do material. Outra grande desvantagem é a necessidade freqüente de dispor de discos de corte para reposição. A freqüência de reposição é alta e o material é importado, o que encarece demasiadamente o custo de manutenção desse sistema.

4 PESQUISA OPERACIONAL E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

Dentre as definições de “Pesquisa Operacional” (PO) de diversos autores a proposta de Arenales et al. (2007, p.3) fornece uma definição bastante sucinta: “um enfoque científico sobre a tomada de decisões”, ou seja, uma área do conhecimento que envolve a aplicação de métodos científicos, sistematizados, para auxiliar a resolução de problemas. De fato, a pesquisa operacional surgiu em virtude da necessidade de solucionar questões derivadas do aumento da complexidade das organizações, para alocar recursos disponíveis de maneira mais eficiente para a organização como um todo (HILLIER e LIEBERMAN, 2006).

A consolidação da pesquisa operacional como um conjunto específico de conhecimentos ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, quando foi necessário desenvolver técnicas com embasamento científico, que pudessem apoiar decisões de alocar recursos finitos para a manutenção das linhas de combate. Com o término da guerra, estas técnicas passaram a ser utilizadas pelas organizações produtoras de bens e prestadoras de serviços, para a melhoria de suas operações, aumento de competitividade e disputa por mercados.

Após a guerra, a ampliação do acesso a computadores e a melhor interface *software*-usuário aumentaram a popularização das técnicas da pesquisa operacional ao mesmo tempo em que a maior capacidade de processamento tornou possível sua aplicação para a solução de problemas cada vez mais complexos.

Segundo Hillier e Lieberman (2006), a pesquisa operacional é aplicada a problemas envolvendo a condução e a coordenação das operações em uma organização. Para a abordagem desses problemas, é necessário o desenvolvimento de modelos matemáticos que, em um sentido abstrato, procuram imitar as características de um objeto real para fins de representação. Nessa formulação, são necessárias simplificações razoáveis do sistema ou do problema, de forma que o modelo “seja suficientemente detalhado para captar os elementos essenciais do problema, mas suficientemente tratável por métodos de resolução” (ARENALES et al., 2007, p.4).

O processo de modelagem pode ser expresso pela Figura 4.1, no qual, a partir do sistema real, as operações envolvidas são abstraídas em nível adequado de detalhe, obtendo-se um modelo matemático, capaz de expressar as principais características do sistema real. Num segundo momento, mediante a experimentação com o modelo, são realizadas análises que subsidiam as tomadas de decisão que serão implementadas no sistema real.

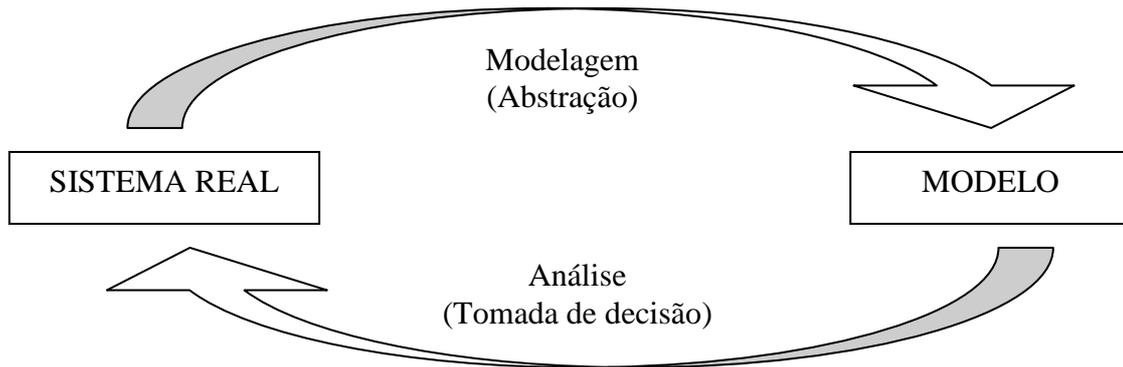


FIGURA 4.1 – Esquema do processo de modelagem.

As aplicações da pesquisa operacional estendem-se a diversas áreas de produção de bens como agricultura, indústria automobilística, mineração e também a prestação de serviço, como transportes, serviços bancários e hospitalares. Problemas típicos envolvem o sequenciamento da produção, alocação de tarefas, definição de *mix* de produção, problemas de corte e empacotamento, localização de facilidades e roteirização de veículos, por exemplo.

As técnicas utilizadas na pesquisa operacional são várias, como programação linear, programação discreta, otimização em redes, programação dinâmica, teoria das filas, teoria de jogos e simulação, dentre outras. Tais técnicas variam conforme o método de abordagem utilizado na modelagem e a natureza das variáveis envolvidas.

4.1 Simulação

Diversos autores apresentam definições para a simulação, entre os quais Law e Kelton (1991), Banks (1998) e Pegden, Shannon e Sadowski (1995). Como técnica da pesquisa operacional, todas as definições pressupõem o desenvolvimento de um modelo de um sistema real sobre o qual são feitas análises de interesse para prever o comportamento do sistema em avaliação. Kelton, Sadowski e Sadowski (1998) fornecem uma definição prática que resume a utilidade da simulação:

Simulação é o processo de projetar e criar um modelo em computador de um sistema real ou proposto com o propósito de conduzir experimentos numéricos para uma melhor compreensão do comportamento de um dado sistema, dada uma série de condições (1998, p.7, tradução nossa).

Hillier e Lieberman (2006) apontam que a simulação é uma das técnicas chave da pesquisa operacional, cuja popularidade é crescente por ser uma ferramenta flexível, poderosa e intuitiva. Uma vez que o modelo de simulação é obtido, pode-se promover experimentos para avaliar o comportamento do sistema em situações operacionais de interesse, antecipadamente à sua implementação, o que constitui uma grande vantagem.

Na fase de modelagem, pode-se projetar o modelo de simulação para que este seja flexível, de modo que se possa configurar e simular rapidamente novos sistemas mediante a alteração de variáveis. Situações típicas para análise por simulação na área de manufatura são: a identificação de gargalos de produção, o balanceamento de linha, a quantificação de equipamentos e a análise de cadeias de suprimentos.

Banks (1998) ressalta que a simulação pode assumir outras funcionalidades: um recurso para auxiliar a compreensão de um problema, uma alternativa didática para descrever a operação de um sistema, uma ferramenta para determinar pontos críticos e suas medidas de desempenho e uma ferramenta para avaliar soluções propostas e sintetizar novas soluções, dentre outras.

Como desvantagens da simulação, Freitas Filho (2001) aponta três razões principais: o tempo requerido para a elaboração dos modelos; a dificuldade de interpretação dos resultados da simulação e a necessidade de se conhecer a linguagem de um *software* para a modelagem do sistema.

Em relação ao tempo consumido na modelagem, diversos autores propõem etapas a serem realizadas para a condução de projetos de simulação, dentre os quais Banks (1998), Law e Kelton (1991), Freitas Filho (2001) e Pegden, Sadowki e Sadowski (1995). Estes autores chamam a atenção especialmente para a etapa de coleta de dados, a qual deve ser feita com critério para conferir maior aderência de resultados em comparação ao sistema real. Dependendo do caso, a coleta de dados implica em dispor de recursos humanos e de tempo para a coleta de tempos operacionais *in situ*. Estes dados se tornam mais importantes quando apresentam variabilidade (caráter estocástico) o que os requer em quantidade suficiente para sua correta representação no modelo.

Além dos dados, a maior complexidade dos sistemas também exige maior esforço de modelagem, o que igualmente consome tempo. Assim, os projetos com simulação tornam-se mais interessantes à medida que as decisões que dependem da simulação impliquem em maiores desembolsos e quando a desvantagem do maior tempo para se chegar ao resultado seja compensada pela obtenção de um resultado mais preciso e idealmente mais econômico.

A dificuldade de interpretar os resultados da simulação ocorre em sistemas mais complexos no qual, devido ao grande conjunto de processos que ocorrem simultaneamente, torna-se mais difícil compreender se os resultados obtidos derivaram da modificação de alguma variável ou da interação entre os elementos da simulação (máquinas, peças, tempos operacionais e regras de sequenciamento de tarefas, por exemplo).

Há procedimentos adequados que podem reduzir a ocorrência desse tipo de problema, como a simulação com maior quantidade de replicações ou por um período maior para o sistema atenuar o impacto de uma interação que produziu um resultado impróprio. No entanto, ambas alternativas irão acarretar o aumento do tempo de execução de cada experimentação.

Em relação à dificuldade de se conhecer uma linguagem de simulação para modelagem do sistema, os fornecedores de *software* têm buscado melhorar a interação *software*-usuário e também promover a integração de dados de entrada e saída por meio de ferramentas computacionais mais difundidas, como as planilhas eletrônicas.

4.2 Simulação de Eventos Discretos

A forma de representar as operações dos sistemas produtivos pode variar substancialmente em função do tipo de evento que está sendo representado. Um evento corresponde a um acontecimento, previsto ou não que, quando ocorre, promove a mudança das variáveis de estado do sistema (FREITAS FILHO, 2001).

A simulação de eventos discretos (*discrete event simulation* - *DES*) visa representar sistemas cujos eventos ocorrem pontualmente em determinados instantes do tempo, como uma loja, onde no instante de entrada ou saída de clientes, as variáveis do sistema (fila de atendimento, por exemplo) sofrem alteração. Esta característica difere dos sistemas contínuos, onde a mudança das variáveis de estado ocorre a todo instante, como em uma estação de tratamento de água, com o volume sendo modificado constantemente.

Um banco é um exemplo de um sistema discreto uma vez que as variáveis de estado - por exemplo, a quantidade de clientes no banco - modifica-se apenas quando um cliente chega ou quando um cliente termina de ser atendido e daí. Um sistema contínuo é caracterizado quando as variáveis de estado modificam-se continuamente em relação ao tempo. Um avião em vôo é um exemplo de um sistema contínuo, uma vez que as variáveis de estado como posição e velocidade podem ser modificadas continuamente em respeito ao tempo. (LAW e KELTON, 1991, p.4, tradução nossa)

Tomando como exemplo um sistema formado por uma borracharia dotada de apenas um funcionário, a cada chegada ou saída de veículo, ou a cada início ou término de serviço, há a ocorrência de um evento. A Figura 4.2 apresenta uma programação referente a uma hora do sistema, com processamento de três veículos, com os respectivos tempos de chegada no sistema e tempos de duração do serviço.

Veículo #	Instante da chegada (min)	Duração do serviço (min)	Programação por veículo (min)												
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
1	5	10		■	■										
2	10	20			■	■	■	■							
3	25	15							■	■	■				

FIGURA 4.2 – Programação de veículos em uma borracharia.

No entanto, uma vez que o sistema possui apenas um funcionário, considerando a regra de atendimento ser na sequência de chegada e que não há desistência de execução do serviço, o sistema passa a apresentar filas. A programação resultante do sistema é dada pelo Figura 4.3, com as filas registradas em blocos hachurados.

Veículo #	Tempo em fila (min)	Tempo no sistema (min)	Programação do sistema (min.)												
			0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	
1	0	10		■	■										
2	5	25			■	■	■	■	■						
3	10	25						■	■	■	■	■			
Ocupação do funcionário				Veic 1		Veic 2				Veic 3					

FIGURA 4.3 – Programação resultante do sistema da borracharia.

Nota-se a ocorrência de eventos pontualmente apenas nos instantes:

- t=5 min – Chegada do veículo 1 e início de seu processamento.
- t=10 min – Chegada do veículo 2 e entrada deste veículo em fila.
- t=15 min – Término do processamento do veículo 1 e entrada em processamento do veículo 2.
- t=25 min – Chegada do veículo 3 e entrada deste veículo em fila.
- t=35 min – Término do processamento do veículo 2 e entrada em processamento do veículo 3.
- t=50 min – Término do processamento do veículo 3.

Nota-se que o sistema permaneceu inalterado entre os instantes $t=15$ min e $t=25$ min e entre $t=35$ min e $t=50$ min. Dada a interação entre os veículos e o único funcionário da borracharia, o tempo de permanência dos veículos no sistema não se limitou apenas ao tempo de serviço, mas também ao tempo de fila.

O sistema foi simulado por uma hora, sendo possível obter o percentual de ocupação do funcionário (ocupação de 50 minutos em um total de 60 minutos registrados, ou seja, 83,3%) e outras estatísticas de interesse como tempo médio de fila (5 minutos), tempo médio de permanência no sistema (21,7 minutos), etc. Os *softwares* de simulação de eventos discretos armazenam todas estas informações, fornecendo dados de desempenho ao término da simulação.

4.3 Diferenciais da Simulação Frente a Outras Abordagens.

Diferentemente de outras técnicas da pesquisa operacional como a programação linear, programação inteira e outras, a simulação, a princípio, não busca encontrar solução ótima para os sistemas representados. No entanto, pode-se combinar abordagens em que o uso da simulação pode interagir com modelos de otimização, trocando dados e conseguindo utilizar o potencial das duas técnicas.

Exemplos dessa integração são o trabalho de Busato, Berruto e Piccarolo (2008), integrando simulação e programação linear para o recolhimento de biomassa de milho e o estudo de Toso et al. (2009) sobre o planejamento de turnos de trabalho e quantificação de funcionários para uma empresa fabricante de tubos de concreto. Nesse último estudo analisou-se a necessidade de trabalhar com horas extras ou de abrir um turno adicional de trabalho, utilizando inicialmente um *software* de simulação, com posterior transferência de dados para um modelo de programação linear elaborado com a ferramenta *Solver* do Ms Excel.

Também como um fator diferencial, a simulação pode ser considerada particularmente útil quando se quer abordar sistemas complexos onde outras técnicas de programação não conseguem fornecer um tratamento adequado. Conforme Law e Kelton (1991) atestam:

Se as relações que compõem um modelo são simples o suficiente, pode ser possível utilizar métodos matemáticos (como álgebra, cálculo ou teoria de probabilidades) para obter informações exatas sobre questões de interesse; o que é conhecido como solução analítica. Porém, a maioria dos sistemas do mundo real é muito complexa para ser avaliada analiticamente e estes modelos devem ser estudados por meio de simulação. (1991, p. 1, tradução nossa).

Cimino, Longo e Mirabelli (2010) reforçam esse argumento ao dizer que modelagem e simulação devem ser usadas quando as abordagens analíticas não identificam soluções adequadas para sistemas complexos, como em cadeias de suprimentos e instalações industriais. Assim, para sistemas dessa natureza, os modelos de simulação devem ser:

- i) flexíveis e paramétricos, para permitir a avaliação de cenários;
- ii) eficientes em tempo de execução, mesmo na representação de sistemas muito complexos;
- iii) repetitivos em sua arquitetura, com o propósito de trabalhar com escala.

Law e Kelton (1991) também recomendam que o método de abordagem para a solução de problemas deve ser compatível ao sistema, sendo que uma solução analítica sempre é preferível, a menos que a complexidade do sistema seja impeditiva.

Se uma solução analítica para um modelo matemático é disponível e é computacionalmente eficiente, é usualmente desejável estudar o modelo dessa forma ao invés de se utilizar simulação. Porém, muitos estudos são altamente complexos, tornando-se impossível qualquer solução analítica. Nesse caso, o modelo deve ser estudado por meio de simulação, ou seja, numericamente, executando-se o modelo com as entradas em questão para verificar como estas afetam as medidas de desempenho de saída. (1991, p.6, tradução nossa)

Um diferencial da simulação é a possibilidade de respeitar a variabilidade das operações tal qual elas ocorrem no mundo real. Assim, os dados utilizados nos modelos, como a duração das operações, por exemplo, podem utilizar variáveis estocásticas ao serem representadas, dadas por distribuições teóricas de probabilidade. Outras técnicas da pesquisa operacional como a programação estocástica, também podem trabalhar com variáveis dessa natureza. No entanto, na maioria das análises de sistemas utilizam-se variáveis determinísticas, que permanecem inalteradas, e perdem a aderência com o sistema real.

Para a geração das distribuições teóricas de probabilidade, os dados dos processos são coletados em campo, ou a partir de registros contidos em sistemas de informação, e um histograma é elaborado. Na sequência, diversas distribuições teóricas de probabilidade (Normal, Exponencial, Erlang, Triangular, Uniforme, etc.) são testadas quanto a aderência ao histograma, por meio de testes estatísticos.

No caso do *software Input Analyzer*, aplicativo para análise de dados de entrada do *software Arena*, os testes utilizados são o *Chi-quadrado* (Chi^2) e *Kolmogorov-Smirnov (KS)*. Como exemplo, a Figura 4.4 apresenta um histograma elaborado a partir de dados coletados em campo, mensurados junto ao processo real, ao qual foi ajustada uma

distribuição Normal, com parâmetros de média de 11,6 minutos e desvio padrão de 1,91 minuto.

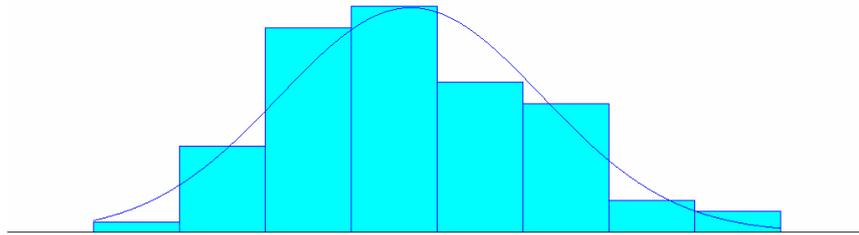


FIGURA 4.4 – Ajuste de distribuição teórica de probabilidade a histograma de dados.

Outra característica particular da simulação, que a diferencia de outros métodos, é a abordagem mais adequada da interação entre recursos (equipamentos e mão de obra) e regras, como ocorre nos sistemas reais. Um exemplo poderia ser o estudo da programação da manutenção preventiva diária de equipamentos em uma indústria de autopeças.

As quatro programações de manutenção apresentadas na Figura 4.5 apresentam o mesmo percentual de 25% do tempo útil (8:00 às 12:00 e 13:00 às 17:00), com uma hora de almoço (blocos hachurados), porém diferem quanto ao horário de realização.

Programação #	Horas									
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1										
2										
3										
4										

FIGURA 4.5 – Programação de manutenção preventiva.

A modificação do período designado para manutenção já é suficiente para influenciar variáveis como quantidade de peças produzidas, quantidade de peças em estoque e percentuais de utilização da mão de obra, por exemplo. Isto ocorre em função da interação das programações de manutenção com outros elementos do sistema, tais como a variabilidade da duração de outras operações, a frequência de chegada de peças, a ocorrência de quebras e suas necessidades de reparo, etc.

Tomando como base esse mesmo exemplo, outras opções poderiam ser simuladas, como a realização da manutenção preventiva no horário do almoço e após as 17hs, ou ainda fazer um escalonamento de horários entre as diferentes máquinas.

4.4 O Método de Monte Carlo e os *Softwares* de Simulação de Eventos Discretos

O princípio utilizado para efetuar a simulação dos sistemas é um método numérico conhecido por método de Monte Carlo, em alusão ao cassino do principado de Mônaco e mais especificadamente à aleatoriedade das roletas de jogos de azar.

O método de Monte Carlo pressupõe o uso de duas funções: uma função de geração de números aleatórios (GNA) e uma função geradora de variáveis aleatórias (FGVA). (FREITAS FILHO, 2001). Cada distribuição teórica de probabilidade (Normal, Exponencial, Uniforme, Triangular, etc.), utilizada para representar variáveis estocásticas, e seus respectivos parâmetros (média, desvio padrão, moda, limites inferior e superior, etc.) possui sua própria FGVA.

Ao ser necessário simular um evento estocástico, o método de Monte Carlo gera um número aleatório uniformemente distribuído entre $[0,1]$ e o utiliza para selecionar um valor na FGVA correspondente à distribuição teórica de probabilidade da atividade representada. Cada ocasião que o modelo executar nova simulação do mesmo evento, um número aleatório diferente entre $[0,1]$ é selecionado, indicando um valor diferente na FGVA.

Tomando como exemplo a distribuição teórica de probabilidade da Figura 4.4, o melhor ajuste encontrado para o histograma foi uma distribuição Normal, com parâmetros de média 11,6 minutos e desvio padrão de 1,91 minutos. Ao simular este evento, o número gerado aleatoriamente entre $[0,1]$ buscará um valor na função geradora de variáveis aleatórias (FGVA). Respeitando o perfil da distribuição Normal, serão obtidos valores com maior probabilidade no entorno da média de 11,6 minutos. Valores distantes da média também serão selecionados em outros instantes da simulação, embora com menor frequência. Ao término da simulação, caso sejam coletados todos os tempos sorteados para representar esse evento estocástico e seja elaborado um novo histograma com os dados, espera-se obter a mesma distribuição teórica de probabilidade que foi aderida aos dados originais coletados em campo.

Os *softwares* de simulação de eventos discretos disponíveis comercialmente utilizam o mesmo método de Monte Carlo para efetuar a simulação dos sistemas, mas apresentam variação quanto a fatores como a forma de modelagem do sistema, tratamento de dados e interface com o usuário. Alguns trabalhos científicos comparam características de diferentes *softwares* de simulação discreta.

Cimino, Longo e Mirabelli (2010) elaboraram um trabalho onde um dos objetivos era avaliar o estado da arte de *softwares* de simulação comerciais. Para tanto,

fizeram uma pesquisa tipo *survey* com 100 analistas de simulação sobre características pré-estabelecidas para as quais foram atribuídas notas de 0 a 10. Os *softwares* avaliados foram: *Anylogic*, *Arena*, *AutoMod*, *Emplant*, *Promodel*, *Flexsim* e *Witness* e 12 características foram avaliadas: adequação para problemas de logística, adequação para problemas de manufatura, uso de terceira dimensão, mecanismo de simulação, habilidade requerida do usuário, comunidade de usuários, linguagem de simulação, *runtime* (possibilidade de executar simulações de terceiros, com permissão de alterar variáveis), ferramentas de análise, programação interna, construção modular e preço. Focando apenas as características com melhores resultados, tem-se um resumo da pesquisa:

- Nota 9,0: a comunidade de usuários do *software Arena*, e a habilidade requerida do usuário do *software ProModel*;
- Nota 8,5: a comunidade de usuários do *software Witness*;
- Nota 8,0: o motor de simulação, a habilidade requerida do usuário e as ferramentas de análise do *software Arena*, O motor de simulação do *Emplant* e o motor de simulação e a habilidade requerida do usuário do *software Witness*.

Sakurada e Miyake (2003) elaboraram um estudo comparativo com os *softwares Arena* e *ProModel*, aplicados em uma loja de serviços, onde foram avaliados o foco original de aplicação dos *softwares*; as ferramentas de tradução do modelo conceitual em modelo matemático; as ferramentas de suporte à modelagem, como tratamento de dados de entrada e dos resultados da simulação e os recursos de animação. Como conclusão, os autores afirmam que os dois *softwares* possuem o mesmo potencial em termos de uso dos comandos e denominações para a modelagem. Em alguns aspectos um ou outro *software* apresenta vantagem, como o uso de fluxogramas no *Arena* e a modelagem gráfica no *ProModel*.

Silva (2006), desenvolveu um método para avaliação e seleção de *softwares* de simulação de eventos discretos voltados à resolução de problemas em sistemas logísticos. Foram definidos 111 critérios de avaliação dos quais 19 versavam especificamente sobre logística. O método era dividido em duas etapas. Inicialmente eram desclassificados os *softwares* que não suportavam os critérios considerados essenciais para aplicações logísticas, o que era feito por meio de uma pontuação. Posteriormente os *softwares* selecionados eram comparados quanto à qualidade de desempenho em aplicações práticas e experimentos utilizando o método de análise hierárquica (AHP). No estudo de caso ao qual o método foi

aplicado, o software de simulação *Arena* foi selecionado com uma pequena vantagem sobre o software *ProModel*.

Os modelos elaborados a partir dos *softwares* de simulação de eventos discretos possuem similarmente a mesma estrutura de funcionamento, onde as entidades, que constituem a parte circulante dos sistemas, como clientes, peças, matérias primas, etc. são inseridas no modelo, e o percorrem até serem removidas. A frequência de criação de entidades é configurada pelo analista e durante o tempo de permanência no sistema, as entidades são processadas por recursos, como máquinas e funcionários. Os recursos representam as operações que ocorrem no mundo real como furação de peças, atendimento a cliente, inspeção de lotes, etc., além de movimentação, divisão e agrupamento de entidades, dentre outros processos.

Ao iniciar a simulação, o modelo é executado continuamente, conforme as configurações realizadas, até que uma condição de parada seja alcançada, que pode ser um tempo previamente estipulado (um dia, um mês, uma safra, por exemplo) ou por uma condição ocorrida no sistema em estudo. Exemplos de condições de parada são o alcance de uma meta de produção ou o atendimento a uma quantidade determinada de clientes.

Uma das vantagens da simulação é a possibilidade de acompanhamento da dinâmica do sistema ao longo do tempo. Para isso, os *softwares* dispõem de uma interface gráfica auxiliar para a animação do modelo, alguns em terceira dimensão, que visam facilitar a compreensão do sistema sob análise. Dessa maneira, entidades, recursos, filas, contadores, tempo, etc. podem ser inseridos como recurso de animação. Pode-se também pausar o modelo em qualquer instante e observar o comportamento do sistema.

Alguns *softwares* como o *ProModel* compartilham a programação lógica e a animação do modelo, ou seja, à medida que a parte gráfica é elaborada, a lógica do modelo também é configurada. Estas particularidades variam de *software* para *software* conforme explicado anteriormente.

O software *Arena* possui distinção entre a lógica de programação e a sua animação, constituindo duas etapas diferentes na modelagem. A programação é bastante visual, baseada em fluxogramas elaborados a partir de blocos com funções pré-definidas, unidos por conectores. A Figura 4.6 apresenta um modelo de simulação de um sistema de furação de peças. Podem ser identificadas a lógica de programação (fluxograma) e a animação do sistema.

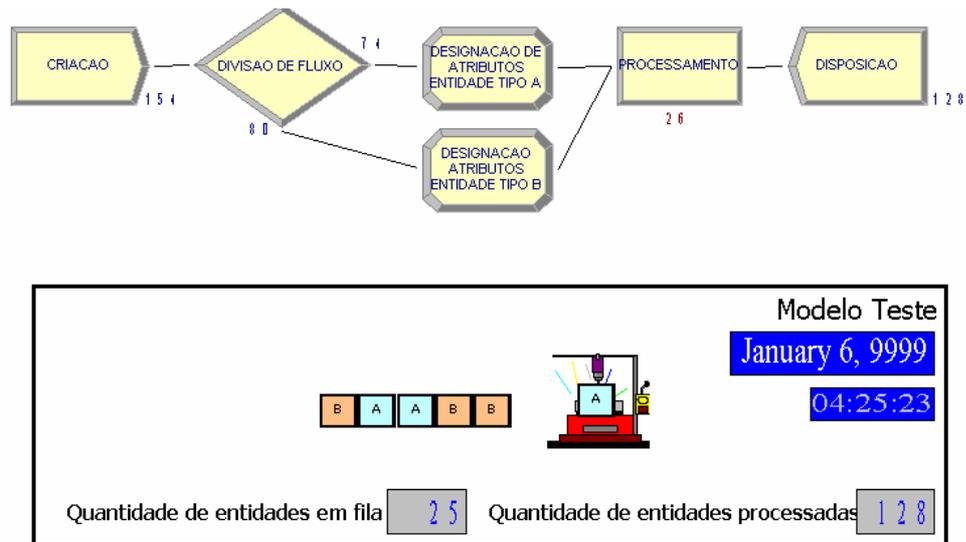


FIGURA 4.6 – Ambiente de programação no *software Arena*.

Na programação desse exemplo foram alocados seis blocos, com cinco funções diferentes, conforme detalhamento apresentado no Quadro 4.1. Considera-se que dois tipos de peças, A e B, são recebidas no sistema na mesma proporção, com tempos de furação diferenciados.

QUADRO 4.1 – Funções dos blocos de programação do *software Arena*.

Bloco	Imagem	Função
Create		Criação de entidades para o sistema, em um intervalo entre chegadas de peças designado. No exemplo, peças chegam com intervalo dado por uma distribuição exponencial com média de 1 hora.
Decide		Divide o fluxo de entidades com base em probabilidades ou em uma condição designada. Neste caso, considerou-se 50% de peças A e 50% de peças B.
Assign		Designação de atributos à entidade, tais como tempo de operação, cor, peso, etc. No exemplo, o tempo de furação é diferenciado nestes blocos.
Process		Processamento (duração de uma atividade). No exemplo, a atividade de furação é realizada com os tempos dados nos módulos Assign.
Dispose		Remoção de entidades do sistema

Em termos de animação, a Figura 4.6 apresenta dois contadores, animação do recurso furação e dos dois tipos de peça, diferenciando-as por cores, além da representação da fila, calendário e hora corrente. A animação é um recurso particularmente útil para a melhor compreensão dos sistemas e também para permitir ao analista de simulação verificar se o modelo está correto.

4.5 Estudos de Simulação Discreta Aplicados ao Setor Sucroalcooleiro

Nos principais países produtores de cana-de-açúcar (Brasil, Austrália, África do Sul e Cuba) há pesquisas que reportam o uso da simulação para representar diversos processos do sistema de produção sucroalcooleiro, todas visando o suporte a tomadas de decisão gerenciais, como é o caso do modelo desenvolvido neste trabalho. De modo geral, muitos destes estudos envolvem as operações de transporte, para o suprimento de cana-de-açúcar para as usinas e alguns mais recentes representam operações com biomassa de outras culturas.

Hansen, Barnes e Lyne (2002), na África do Sul, estudaram o impacto de mudanças no sistema de colheita e transporte de cana-de-açúcar de uma usina com o objetivo de reduzir o tempo entre o corte e a moagem no processamento de cana inteira. O tempo decorrido entre as duas operações deve ser idealmente curto, uma vez que há perda da qualidade da matéria prima. No modelo, foram explorados os efeitos de fatores como quebras de equipamentos e da usina, a quantidade de veículos no sistema e condições climáticas. Estratégias de gestão, como o uso de diferentes ciclos de carregamento e transporte (jornadas), com tipos diferentes de equipamentos também foram incluídas no modelo. A possibilidade de dispor de uma visão holística do sistema foi destacada pelos autores como uma característica importante, uma vez que os interesses dos fornecedores de cana e da usina podiam ser direcionados conjuntamente. Do ponto de vista de gestão, essa funcionalidade permite identificar pontos de restrição do sistema, bem como avaliar procedimentos para que melhorias sejam implementadas.

Díaz e Pérez (2000), em Cuba, também aplicaram simulação para definir gráficos com superfícies de resposta que indicavam a variação da quantidade de cana-de-açúcar e do tempo de ciclo dos veículos em função da quantidade de caminhões e carretas utilizados no sistema. Tal informação foi utilizada pelo governo para a alocação de recursos, prever a formação de gargalos produtivos e os meios para solucioná-los. Os autores também

ressaltam a importância da animação do sistema como ferramenta facilitadora da comunicação com os gerentes e os trabalhadores das fábricas.

Utilizando dois modelos de simulação integrados, Le Gal et al. (2009) desenvolveram uma ferramenta gerencial para uma usina na África do Sul. Um dos modelos era usado para gerar o planejamento semanal de suprimento de cana à usina, a partir das origens de matéria-prima e do período de safra, ambos configuráveis. O segundo modelo era utilizado para simular a logística diária de entrega, a partir dos resultados da simulação do primeiro modelo, em onze configurações diferentes de equipamentos de colheita e transporte. Neste estudo foram exploradas as quantidades de colhedoras e veículos, assim como a duração do período de moagem em semanas, para avaliar o risco de a infraestrutura conseguir abastecer a usina, frente um aumento do percentual de colheita mecanizada dos atuais 16% para 75%.

Higgins e Davies (2005) utilizaram um modelo de simulação para auxiliar o planejamento da capacidade de transporte de cana-de-açúcar por ferrovias, modal que movimenta cerca de 80% da cana australiana. Com o modelo, os pesquisadores puderam estudar o impacto da mudança das horas trabalhadas por dia (jornada de trabalho) da operação de colheita, estimar a quantidade necessária de locomotivas e vagões (*bins*) e as trocas de conjuntos de vagões por dia, além de quantificar as esperas das colhedoras por vagões vazios. Como resultado, um dos cenários avaliados, com ampliação da jornada de trabalho de apenas horas diurnas para 18 horas por dia (das 3:00 hs. as 21:00 hs.), foi implementado por um grupo de produtores. A ampliação das horas de trabalho das colhedoras proporcionou um serviço de transporte mais eficiente utilizando a frota existente de locomotivas e vagões.

No Brasil, Iannoni e Morabito (2002) estudaram o sistema de descarga de cana para uma usina da região de Ribeirão Preto/SP, com quatro tipos diferentes de composição de transporte e regras de desengate para acelerar a descarga dos caminhões em três linhas de moendas. Três cenários foram comparados ao cenário inicial:

- Cenário 1: Desengate obrigatório de reboques de treminhões, previamente à descarga no estoque do pátio, em regime de bate e volta;
- Cenário 2: Aumento de 50% da frota com composições tipo rodotrem com redução da quantidade de treminhões;
- Cenário 3: Aumento de 50% da frota com composições tipo rodotrem com redução da quantidade de caminhões Romeu e Julieta (caminhão plataforma com um reboque acoplado).

Utilizando como critério a quantidade média de cana em espera no pátio e a quantidade de cana descarregada por dia nas moendas, o cenário 1 apresentou o melhor resultado dentre as opções avaliadas.

Com foco também em transporte, Rangel et al. (2008) elaboraram um estudo para avaliar o custo do frete em função da distância dos fundos agrícolas (diferentes origens) agrupados em 16 zonas até uma usina situada em Campos dos Goytacazes/RJ. Foram configurados seis cenários com aproximação dos fundos agrícolas à usina, nos quais, no cenário extremo, com a cana mais próxima (5 km) foi obtida uma economia de 21% para a usina e uma redução do frete em 69%. Como referência, o impacto do custo de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar, que representava 42,5% nos custos totais no cenário original, foi reduzido para 26,0% no cenário com a cana concentrada a 5 km da usina.

O estabelecimento de turnos de trabalho diferenciados para as frentes de corte, carregamento e transporte de uma usina da região de Ribeirão Preto foi avaliado por Silva, Alves e Costa (2011), por meio de simulação discreta. Neste trabalho, a divisão da mão de obra em equipes, com escalonamento do horário de trabalho, indicou a possibilidade de entrega regular de cana ao longo de todo o dia, com manutenção de menor estoque e com a mesma estrutura de equipamentos. Em um cenário inicial, a usina em estudo possuía sistema com dois turnos e as trocas concentradas em dois horários: às 7:00 e às 19:00. Os cenários propostos para avaliação consideraram a abertura de uma segunda turma, com horários de troca defasados em duas, quatro e seis horas do horário da configuração original. Dentre os cenários simulados, o escalonamento de horários em duas turmas com quatro horas de defasagem apresentou o melhor resultado ponderando a meta de moagem, o risco de falta de matéria prima e o estoque médio de cana no pátio.

Apesar de não envolver cana-de-açúcar, Sokhansanj, Turhollow e Wilkerson (2006) criaram um modelo integrado para a análise do fornecimento de biomassa e movimentação de materiais, com interface para entrada e saída de dados por meio de planilhas eletrônicas. O modelo foi desenvolvido em módulos e englobava operações agrícolas de enfardamento, enleiramento, carregamento, transporte e armazenagem, dentre outros, para forragem e para cereais, particularmente para milho, utilizado como exemplo na publicação. Nas conclusões, os autores destacam que o *software* de simulação utilizado (*Extend*) forneceu uma plataforma conveniente para simular o fornecimento de biomassa, contemplando a disponibilidade de matéria prima e o impacto das condições climáticas na colheita. Adicionalmente, o programa estimou a quantidade e o porte dos equipamentos necessários

para atender à demanda especificada e os conseqüentes custos de entrega baseados na utilização dos equipamentos e na necessidade de armazenamento.

Também com foco em biomassa, De Mol et al (1997) propuseram uma abordagem de rede para tratar genericamente a logística de coleta de materiais para uso energético. No estudo, os nós da rede correspondem aos locais, ou seja, os pontos de origem, locais de coleta, estações de transbordo de material, pontos de pré-processamento ou as plantas de geração de energia e os arcos correspondem às operações de transporte. Dois modelos; um de simulação e outro de otimização, foram desenvolvidos para tratar o custo logístico e o consumo energético. O modelo de simulação fornece: os resultados de entrada e saída de biomassa e seu valor calorífico; os custos de transporte, pré-tratamento e manuseio; o consumo de energia para transporte, pré-tratamento e manuseio; a quantidade de viagens para a planta de energia. O modelo de otimização permite combinar diferentes tipos de biomassa e fornece os resultados ótimos em termos de estrutura e participação de cada um dos tipos de biomassa designados. Os modelos foram aplicados para designar o local de instalação de uma planta de geração de energia na Holanda, a partir de biomassa em quatro locais possíveis e com a possibilidade de utilização de transporte rodoviário, aquaviário e ferroviário. No estudo, cinco opções de biomassa foram contempladas: restos de colheita, madeira descartada, poda, resíduos sanitários e papel descartado. Conforme o produto, era necessário realizar operações de pré-processamento. Algumas conclusões do estudo foram:

- A localização central da planta de energia indica os menores custos;
- O transporte rodoviário é mais indicado para deslocamentos curtos, e o transporte aquaviário é indicado para deslocamentos longos;
- A operação de picagem da biomassa realizada na planta de energia e a secagem no local de origem reduz os custos e o consumo de energia;
- A solução ótima contempla apenas os produtos que podem ser obtidos sem custo de aquisição.

Busato, Berruto e Piccarolo (2008) também desenvolveram um modelo de simulação dos processos de colheita e transporte de biomassa (milho para silagem), combinado com um modelo de otimização. Num primeiro estágio, o modelo de simulação foi utilizado para predizer o desempenho global do sistema de aproveitamento da biomassa. Num segundo momento, o resultado era incorporado em um modelo de programação linear, que encontrava a melhor combinação de equipamentos para cada distância e produtividade de

biomassa, visando minimizar o custo logístico. Os autores reforçam que as operações de colheita e transporte de biomassa são intensamente interconectadas e o projeto das operações logísticas e a estimativa de custos são tarefas complexas. Para essas características de complexidade, precisão e clareza, o uso de ferramentas convencionais não é suficiente para problemas de seleção de maquinário, sendo a simulação orientada a eventos uma opção para estudar as operações de colheita e transporte.

Para a aplicação dos modelos de manuseio de biomassa, os autores *op. cit.* estudaram a capacidade de processamento de uma recolhedora de forragem em função da distância ao ponto de geração de energia e da quantidade de reboques e caminhões disponíveis para o transporte. Quatro cenários, variando o raio médio de distância entre as áreas e o ponto de entrega de biomassa foram avaliados, com 10, 20, 30 e 40 km . Tanto a capacidade operacional, como eficiências de utilização e custos foram mais favoráveis para a menor distância.

5 METODOLOGIA: ENSAIOS DE CAMPO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A pesquisa conduzida neste trabalho pode ser classificada como empírica descritiva, que conforme Morabito e Pureza (2010, p.178) classificam, “... está principalmente interessada em criar um modelo que descreva de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, o que leva à uma compreensão dos processos reais”. De fato, a interação existente entre as operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar com aproveitamento da biomassa, envolve relações causais cujo interesse de compreensão pode proporcionar ganhos a todo o sistema de processamento de cana e palhiço.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a pesquisa quantitativa baseada em modelos é definida como aquela onde os modelos de relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho são desenvolvidos, analisados e testados. As variáveis de desempenho podem ser variáveis físicas como inventário e taxa de ocupação de recursos, por exemplo, ou variáveis econômicas como lucro, custos e faturamento.

O método no qual este trabalho foi conduzido pode ser dividido em duas etapas interdependentes: ensaios de campo (experimentos para coleta de dados) e simulação (estratégia de pesquisa baseada em modelagem e simulação). Conforme Martins (2010) indica, no método de pesquisa baseado em modelagem e simulação, o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis no modelo de pesquisa, que é uma abstração da realidade.

Os ensaios de campo foram conduzidos para avaliar o desempenho operacional de sistemas de colheita de cana-de-açúcar com recolhimento de biomassa, particularmente aqueles que ainda não haviam sido utilizados com essa cultura. A etapa de modelagem e simulação foi projetada para representar tais sistemas por meio de um modelo único, configurável, que pudesse ser utilizado como suporte a tomadas de decisão.

Na primeira etapa, três ensaios de campo foram realizados:

- a) Ensaio de colheita, com dois sistemas de limpeza (colheita com limpeza convencional e colheita com limpeza parcial) e dois dispositivos diferentes de corte de rebolos², com variação da quantidade de facas (4 facas e 5 facas);
- b) Ensaio de enfardamento com carregamento direto de fardos em caminhões;
- c) Ensaio de enfardamento com recolhimento e transbordo interno de fardos e carregamento externo.

² Secção do colmo de cana, fracionado pela colhedora. Chamado “tolete” na região Centro-Sul.

O ensaio de colheita foi realizado em uma usina da região de Araçatuba e os ensaios de enfardamento foram realizados em uma usina na região de Bauru. Ambas as usinas possuíam interesse no desenvolvimento de processos de manuseio da biomassa, sendo que a primeira já possuía estação de limpeza a seco para recepção e separação do palhiço (para sistemas de colheita com limpeza parcial ou integral), e a segunda já possuía estrutura para recepção e processamento de palhiço enfardado. No primeiro ensaio, de colheita, foram testados quatro tratamentos com as seguintes variações operacionais relativas ao dispositivo de picagem e de limpeza das colhedoras:

- a) Rolos picadores com 4 facas e rotação do extrator primário de 650 rpm (R1F4)
- b) Rolos picadores com 4 facas e rotação do extrator primário de 850 rpm (R2F4)
- c) Rolos picadores com 5 facas e rotação do extrator primário de 650 rpm (R1F5)
- d) Rolos picadores com 5 facas e rotação do extrator primário de 850 rpm (R2F5)

As rotações de 650 rpm e 850 rpm constituem referências para os sistemas de colheita com limpeza parcial e com limpeza convencional, respectivamente, para o modelo de colhedora utilizada no ensaio. Já a variação da quantidade de facas representava um potencial de melhoria que se desejava avaliar, uma vez que o corte da cana em frações menores, com o rolo de 5 facas, poderia proporcionar ganhos de carga transportada em relação ao rolo convencional, com 4 facas..

No segundo ensaio, a partir de uma área colhida no sistema com limpeza convencional, foi testado o desempenho do sistema de enfardamento de palhiço, composto pelo enleiramento e enfardamento da biomassa seguido do carregamento dos caminhões na área de colheita e transporte dos fardos até a usina em caminhões prancha.

No terceiro ensaio, também a partir de uma área colhida no sistema com limpeza convencional, avaliou-se o desempenho do enfardamento de palhiço com enleiramento prévio. No entanto, para dinamizar o processo de recolhimento de fardos e evitar problemas de compactação do solo, utilizou-se um implemento recolhedor para coletar os fardos e os acomodar na lateral do carreador, para posterior carregamento e transporte até a usina. Neste ensaio, o transporte de fardos foi realizado na configuração pentaminhão.

Na segunda etapa do estudo, que utilizou modelagem e simulação, elaborou-se um modelo de simulação parametrizado por meio de planilhas eletrônicas, para ser utilizado como ferramenta de apoio gerencial em decisões relativas ao sistema integrado de colheita de cana e aproveitamento de biomassa. O modelo permite a avaliação operacional dos sistemas de interesse, associada a uma avaliação de custos, tanto da cana como do palhiço processado.

Com base nos dados coletados nos ensaios de campo e complementados com dados bibliográficos, selecionaram-se dois estudos para avaliação operacional e econômica dos sistemas, por meio do modelo de simulação desenvolvido. O modelo foi parametrizado para representar uma usina com moagem de 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, uma quantidade que costuma ser utilizada como referência em estudos do setor sucroalcooleiro, por corresponder ao processamento de uma linha de moenda padrão, um módulo com capacidade de moagem de 500 t.h^{-1} ($12.000 \text{ t.dia}^{-1}$) em aproximadamente 170 dias de safra. Os dois estudos realizados foram:

Estudo A) Comparação dos sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa, configurados a partir das condições operacionais dos ensaios de campo.

Estudo B) Comparação de sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa em igualdade de condições operacionais.

No Estudo B, os três sistemas foram comparados nas mesmas configurações de transporte de cana (rodotrem) e os mesmos equipamentos de manuseio do palhiço (enleiradoras e enfardadoras), uma vez que nos testes de campo houve variação destes equipamentos e conseqüentemente, dos dados de desempenho operacional dos sistemas. O sistema rodotrem foi escolhido em virtude de ser a Combinação Veicular de Carga (CVC) de maior capacidade em termos de Peso Bruto Total Combinado (PBTC), prevista na legislação de transporte, além de permitir o uso do sistema “bate e volta”.

Este capítulo apresenta os procedimentos utilizados nos três ensaios de campo (seção 5.1) e na modelagem e simulação dos sistemas de colheita de cana com aproveitamento da biomassa (seção 5.2). Na parte de ensaios de campo, é descrito como os levantamentos de dados foram realizados e a forma de cálculo dos índices de desempenho dos sistemas e dos equipamentos. Na parte de modelagem e simulação, a descrição do modelo de simulação é feita com os sistemas que foram representados, as premissas adotadas e a interface por meio de planilhas eletrônicas para registro do desempenho operacional e das informações de custo.

O diagrama da Figura 5.1 resume as etapas seguidas para a condução deste trabalho. Distinguem-se as etapas de ensaios de campo e simulação, além da indicação dos cenários avaliados em cada um dos dois estudos realizados. Três cenários foram simulados no Estudo A e sete cenários no Estudo B.

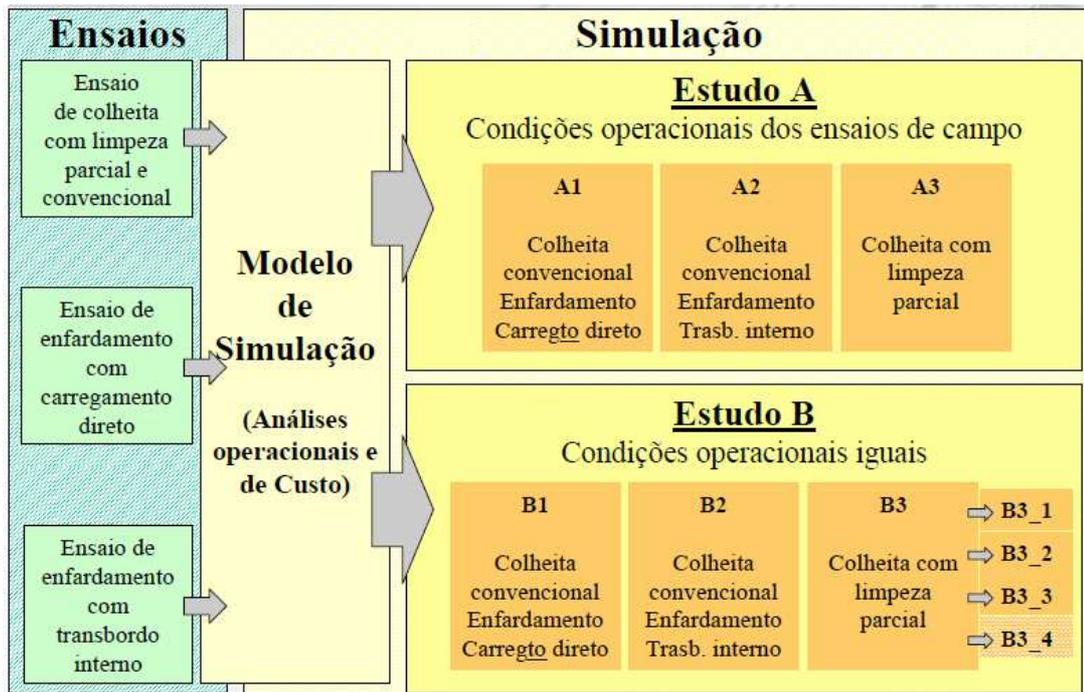


FIGURA 5.1 – Resumo esquemático da metodologia adotada no estudo.

Três cenários foram simulados no Estudo A, visando a replicação dos cenários operacionais observados nos ensaios de campo; e sete cenários no Estudo B, de modo a poder comparar os três sistemas selecionados em igualdade de condições operacionais.

5.1 Ensaios de Campo

Os ensaios foram realizados com a estrutura de experimentação do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)³ de Piracicaba/SP. Três ensaios de campo foram conduzidos:

- Ensaio de colheita, com 4 tratamentos: R1F4, R1F5, R2F4 e R2F5;
- Ensaio de enfardamento com carregamento direto de fardos em caminhões;
- Ensaio de enfardamento com recolhimento e transbordo interno de fardos e carregamento externo.

5.1.1 Ensaio de Colheita

A equipe para a realização deste ensaio foi composta por dois engenheiros agrícolas, três técnicos agrícolas, doze rurícolas, quatro operadores de máquinas e os motoristas dos caminhões.

A estrutura física inclui um caminhão baú de experimentação, equipado com gerador de eletricidade a diesel e outros equipamentos para ensaios, como balança com escala de $\pm 10g$; picador para preparação de amostras de umidade; escada; cordas; lonas; tambores para separação de amostras; rádios comunicadores; medidor de consumo de combustível; dispositivo para medição de distância – trena eletrônica; recipientes para pesagem; sacos de amostragem, pranchetas e planilhas para registro de dados (Figura 5.2).



FIGURA 5.2 – Caminhão baú com infraestrutura para experimentação agrícola.

³ O CTC é um centro de pesquisas privado, mantido por usinas e associações de fornecedores, que desenvolve tecnologia para obtenção de açúcar, etanol e energia.

Duas colhedoras CASE modelo A7700, ano 2007, com rodado em esteira foram disponibilizadas pela usina, sendo uma equipada com rolos picadores de 4 facas e a outra equipada com rolos picadores de 5 facas. As colhedoras são apresentadas na Figura 5.3, em preparação para a realização dos testes.



FIGURA 5.3 – Colhedoras utilizadas nos ensaios de campo.

Os tratamentos sempre eram levantados aos pares, ou seja, como cada colhedora possuía rolos picadores diferentes, uma com 4 facas e a outra com 5 facas, ora as duas máquinas estavam operando com rotação do extrator primário de 650 rpm e ora estavam trabalhando com 850 rpm. A Figura 5.4 apresenta uma faca de corte.



FIGURA 5.4 – Faca para corte da cana em rebolos.

A Figura 5.5 apresenta dois rolos picadores montados, com operação síncrona das facas (corte em guilhotina). Nesta figura, cada rolo possui 4 facas.



FIGURA 5.5 – Conjunto de rolos picadores.

As colhedoras foram mantidas com velocidade constante para os quatro tratamentos (R1F4, R1F5, R2F4, R2F5), em ritmo de colheita comercial. Em relação às regulagens relativas à limpeza da carga, o desponte da cana era realizado nos trechos com cana ereta e o extrator secundário foi mantido ligado para os ensaios com rotação de 850 rpm (colheita convencional) e desligado para os ensaios a 650 rpm (colheita com limpeza parcial).

A cana colhida era direcionada para um caminhão transbordo Volkswagen Worker, com uma caixa de transbordo SERMAG montada sobre o chassi, além de um segundo transbordo SERMAG a reboque (Figura 5.6).



FIGURA 5.6 - Caminhão transbordo recebendo cana processada pela colhedora.

A regulagem da altura da carga era feita pelo controle do volume de material sobre os transbordos e para cada colhedora foram alocados 2 conjuntos de caminhão transbordo, para agilizar o sistema de colheita e a retirada de amostras de impurezas na carga.

Para diminuir a interferência de ocorrências pontuais na área de colheita para algum tratamento em particular, como falhas de cana no canavial, presença de ervas daninhas, manchas de pragas, etc., os quatro tratamentos (R1F4, R1F5, R2F4 e R2F5) foram colhidos sequencialmente, ou seja, as duas máquinas operavam na mesma área (Figura 5.7).



FIGURA 5.7 – Colhedoras operando sequencialmente em uma mesma área.

Depois de carregados, os caminhões transbordos se dirigiam para o ponto de transferência da carga para os rodotrens, que operavam em sistema de bate e volta (Figura 5.8).



FIGURA 5.8 – Rodotrem recebendo a carga de um transbordo.

Os cavalos mecânicos dos rodotrens eram da marca Volvo, com potência de 382 kW (520 cv) e os semirreboques eram da marca RANDON, com 12,5 m de comprimento e 95 m³ de capacidade cada. O semirreboque comportava a carga de dois conjuntos do caminhão transbordo, ou seja, quatro transbordos individuais. Após a transferência da carga para o caminhão, os veículos retornavam à usina por estradas internas.

Os índices levantados no ensaio foram divididos em 3 grupos a saber:

- a) índices da colhedora de cana-de-açúcar,
- b) índices do transporte de cana-de-açúcar,
- c) índices do sistema de corte, carregamento e transporte (CCT).

5.1.1.1 Índices da Colhedora de Cana-de-açúcar

Para cada um dos quatro tratamentos e para cada conjunto de caminhão transbordo processado pela colhedora (2 transbordos) foram anotados em planilha específica os seguintes dados:

- i) TPRch = Tempo de produção, em minutos;
- ii) Lch = Combustível consumido pela colhedora, em litros;
- iii) Dch = Distância percorrida pela colhedora para a formação da carga, em metros.

O tempo de produção corresponde ao “tempo consumido exclusivamente em trabalho produtivo, isto é, tempo que os órgãos ativos da máquina efetivamente realizam a operação agrícola” (MIALHE, 1974, p.94).

Os três dados eram transmitidos via rádio a um dos técnicos pelos operadores das colhedoras, para registro e controle de alocação nos semirreboques dos rodotrens. Uma vez que cada semirreboque possuía capacidade para receber a carga de 4 transbordos, as informações de cada carregamento eram agrupadas duas a duas, conforme o tratamento, para serem alocados em um mesmo semirreboque para pesagem individual na usina.

A distância percorrida pelas colhedoras era mensurada por meio de sensor acoplado ao cubo da engrenagem de tração da esteira. Uma cinta metálica foi montada no cubo e mediante a leitura do pulso do sensor e de uma constante de conversão inserida no aparelho, a distância percorrida era obtida. A Figura 5.9 indica a cinta e o sensor protegido por capa metálica.

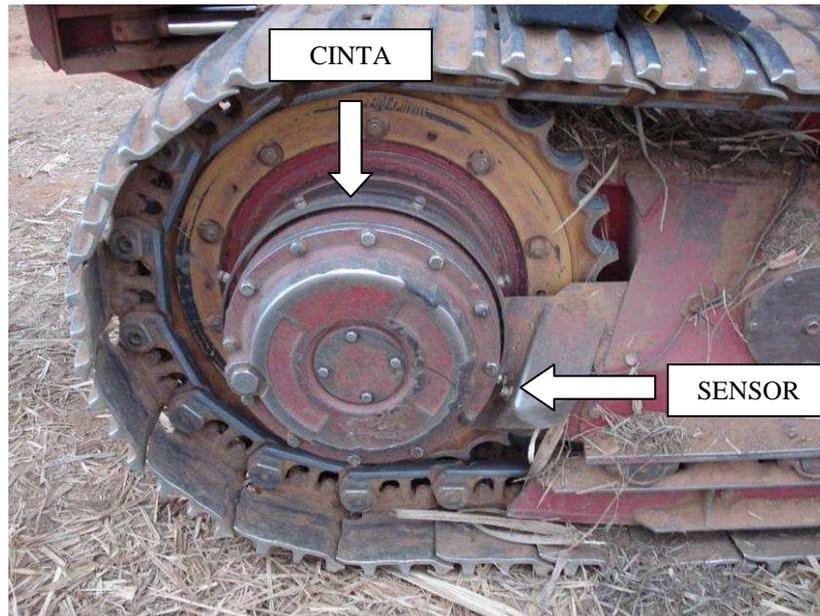


FIGURA 5.9 – Sensor de pulso eletrônico para medição da distância percorrida pela colhedora.

O consumo de combustível foi medido pela diferença dos volumes registrados por dois medidores de fluxo: um na saída do tanque para os bicos injetores e o outro no retorno do combustível. A Figura 5.10 apresenta os dois sensores de entrada e saída do tanque.



FIGURA 5.10 – Sensores de fluxo para medição do consumo de combustível da colhedora.

Todos os registros da instrumentação dos dados de colheita eram centralizados em um painel manipulado de dentro da cabine das colhedoras, conforme indica a Figura 5.11.



FIGURA 5.11 – Pannel para registro das informações da colhedora.

Conforme Mialhe (1974) define, a capacidade de produção é aplicada em máquinas cujo trabalho produtivo é medido em termos de peso ou volume de produto que sofreu a ação de seus órgãos ativos. Ela é dita capacidade de produção efetiva quando o produto deste trabalho é mensurado, efetivamente durante o tempo de execução da atividade fim, ou seja, o tempo de produção.

Com os dados mensurados em campo e a carga registrada por semirreboque na usina (Pch), foi possível obter quatro índices para as colhedoras: consumo específico de combustível (Equação 5.1), consumo horário de combustível (Equação 5.2), capacidade de produção efetiva (Equação 5.3) e a velocidade de deslocamento (Equação 5.4).

$$CEch = \frac{Lch}{Pch} \quad (\text{Equação 5.1})$$

Onde:

CEch = Consumo específico de combustível da colhedora, [L.t⁻¹].

Lch = Combustível consumido pela colhedora, [L].

Pch = Produção da colhedora, [t].

$$CHch = \frac{Lch}{\left(\frac{TPRch}{60}\right)} \quad (\text{Equação 5.2})$$

Onde:

CHch = Consumo horário de combustível da colhedora, [L.h⁻¹].

Lch = Combustível consumido pela colhedora, [L].

TPRch = Tempo de produção, [min].

$$CPEch = \frac{Pch}{\left(\frac{TPRch}{60}\right)} \quad (\text{Equação 5.3})$$

Onde:

CPEch = Capacidade de produção efetiva da colhedora, [t.h⁻¹].

Pch = Produção da colhedora, [t].

TPRch = Tempo de produção, [min].

$$Vch = \frac{Dch}{1000 * \left(\frac{TPRch}{60}\right)} \quad (\text{Equação 5.4})$$

Onde:

Vch = Velocidade de deslocamento da colhedora, [km.h⁻¹].

Dch = Distância percorrida pela colhedora para a formação da carga, [m].

TPRch = Tempo de produção, [min].

5.1.1.2 Índices do Transporte de Cana-de-açúcar

Os dados para levantar os índices relativos ao transporte foram coletados para cada viagem do veículo. Eles são relacionados a:

- i) Pv = Carga líquida transportada pelo veículo, [t];
- ii) Lv = Combustível consumido pelo veículo, [L];
- iii) Qv = Quilometragem percorrida pelo veículo, [km].

A carga líquida foi obtida diretamente dos registros da balança da usina, pela diferença entre o peso bruto e a tara do veículo. Os litros consumidos foram medidos na própria bomba do posto de combustível da usina, quando também foi feito o registro da quilometragem percorrida pelo caminhão.

Dois índices foram mensurados para o transporte, o consumo específico de combustível e o rendimento energético, cujos cálculos são dados pelas Equações 5.5 e 5.6, respectivamente:

$$CE_v = \frac{L_v}{P_v} \quad (\text{Equação 5.5})$$

Onde:

CE_v = Consumo específico de combustível do veículo, [$L.t^{-1}$].

L_v = Combustível consumido pelo veículo, [L].

P_v = Carga líquida transportada pelo veículo, [t].

$$RE_v = P_v \frac{Q_v}{L_v} \quad (\text{Equação 5.6})$$

Onde:

RE_v = Rendimento energético do veículo, [$t.km.L^{-1}$].

P_v = Carga líquida transportada pelo veículo, [t].

Q_v = Quilometragem percorrida pelo veículo, [km].

L_v = Combustível consumido pelo veículo, [L].

O rendimento energético de caminhões é um parâmetro que alia a capacidade de transporte da composição e o respectivo consumo de combustível em um mesmo índice. Em síntese, este índice corresponde a quantas toneladas são transportadas com um litro de combustível pela distância de um quilômetro.

5.1.1.3 Índices do Sistema de Corte, Carregamento e Transporte (CCT)

Os índices relativos ao sistema de CCT dizem respeito a resultados do sistema de corte, carregamento e transporte como um todo e não a um determinado equipamento como colhedora, transbordo ou veículo unicamente. Os dados para a geração destes índices foram coletados por meio do ensaio de impurezas e de outros registros tomados sobre as colhedoras e caminhões.

Para a realização dos ensaios de impurezas, o método empregado foi a coleta direta do material processado (cana + palhiço) sobre o transbordo. Logo após a colheita, foi retirada uma amostra (tambor de 100 L) por transbordo, anteriormente à transferência da cana processada para os rodotrens. O tambor era colocado lateralmente à carga e o material próximo era colocado dentro do mesmo (Figura 5.12).



FIGURA 5.12 – Coleta de material processado sobre o transbordo.

A amostra do tambor era espalhada em uma lona para separação e pesagem do material em quatro categorias, obtendo-se os dados:

- i) M_c = Massa de cana na amostra, [kg];
- ii) M_{pl} = Massa de palha na amostra, [kg];
- iii) M_{pt} = Massa de ponteiro na amostra, [kg];
- iv) M_{im} = Massa de impurezas minerais na amostra, [kg].

A cana após a colheita apresenta-se seccionada, no formato de rebolos. A palha corresponde às folhas verdes e folhas secas e o ponteiro à parte superior da cana, acima do ponto de quebra manual do colmo. As impurezas minerais correspondem à terra presente na amostra. Os materiais auxiliares para fazer a separação são apresentados na Figura 5.13.



FIGURA 5.13 – Material utilizado no ensaio de impurezas.

Os materiais são na sequência de trás para frente na Figura 5.13: baldes para pesagem de cana; tambores de amostragem; baldes para pesagem de palhiço; bacias para pesagem de ponteiros; peneiras, escovas e pás para separação de terra.

Os rurícolas foram agrupados em duas equipes para aceleração dos trabalhos, uma vez que a frequência de chegada de transbordos para retirada de amostras era alta (Figura 5.14).



FIGURA 5.14 – Duas equipes de separação para o ensaio de impurezas.

A Figura 5.15 apresenta uma amostra de impurezas, já separada nas quatro categorias.



FIGURA 5.15 – Separação da amostra em cana, ponteiro, palha e terra.

Após isso, a cana era levada de volta aos transbordos, o palhicho e os ponteiros eram descartados no próprio campo e a terra era levada para pesagem em laboratório. Parte dos rebolos era separada para medição do seu comprimento.

Para cada amostra foram calculados o percentual de impurezas vegetais (base úmida) e o percentual de impurezas minerais na carga, que correspondem respectivamente às Equações 5.7 e 5.8.

$$PIVU = \left[\frac{(M_{pl} + M_{pt})}{(M_c + M_{pl} + M_{pt} + M_{im})} \right] * 100 \quad (\text{Equação 5.7})$$

$$PIM = \left[\frac{M_{im}}{(M_c + M_{pl} + M_{pt} + M_{im})} \right] * 100 \quad (\text{Equação 5.8})$$

Onde:

PIVU = Percentual de impurezas vegetais em base úmida, [%].

PIM = Percentual de impurezas minerais, [%].

M_{pl} = Massa de palha na amostra, [kg].

M_{pt} = Massa de ponteiro na amostra, [kg].

M_c = Massa de cana na amostra, [kg].

M_{im} = Massa de impurezas minerais na amostra, [kg].

Da palha e dos ponteiros eram retiradas amostras para processamento e posterior análise da umidade em estufa por 24 horas a 60°C. De cada dois transbordos era agrupada uma amostra para esta análise. A Figura 5.16 apresenta o processamento de uma amostra de palha para determinação da umidade.



FIGURA 5.16 – Preparação de amostras para determinação de umidade.

O cálculo da impureza vegetal em base seca é indicado na Equação 5.9.

$$PIVS = \frac{\{[Mpl * (1 - Upl)] + [Mpt * (1 - Upt)]\}}{(Mc + Mpl + Mpt + Mim)} * 100 \quad (\text{Equação 5.9})$$

Onde:

PIVS = Percentual de impurezas vegetais em base seca, [%].

Upl = Umidade da palha da amostra, [%].

Upt = Umidade do ponteiro da amostra, [%].

Mpl = Massa de palha na amostra, [kg].

Mpt = Massa de ponteiro na amostra, [kg].

Mc = Massa de cana na amostra, [kg].

Mim = Massa de impurezas minerais na amostra, [kg].

Ainda em relação aos índices relativos ao sistema de CCT, calculou-se a produtividade do canavial em função da distância percorrida pela colhedora e da carga de cana entregue na usina pelo veículo (Equação 5.10).

$$TCH = \left[\frac{Pv}{(Dch * E)} \right] * 10 \quad (\text{Equação 5.10})$$

Onde:

TCH = Produtividade do canavial, [t.ha⁻¹].

Pv = Carga líquida transportada pelo veículo, [kg].

Dch = Distância percorrida pela colhedora para a formação da carga, [m].

E = Espaçamento entre linhas, [m].

Em função da produtividade do canavial e do percentual de impurezas vegetais na carga (b.u.), pode-se obter a produção total de colmos por hectare (Equação 5.11). Por sua vez, utilizando a referência de Hassuani, Leal e Macedo (2005) de que o potencial de palhiço do canavial, em base seca, pode ser expresso pela relação de 14% da massa dos colmos, em média, é possível obter a quantidade disponível total de palhiço na área do experimento, em t.ha⁻¹ (Equação 5.12).

$$\text{TCHc} = \text{TCH} * (1 - \text{PIVU}) \quad (\text{Equação 5.11})$$

$$\text{PTPS} = \text{TCHc} * 0,86 \quad (\text{Equação 5.12})$$

Onde:

TCHc = Produtividade do canavial em colmos, [t.ha⁻¹];

PTPS = Produção total de palhiço em base seca, [t.ha⁻¹].

PIVU = Percentual de impurezas vegetais em base úmida, [%].

TCH = Produtividade do canavial, [t.ha⁻¹].

A quantidade de palhiço presente na carga, também pode ser expressa em t.ha⁻¹ conforme as equações 5.13 e 5.14 indicam em base úmida e base seca, respectivamente. A expressão em base seca visa corrigir qualquer alteração decorrente da umidade do material.

$$\text{PPCU} = \text{TCH} * \text{PIVU} \quad (\text{Equação 5.13})$$

$$\text{PPCS} = \text{TCH} * \text{PIVS} \quad (\text{Equação 5.14})$$

Onde:

PPCU = Palhiço presente na carga em base úmida, [t.ha⁻¹].

PPCS = Palhiço presente na carga em base seca, [t.ha⁻¹].

TCH = Produtividade do canavial, [t.ha⁻¹].

PIVU = Percentual de impurezas vegetais em base úmida, [%].

PIVS = Percentual de impurezas vegetais em base seca, [%].

O palhiço remanescente sobre o solo, (PRS) pode ser calculado por diferença entre a produção total de palhiço e a quantidade de palhiço presente na carga, todos em base seca (b.s.) e finalmente a eficiência de limpeza da colhedora pode ser expressa pela Equação 5.15:

$$\text{ELch} = \left(\frac{\text{PRSS}}{\text{PTPS}} \right) * 100 \quad (\text{Equação 5.15})$$

Onde:

ELch = Eficiência de limpeza da colhedora, [%].

PRSS = Palhiço remanescente sobre o solo em base seca, [t.ha⁻¹].

PTPS = Produção total de palhiço em base seca, [t.ha⁻¹].

5.1.2 Ensaio de Enfardamento com Carregamento de Fardos em Caminhões

O ensaio de enfardamento foi conduzido por uma equipe formada por três engenheiros agrícolas, dois técnicos agrícolas e um estagiário e a estrutura física utilizada foi a mesma do ensaio de colheita. A enfardadora avaliada era da marca Vicon, modelo LB 12290 e não havia sido testado anteriormente com cana-de-açúcar para esse tipo de aplicação.

O sistema de enfardamento era composto por uma sequência de operações iniciada a partir de uma semana após a colheita da cana. Inicialmente era realizado o enleiramento do palhicho remanescente, com o objetivo de agrupar a biomassa, para agilizar o processamento da enfardadora. A enleiradora testada foi desenvolvida pela mesma empresa, com largura de trabalho de 7m tracionada por um trator MF 299, com potência de 74 kW (100 cv), Figura 5.17. O trator operava na marcha 2B, com velocidade de trabalho aproximada de 9 km.h⁻¹.



FIGURA 5.17 – Conjunto trator-enleiradora de palhicho.

Após a operação do conjunto trator-enleiradora de palhicho, a área de recolhimento apresentava as leiras com a biomassa uniformemente espaçadas como apresenta a Figura 5.18.



FIGURA 5.18 - Aspecto da área de colheita após a passagem do conjunto trator-enleiradora de palhço.

Na sequência, o conjunto trator-enfardadora era posicionado para processar a leira de biomassa, formando os fardos, como indica a sequência das Figuras 5.19, 5.20 e 5.21. O trator utilizado era um New Holland TM180, com potência de 132 kW (180 cv). O enfardamento era feito nas marchas A5 e A6. com velocidade em torno de 5 km.h⁻¹.



FIGURA 5.19 - Conjunto trator-enfardadora posicionado sobre leira de biomassa.



FIGURA 5.20 – Enfardadora coletando a leira de biomassa e formando fardo prismático.



FIGURA 5.21 – Fardos prismáticos grandes dispostos na área de recolhimento.

Os fardos resultantes da operação eram prismáticos grandes, com seção de 1,2m x 0,9m e comprimento regulado em 2,4 m, amarrado por seis cordões.

O consumo de combustível do conjunto trator-enleiradora de palhiço e trator-enfardadora foram mensurados diretamente no campo. No início da jornada de trabalho, os equipamentos eram abastecidos completamente pelos comboios, em local designado. Ao término das operações, os equipamentos retornavam ao mesmo ponto para reabastecimento e registro do volume de diesel consumido.

Após o enfardamento iniciou-se o carregamento dos fardos e o transporte para a usina para processamento. O carregamento foi feito por uma carregadora de cana inteira convencional, que agrupava os fardos sobre um caminhão prancha (Figura 5.22), comumente utilizada para o transporte de máquinas (colhedora, tratores) e implementos.



FIGURA 5.22 – Carregamento de fardos no caminhão prancha.

Para esta operação, o caminhão prancha entrava na área de colheita acompanhando a carregadora no recolhimento dos fardos até atingir uma carga estável (Figura 5.23).



FIGURA 5.23 – Caminhão prancha carregado com os fardos.

Na usina, os caminhões eram pesados e logo na sequência os fardos eram descarregados por uma carregadora sendo acomodados no pátio junto ao triturador de fardos, o qual também era alimentado pela carregadora (Figuras 5.24 e 5.25).



FIGURA 5.24 – Descarregamento dos fardos na usina.



FIGURA 5.25 – Colocação de fardo no equipamento de trituração de fardos.

A título de organização, os resultados do ensaio de campo foram agrupados em quatro seções, a saber:

- a) índices do conjunto trator-enleiradora de palhicho,
- b) índices do conjunto trator-enfardadora,
- c) índices do carregamento, transporte e impureza mineral dos fardos,
- d) índices do palhicho.

5.1.2.1 Índices do Conjunto trator-enleiradora de Palhão

A operação de enleiramento de palhão foi realizada por meio do apontamento em planilha específica do tempo em que o conjunto trator-enleiradora permaneceu em cada uma das atividades listadas no Quadro 5.1.

QUADRO 5.1 – Descrição das atividades para a operação de enleiramento de palhão.

Código	Atividade	Descrição
1	Enleiramento	Recolhimento do palhão e agrupamento na leira central, o que corresponde ao tempo efetivamente em operação do conjunto trator-enleiradora, ocupado em sua atividade fim.
2	Abastecimento/Lubrificação	Abastecimento de diesel e lubrificação de partes móveis.
3	Regulagem	Ajuste de altura e hastes de recolhimento.
4	Deslocamento	Movimentação do conjunto trator-enleiradora fora de operação.
5	Manutenção	Espera e conserto devido à falha no trator ou na enleiradora.
6	Manobra de cabeceira	Manobra executada no carreador no final da área de recolhimento para reposicionamento do conjunto trator implemento para formação de uma nova leira.
8	Bordadura	Operação de preparação das laterais da área de recolhimento.
9	Administrativo	Tempo do conjunto trator-enleiradora parado devido a refeições, trocas de turno, preenchimento de relatório, etc.

A parcela de tempo em que o conjunto trator-enleiradora de palhão estava em operação efetivamente corresponde ao somatório dos tempos apontados com o código 1, que representa o tempo de produção da enleiradora (TPr enleir).

O somatório de todos os tempos apontados no ensaio corresponde ao tempo máquina da enleiradora de palhão (TM enleir). O tempo máquina abrange o tempo de preparação para o trabalho, o tempo de interrupção e o tempo de produção, conforme nomenclatura definida por Mialhe (1974). Assim, durante o período de enleiramento foram registrados:

- i) TP_{Rel} = Tempo de produção da enleiradora, [h];
- ii) TM_{el} = Tempo máquina da enleiradora, [h];
- iii) L_{el} = Combustível consumido pela enleiradora, [L].

Por ocasião do ensaio de enfardamento, outros dados também foram registrados e utilizados no levantamento de índices relativos ao enleiramento de palhicho:

- iv) QF_v = Quantidade de fardos transportados pelo veículo, [fardos];
- v) QFT = Quantidade total de fardos produzidos no ensaio, [fardos];
- vi) P_v = Carga líquida transportada pelo veículo, [t];
- vii) AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

Os índices mensurados para o conjunto trator-enleiradora de palhicho foram capacidade de campo efetiva (Equação 5.16); capacidade de campo operacional (Equação 5.17); consumo específico de diesel por fardo (Equação 5.18) e por hectare trabalhado (Equação 5.19).

“Capacidade de campo” é um termo utilizado para máquinas que, para executarem uma operação agrícola, devem deslocar-se no campo e cobrir determinada área. A capacidade de campo é chamada de “efetiva” quando representa a capacidade efetivamente demonstrada pela máquina no campo, em sua atividade fim, sendo calculada em função do tempo de produção. Já o cálculo da capacidade de campo “operacional” considera os efeitos de fatores de ordem operacional, utilizando portanto, o tempo máquina (MIALHE, 1974).

O autor ainda apresenta que a divisão da capacidade de campo operacional pela capacidade de campo efetiva corresponde ao rendimento de campo efetivo (ou eficiência de campo), que “indica as perdas da área trabalhada ou produção, devidas aos tempos consumidos em preparação da máquina e de interrupções durante a jornada de trabalho”. (1974, p.124).

$$CCE_{el} = \frac{AT}{TP_{Rel}} \quad (\text{Equação 5.16})$$

Onde:

CCE_{el} = Capacidade de campo efetiva da enleiradora, [$ha \cdot h^{-1}$].

AT = Área total de recolhimento, [ha].

TP_{Rel} = Tempo de produção da enleiradora, [h].

$$CCO_{el} = \frac{AT}{TM_{el}} \quad (\text{Equação 5.17})$$

Onde:

CCO_{el} = Capacidade de campo operacional da enleiradora, [$ha \cdot h^{-1}$].

AT = Área total de recolhimento, [ha].

TM_{el} = Tempo máquina da enleiradora, [h].

$$CE_{Fe} = \frac{L_{el}}{QFT} \quad (\text{Equação 5.18})$$

Onde:

CE_{Fe} = Consumo de combustível de enleiradoras por fardo, [$L \cdot fardo^{-1}$].

L_{el} = Combustível consumido pelo conjunto trator-enleiradora, [L].

QFT = Quantidade total de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

$$CE_{e} = \frac{L_{el}}{AT} \quad (\text{Equação 5.19})$$

Onde:

CE_{e} = Consumo de combustível da enleiradora por hectare, [$L \cdot ha^{-1}$].

L_{el} = Combustível consumido pelo conjunto trator-enleiradora, [L].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

Para o cálculo das capacidades de produção efetivas, em fardos, do conjunto trator-enleiradora de palhiço, foi necessário determinar a massa média dos fardos, o que foi feito com base na massa e na quantidade total de fardos entregues na usina, conforme apresenta a Equação 5.20:

$$MMF = \left(\frac{P_v}{QF_v} \right) * 1000 \quad (\text{Equação 5.20})$$

Onde

MMF = Massa média do fardo, [kg].

P_v = Carga líquida transportada pelo veículo, [t].

QF_v = Quantidade de fardos transportados pelo veículo, [fardos].

Em relação ao trabalho produzido, ainda foram gerados alguns índices para o conjunto trator-enleiradora: capacidade de produção efetiva da enleiradora (Equação 5.21) e capacidade de produção operacional da enleiradora (Equação 5.22).

$$CPEel = \frac{MMF * QFT}{TPRel * 1000} \quad (\text{Equação 5.21})$$

Onde:

CPEel = Capacidade de produção efetiva da enleiradora, [t.h⁻¹].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

TPRel = Tempo de produção da enleiradora, [h].

$$CPOel = \frac{MMF * QFT}{TMel * 1000} \quad (\text{Equação 5.22})$$

Onde:

CPOel = Capacidade de produção operacional da enleiradora, [t.h⁻¹].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

TMel = Tempo máquina da enleiradora [h].

5.1.2.2 Índices do Conjunto Trator-enfardadora

Os índices de enfardamento foram levantados de maneira similar aos da operação de enleiramento de palhico. Durante todo o ensaio, as diversas atividades realizadas pelo conjunto trator-enfardadora foram registradas em uma planilha específica. O Quadro 5.2 apresenta a descrição das atividades apontadas.

QUADRO 5.2 – Descrição dos eventos apontados para a operação de enfardamento.

Código	Atividade	Descrição
1	Enfardamento	Processamento da leira e execução de fardos, o que corresponde ao tempo efetivamente em operação do conjunto trator-enfardadora, ocupado por sua atividade fim.
2	Abastecimento/Lubrificação	Abastecimento de diesel e lubrificação de partes móveis.
3	Desembuchamento	Parada para retirada de palhiço, para desobstruir as partes móveis do trator ou da enfardadora.
4	Deslocamento	Movimentação do conjunto trator-enfardadora fora de operação.
5	Manutenção	Espera e conserto devido à falha no trator ou enfardadora.
6	Manobra de cabeceira	Manobra executada no carreador no final da área de recolhimento para reposicionamento do conjunto trator-implemento para formação de uma nova linha de fardos.
7	Reparo de Barbante	Conserto de barbante de amarração dos fardos.
8	Administrativo	Tempo do conjunto trator-enfardadora parado devido a paradas para refeições, trocas de turno, preenchimento de relatório, etc.
9	Limpeza	Limpeza do conjunto trator-enfardadora (acúmulo de terra).

Os apontamentos registrados com o código 1 correspondem ao tempo no qual o conjunto trator-enfardadora encontrava-se efetivamente em operação em sua atividade fim, ou seja, o tempo de produção da enfardadora (TPRef).

Assim como no ensaio com a enleiradora de palhiço, o tempo máquina da enfardadora (TM enfard) corresponde ao total de tempo registrado para todas as atividades apontadas para o equipamento, ou seja, o tempo de preparação para o trabalho, tempo de interrupção e o tempo de produção (MIALHE, 1974). Os dados registrados para compor os índices relativos ao enfardamento foram:

- i) TPRef = Tempo de produção da enfardadora, [h].
- ii) TMef = Tempo máquina da enfardadora, [h].
- iii) Lef = Combustível consumido pela enfardadora, [L].

Os dados relativos ao transporte dos fardos para a usina, massa média dos fardos e outras informações coletadas em campo também foram utilizadas para a geração dos índices relativos ao desempenho do conjunto trator-enfardadora.

Os índices mensurados para o conjunto trator-enfardadora foram fardos produzidos por hectare (Equação 5.23), capacidade de campo efetiva (Equação 5.24); capacidade de campo operacional (Equação 5.25); consumo específico de combustível por fardo (Equação 5.26) e por hectare trabalhado (Equação 5.27).

$$QFA = \frac{QFT}{AT} \quad (\text{Equação 5.23})$$

Onde:

QFA = Quantidade de fardos produzidos por hectare, [fardos.ha⁻¹].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

$$CCEef = \frac{AT}{TPRef} \quad (\text{Equação 5.24})$$

Onde

CCEef = Capacidade de campo efetiva da enfardadora, [ha.h⁻¹].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

TPRef = Tempo de produção da enfardadora, [h].

$$CCOef = \frac{AT}{TMef} \quad (\text{Equação 5.25})$$

Onde:

CCOef = Capacidade de campo operacional da enfardadora, [ha.h⁻¹].

AT = Área total de recolhimento, [ha].

TMef = Tempo máquina da enfardadora, [h].

$$CEFef = \frac{Lef}{QFT} \quad (\text{Equação 5.26})$$

Onde:

CEef = Consumo de combustível da enfardadora por fardo, [L.fardo⁻¹].

Lef = Combustível consumido pela enfardadora, [L].

QFT = Quantidade total de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

$$CE_{\text{ef}} = \frac{L_{\text{ef}}}{AT} \quad (\text{Equação 5.27})$$

Onde:

CE_{ef} = Consumo específico de combustível de enfardadoras, [$L \cdot ha^{-1}$].

L_{ef} = Combustível consumido pela enfardadora, [L].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

Também foram calculados índices de capacidades de produção para a enfardadora, mensurados em função do trabalho produzido (fardos). Os índices calculados para o conjunto trator-enfardadora foram: capacidade de produção efetiva da enfardadora (Equação 5.28) e capacidade de produção operacional da enfardadora, (Equação 5.29).

$$CPE_{\text{ef}} = \frac{MMF * QFT}{TP_{\text{ref}} * 1000} \quad (\text{Equação 5.28})$$

Onde:

CPE_{ef} = Capacidade de produção efetiva da enfardadora, [$t \cdot h^{-1}$].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

TP_{ref} = Tempo de produção da enfardadora, [h].

$$CPO_{\text{ef}} = \frac{MMF * QFT}{TM_{\text{ef}} * 1000} \quad (\text{Equação 5.29})$$

Onde:

CPO_{ef} = Capacidade de produção operacional da enfardadora, [$t \cdot h^{-1}$].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

TM_{ef} = Tempo máquina da enfardadora, [h].

Observação: As capacidades de produção apresentadas em $t \cdot h^{-1}$ também podem ser expressas em fardos. h^{-1} . Para isso, basta dividir os índices pela massa média dos fardos (M média fardo).

5.1.2.3 Índices do Carregamento, Transporte e Impureza dos Fardos

Foram feitas medições do tempo de carregamento dos fardos na carroceria dos caminhões prancha, assim como a contagem da quantidade de fardos por viagem. Na usina, os caminhões foram pesados na entrada e na saída; massa bruta e tara, respectivamente para a obtenção da carga líquida. Amostras também foram retiradas das cargas de fardos para se obter o percentual de impureza mineral (terra) e de umidade.

Os dados coletados para a geração dos índices relativos ao transporte são listados na sequência:

- i) QFv = Quantidade de fardos transportados pelo veículo, [fardos];
- ii) TCF = Tempo de carregamento dos fardos no veículo, [min];
- iii) M veic = Massa líquida transportada, [t];
- iv) MTA = Massa total da amostra de impurezas, [g];
- v) Mimf = Massa de impurezas minerais na amostra, [g];
- vi) Uf = Umidade dos fardos, [%].

Essas medições permitiram levantar a massa média dos fardos, que foi utilizado em alguns dos cálculos previamente apresentados, além do percentual de impureza mineral (Equação 5.30).

$$\text{PIMF} = \left(\frac{\text{Mimf}}{\text{MTA}} \right) * 100 \quad (\text{Equação 5.30})$$

Onde:

PIMF = Percentual de impureza mineral no fardo, [%].

Mimf = Massa de impurezas minerais na amostra, [g].

MTA = Massa total da amostra de impureza mineral, [g],

5.1.2.4 Índices do Palhiço

A produção total de palhiço inicialmente disponível na área que foi recolhida é formada pelo somatório do palhiço que foi enfardado e do palhiço remanescente sobre o solo, após o envio dos fardos à usina. Essa relação é definida na Equação 5.31, que pode ser expressa tanto em base úmida (b.u.), como em base seca (b.s.), desde que todas as parcelas estejam em uma mesma base.

$$PTP = PRS + PPC \quad (\text{Equação 5.31})$$

Onde:

PTP = Produção total de palhiço, [t.ha⁻¹].

PRS = Palhiço remanescente sobre o solo, [t.ha⁻¹].

PE = Palhiço enfardado, [t.ha⁻¹].

Após o recolhimento dos fardos foram levantadas amostras para mensurar a quantidade de palhiço remanescente sobre o solo (PRS, b.u.), após as operações de enleiramento, enfardamento e carregamento de fardos. As amostras foram espacialmente distribuídas, de modo a cobrir toda a área de recolhimento.

As áreas de amostragem possuíam 10 m² e foram delimitadas com fio de nylon e estacas na dimensão de 7m x 1,43m, com a maior dimensão orientada perpendicularmente às leiras de palhiço, de modo a cobrir a mesma largura de trabalho do conjunto trator-enleiradora. (Figura 5.26).



FIGURA 5.26 – Área para mensuração do palhiço remanescente sobre o solo.

Todo o material do interior da marcação foi coletado, sendo pesado em balança de precisão de $\pm 5g$, para obter a quantidade de palhiço resultante por hectare. De cada amostra foi retirado material para determinação da umidade em laboratório (Up).

O cálculo referente ao palhiço remanescente no campo, em base úmida, é dado pela Equação 5.32.

$$\text{PRSU} = \text{Pa} \quad (\text{Equação 5.32})$$

Onde:

PRSU = Palhiço remanescente sobre o solo em base úmida, [t.ha⁻¹].

Pa = Palhiço coletado na amostra, [kg].

Para a conversão em base seca (b.s.), é necessário descontar o percentual relativo à umidade (Equação 5.33):

$$\text{PRSS} = \text{PRSU} \cdot (1 - \text{Up}) \quad (\text{Equação 5.33})$$

Onde:

PRSS = Palhiço remanescente sobre o solo em base seca, [t.ha⁻¹].

PRSU = Palhiço remanescente sobre o solo em base úmida, [t.ha⁻¹].

Up = Umidade do palhiço remanescente no campo, [%].

Já a quantidade de palhiço enfardado (b.u.), pode ser obtida pela Equação 5.34:

$$\text{PEU} = \frac{(\text{MMF} \cdot \text{QFA})}{1000} \quad (\text{Equação 5.34})$$

Onde:

PEU = Palhiço enfardado em base úmida, [t.ha⁻¹].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFA = Quantidade de fardos produzidos por hectare, [fardos.ha⁻¹].

Da mesma maneira que o palhiço remanescente no campo, para converter a quantidade de palhiço enfardado, em t.ha⁻¹, em base seca (b.s.), é necessário descontar o percentual relativo à umidade (Equação 5.35):

$$\text{PES} = \text{PEU} \cdot (1 - \text{Uf}) \quad (\text{Equação 5.35})$$

Onde:

PES = Palhiço enfardado em base seca, [t.ha⁻¹].

PEU = Palhiço enfardado em base úmida, [t.ha⁻¹].

Uf = Umidade do fardo, [%].

A eficiência de recolhimento total do sistema corresponde ao percentual do palhiço disponível que foi efetivamente transportado à usina no formato de fardos. Esse percentual pode ser obtido pelo cálculo apresentado na Equação 5.36, com as quantidades de palhiço expressas em base seca:

$$ER = \left[\frac{(PTPS - PRSS)}{PTPS} \right] * 100 \quad (\text{Equação 5.36})$$

Onde:

ER = Eficiência de recolhimento de palhiço, [%].

PRSS = Palhiço remanescente sobre o solo em base seca, [t.ha⁻¹].

PTPS = Produção total de palhiço em base seca, [t.ha⁻¹].

5.1.3 Ensaio de Enfardamento com Transbordo Interno de Fardos

O ensaio do sistema de enfardamento com transbordo interno de fardos foi realizado para avaliar um grupo de cinco operações em série: enleiramento da biomassa, enfardamento, recolhimento de fardos, carregamento dos fardos e transporte para a usina.

Este ensaio também contou com a infraestrutura de experimentação agrícola do CTC e foi realizado por dois engenheiros e quatro técnicos agrícolas, além do suporte de um engenheiro da empresa New Holland, parceira do CTC no desenvolvimento de sistemas agrícolas para o recolhimento do palhiço, que forneceu os equipamentos de enleiramento, enfardamento e recolhimento dos fardos, bem como os tratores, para serem avaliados no processamento de biomassa de cana-de-açúcar.

Inicialmente e, da mesma maneira que o ensaio de enfardamento anterior, uma operação de enleiramento da biomassa foi realizada previamente ao enfardamento. Para tanto, utilizou-se uma enleiradora New Holland modelo HD II Rake, com 17 discos, acoplada a um trator MF 283, operando na marcha 1S a 2000 rpm (Figura 5.27). A largura de trabalho do conjunto era de 5,6m (espaçamento entre leiras).



FIGURA 5.27 - Conjunto trator–enleiradora de palhico.

Na sequência, uma enfardadora processava a leira de biomassa, formando fardos prismáticos grandes. A enfardadora avaliada era da marca New Holland modelo BB9080, acoplada em um trator também da marca New Holland modelo TM 7030, operando na marcha B1 (Figura 5.28). Os fardos produzidos possuíam seção de 1,2m x 0,9m e comprimento regulado em 2,2m, com amarração feita por seis cordões.



FIGURA 5.28 – Conjunto trator-enfardadora utilizado no ensaio.

Após o enfardamento, um implemento recolhedor de fardos de marca Mil-Stak PT/2010 foi utilizado para fazer a coleta dos mesmos na área de colheita. O implemento foi acoplado em um trator New Holland TM 7040. (Figura 5.29).



FIGURA 5.29 – Conjunto trator-recolhedor de fardos em operação.

O implemento recolhedor era munido de uma pinça hidráulica lateral que recolhia um fardo por vez e o colocava em sua primeira plataforma (plataforma menor). Este mecanismo permitia que a coleta fosse realizada com o trator em movimento.

A cada dois fardos coletados, a plataforma menor era erguida e fazia a transferência dos fardos para a plataforma maior, apoiando-os em garfos. Este procedimento era repetido até que a capacidade da plataforma maior fosse atingida.

O implemento recolhedor possuía capacidade para acomodar dez fardos, porém, para o ensaio foram padronizados apenas oito, visando o alcance pela garra da carregadora que faria a acomodação dos fardos no caminhão. Após o conjunto trator-recolhedor de fardos coletar os oito fardos, estes eram basculados junto ao carreador, e o conjunto seguia para um novo ciclo de recolhimento (Figura 5.30).



FIGURA 5.30 – Transferência de fardos para a lateral do carreador.

Na sequência, os fardos foram carregados no caminhão por meio de uma carregadora convencional. A carregadora utilizada no teste era montada sobre um trator Valtra 1280 e o caminhão utilizado era um Volvo NL 12, na configuração pentaminhão, ou seja, um caminhão plataforma com quatro reboques acoplados (Figura 5.31). Foram alocados dezoito fardos por unidade da composição de transporte (caminhão plataforma ou reboque). O percurso desta unidade de transporte para a usina era realizado por estradas internas das áreas de colheita.



FIGURA 5.31 – Carregamento de caminhão por carregadora, realizado no carreador.

Nota-se que os fardos acumulados permitem o carregamento do caminhão de maneira mais ágil do que se a carregadora e o veículo de transporte tivessem que entrar na área de colheita, como no ensaio anterior.

Assim como o ensaio anterior, os abastecimentos de combustível dos equipamentos (conjunto trator-enleiradora, trator-enfardadora e trator-recolhedor de fardos) foram realizados no campo, por meio do caminhão comboio. O registro do combustível consumido era feito pela diferença de volume entre os abastecimentos completos realizados no início do dia e ao término da jornada de trabalho. Os resultados do ensaio de campo foram agrupados em cinco seções, a saber:

- a) índices do conjunto trator-enleiradora de palhiço;
- b) índices do conjunto trator-enfardadora;
- c) índices do conjunto trator-recolhedor de fardos;
- d) índices do carregamento, transporte e impureza mineral dos fardos;
- e) índices do palhiço.

Para os índices dos conjuntos trator-enleiradora e trator-enfardadora foram utilizadas as mesmas metodologias do ensaio de enfardamento com carregamento de fardos em caminhão.

Para os índices relativos ao carregamento, transporte e impureza mineral nos fardos utilizou-se a mesma metodologia para os cálculos, porém a retirada de amostras de impurezas foi realizada no campo, utilizando amostrador manual, tipo trado (Figura 5.32).



FIGURA 5.32 – Retirada de amostra para realização do ensaio de impurezas e umidade no fardo.

Para a medição do palhiço remanescente sobre o solo houve mudança da metodologia. Mediu-se inicialmente o total de palhiço disponível no campo, por amostragem e, como levantou-se o total de palhiço enviado à usina no formato de fardos, o palhiço sobre o solo foi obtido por diferença entre as medições.

5.1.3.1 Índices do Conjunto Trator-recolhedor de Fardos

Os índices do conjunto trator-recolhedor de fardos foram levantados de maneira similar ao dos conjuntos trator-enleirador e trator-enfardadora apresentados no ensaio anterior. Utilizando uma planilha específica em que as operações eram registradas, foi feito o acompanhamento contínuo das atividades realizadas pelo conjunto. O Quadro 5.3 apresenta as atividades registradas.

QUADRO 5.3 – Descrição dos eventos apontados para a operação de recolhimento de fardos.

Código	Atividade	Descrição
1	Carregamento	Carregamento de fardos, o que inclui a coleta do fardo, acomodação na plataforma pequena e transferência para a plataforma grande. O início do carregamento foi padronizado no instante em que o primeiro fardo é coletado pela pinça hidráulica.
2	Manobra de cabeceira	Manobra executada no carreador no final da área de recolhimento para reposicionamento do conjunto trator implemento para formação de uma nova linha de fardos.
3	Deslocamento vazio	Deslocamento do conjunto trator-recolhedor do ponto de basculamento dos fardos junto ao carreador até o instante em que o primeiro fardo é coletado.
4	Deslocamento carregado	Deslocamento do conjunto trator-recolhedor desde o ponto onde foi coletado o último fardo a completar a plataforma de carga até o ponto de basculamento.
5	Descarga no carreador	Tempo decorrido para que o conjunto trator-recolhedor possa acomodar os fardos junto ao carreador. Inclui manobra, basculamento e reposicionamento da plataforma.
6	Abastecimento/Lubrificação	Abastecimento de diesel e lubrificação de partes móveis.
7	Reparo Mecânico	Manutenção corretiva eventual
8	Administrativo	Tempo do conjunto trator-recolhedor de fardos parado devido a paradas para refeições, trocas de turno, preenchimento de relatório, etc.
9	Queda de fardo	Coleta e acomodação de fardo nas plataformas do implemento recolhedor

Analogamente aos ensaios anteriores, os tempos registrados na atividade de carregamento correspondem ao período no qual o equipamento encontrava-se efetivamente em operação, ou seja, o tempo de produção do conjunto trator-recolhedor de fardos (TPRrf).

Da mesma maneira, o tempo máquina do conjunto trator-recolhedor (TMrf) corresponde ao total de tempo registrado para todas as atividades apontadas. Assim, para compor os índices relativos ao recolhimento dos fardos, uma série de dados foi registrada.

- i) TPRrf = Tempo de produção do recolhedor de fardos, [h];
- ii) TMrf = Tempo máquina do recolhedor de fardos, [h];
- iii) Lrf = Combustível consumido pelo conjunto trator-recolhedor, [L].

Com os dados de transporte dos fardos para a usina foi possível fazer o registro das capacidades de campo e do consumo de combustível do conjunto trator-recolhedor de fardos. Os índices calculados foram: capacidade de campo efetiva (Equação 5.37); capacidade de campo operacional (Equação 5.38); consumo específico de combustível por fardo (Equação 5.39) e por hectare trabalhado (Equação 5.40).

$$CC_{Erf} = \frac{AT}{TPR_{rf}} \quad (\text{Equação 5.37})$$

Onde

CC_{Erf} = Capacidade de campo efetiva do recolhedor de fardos, [ha.h⁻¹].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

TPR_{rf} = Tempo de produção do recolhedor de fardos, [h].

$$CC_{Orf} = \frac{AT}{TM_{rf}} \quad (\text{Equação 5.38})$$

Onde:

CC_{Orf} = Capacidade de campo operacional do recolhedor de fardos, [ha.h⁻¹].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

TM_{rf} = Tempo máquina do recolhedor de fardos, [h].

$$CE_{Frf} = \frac{L_{rf}}{QFT} \quad (\text{Equação 5.39})$$

Onde:

CE_{Frf} = Consumo de combustível do recolhedor por fardo, [L.fardo⁻¹].

L_{rf} = Combustível consumido pelo recolhedor de fardos, [L].

QFT = Quantidade total de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

$$CE_{Erf} = \frac{L_{rf}}{AT} \quad (\text{Equação 5.40})$$

Onde:

CE_{Erf} = Consumo de combustível do recolhedor de fardos por hectare, [L.ha⁻¹].

L_{rf} = Combustível consumido pelo recolhedor de fardos, [L].

AT = Área total de recolhimento de fardos, [ha].

Também foram calculados índices de capacidades de produção para o conjunto trator-recolhedor de fardos, mensurados em função do trabalho produzido, neste caso mensurado em fardos. Os índices calculados para o conjunto trator-recolhedor de fardos foram: capacidade de produção efetiva (Equação 5.41) e capacidade de produção operacional (Equação 5.42).

$$CPErf = \frac{MMF * QFT}{TPRrf * 1000} \quad (\text{Equação 5.41})$$

Onde:

CPErf = Capacidade de produção efetiva do recolhedor de fardos, [t.h⁻¹].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

TPRrf = Tempo de produção do recolhedor de fardos, [h].

$$CPOrf = \frac{MMF * QFT}{TMrf * 1000} \quad (\text{Equação 5.42})$$

Onde:

CPOrf = Capacidade de produção operacional do recolhedor de fardos, [t.h⁻¹].

MMF = Massa média do fardo, [kg].

QFT = Quantidade de fardos produzidos no ensaio, [fardos].

TMrf = Tempo máquina do recolhedor de fardos, [h].

As capacidades de produção também podem ser expressas em fardos por hora. Para isso, basta dividir os índices pela massa média dos fardos (MMF).

5.1.3.2 Índices do Palhão

A mensuração do palhão remanescente sobre o solo utilizou o mesmo procedimento do ensaio anterior, porém, foi realizada antecipadamente ao recolhimento da biomassa, com o intuito de levantar a produção total de palhão inicialmente disponível na área (PTP).

Outra alteração do ensaio foi a área para a coleta do palhão, que foi modificada para uma área de 1m². A redução da área de coleta foi motivada pela uniformidade da distribuição do palhão sobre o solo, observada em levantamentos piloto, e pela possibilidade de levantamento de uma quantidade maior de pontos amostrais no período

do ensaio. Posteriormente, o palhiço remanescente sobre o solo foi calculado por diferença em relação à biomassa que foi enviada à usina no formato de fardos.

O palhiço foi coletado dentro da área, sendo pesado em balança com escala de $\pm 5g$, para obter a quantidade de biomassa resultante por hectare. De cada amostra foi retirado material para determinação da umidade em laboratório (U_p). A produção total de palhiço disponível sobre o solo, em base úmida (b.u.) pode ser obtido pela Equação 5.43.

$$PTPU = Pa * 10 \quad (\text{Equação 5.43})$$

Onde:

PTPU = Produção total de palhiço em base úmida, [$t \cdot ha^{-1}$].

Pa = Palhiço coletado na amostra, [kg].

Para a conversão em base seca, é necessário descontar a umidade calculada com as amostras levantadas no campo, por meio da Equação 5.44

$$PTPS = PTPU * (1 - U_p) \quad (\text{Equação 5.44})$$

Onde:

PTPS = Produção total de palhiço em base seca, [$t \cdot ha^{-1}$].

PTPU = Produção total de palhiço em base úmida, [$t \cdot ha^{-1}$].

U_p = Umidade do palhiço disponível no campo, [%].

A quantidade total de palhiço enfardado, em $t \cdot ha^{-1}$, que foi enviado à usina (base úmida) é dada em função da quantidade de fardos produzidos por hectare (QFA) e da massa média do fardo (MMF), como apresentado na Equação 5.34. Para a conversão em base seca utiliza-se o mesmo cálculo apresentado na Equação 5.35.

Dessa maneira, a quantidade de palhiço remanescente sobre o solo (PRS) pode ser calculada por diferença, com as produções de palhiço dadas em base seca. Da mesma forma que o ensaio anterior, com carregamento diretamente nos caminhões, pode-se calcular a eficiência de enfardamento do sistema utilizando-se a Equação 5.36.

5.2 Modelagem e Simulação

A simulação dos sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar, com aproveitamento da biomassa, foi modelada utilizando o *software Arena*, versão 10.0, escolhido por se dispor de acesso a uma cópia do mesmo e pelo conhecimento do autor na modelagem de processos com o *software*.

Um único modelo de simulação, parametrizado, com interface com planilhas eletrônicas para inserção e exportação de dados foi elaborado. Modificando-se a planilha de entrada de dados, pode-se elaborar cenários de interesse, atribuindo valores para parâmetros relativos à moagem, frentes de corte e carregamento, sistemas de colheita e transporte de cana e sistemas de manuseio e transporte da biomassa. Os cenários são simulados e podem ser analisados e comparados entre si por meio dos resultados que são apresentados em planilhas eletrônicas pré-configuradas, subsidiando novas simulações.

O limite e a extensão das operações representadas pelo modelo de simulação abrangem o processamento da cana-de-açúcar no campo, sua movimentação até a usina (operações de corte, carregamento e transporte - CCT) e, também, a recuperação da biomassa no campo e sua disponibilização na indústria. Nos sistemas que contemplam o palhiço no formato de fardos, a operação limite é a entrega para trituração de fardos, enquanto nos sistemas em que o palhiço é recebido junto com a cana, a operação limite é a entrega da cana e do palhiço na estação de limpeza a seco.

Para a avaliação comparativa dos sistemas de colheita de cana e aproveitamento de palhiço, as simulações foram parametrizadas para uma usina com moagem de 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra. Dois casos foram destacados para estudo com intuito de testar a aplicabilidade do modelo desenvolvido:

A) Comparação dos sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa, configurados a partir das condições operacionais observadas nos ensaios de campo:

A1) colheita com limpeza convencional, com recuperação da biomassa via enfardamento e carregamento de fardos diretamente em caminhões prancha;

A2) colheita com limpeza convencional, com recuperação da biomassa via enfardamento, com transbordo interno de fardos e carregamento dos fardos em pentaminhões ao lado da área de recolhimento;

A3) colheita com limpeza parcial, com transporte de cana e palhiço juntos em rodotrens e separação do palhiço na usina;

B) Comparação de sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa em igualdade de condições operacionais.

B1) colheita com limpeza convencional, com recuperação da biomassa via enfardamento e carregamento de fardos diretamente em rodotrens;

B2) colheita com limpeza convencional, com recuperação da biomassa via enfardamento, com transbordo interno de fardos e carregamento de fardos em rodotrens ao lado da área de recolhimento;

B3) colheita com limpeza parcial, com transporte de cana e palhiço juntos em rodotrens e separação do palhiço na usina.

No caso B efetuou-se a comparação dos três cenários em igualdade de condições operacionais, uma vez que parâmetros como produtividade de cana-de-açúcar e palhiço, eficiência de recolhimento de palhiço, capacidades operacionais da enleiradora e da enfardadora apresentaram valores diferentes nos ensaios de campo. Para estes parâmetros foram utilizados dados de literatura, além de dados obtidos dos próprios ensaios de campo.

5.2.1 Premissas do modelo de simulação

O porte das usinas de açúcar e álcool geralmente é mensurado em função de sua capacidade de moagem no período de safra. Na simulação de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar, a moagem é a informação que irá condicionar todas as operações a montante, que idealmente deverão estar alinhadas para que a usina seja continuamente abastecida ao longo de todo o período da safra.

O sistema de recolhimento de palhiço possui interface com o sistema de colheita de cana, pois, dependendo do conjunto de operações escolhidas, cana e palhiço podem ser recebidos juntos na usina (colheita integral ou colheita com limpeza parcial) ou, ainda, o palhiço pode estar disponibilizado com defasagem de uma semana a quinze dias após a colheita da cana (colheita com limpeza convencional e posterior recolhimento do palhiço enfardado). Tal fato ressalta a importância de considerar a integração dos dois sistemas.

O sistema em estudo é classificado como não terminal, uma vez que dentro do período da safra não apresenta condições iniciais fixas, que voltam a ser assumidas novamente no início de cada rodada de simulação, assim como também não possui um evento que determina um fim natural para a simulação (FREITAS FILHO, 2001). Exemplos de

sistemas não terminais são serviços que operam 24 horas, como hospitais e sistemas de comunicação. Para os sistemas não terminais, as análises de desempenho devem ocorrer quando o sistema está em regime, ou seja, quando as variáveis de estado não sofrem mais a ação ou dependência do período transiente inicial, enquanto o sistema ainda procura se estabilizar. Assim, após a remoção da fase transiente, deseja-se avaliar o sistema por um longo período, pois não existe nenhuma condição definida que indique o término da simulação. (FREITAS FILHO, 2001).

A partir das características expostas, ao lidar com sistemas não terminais, é necessário determinar dois parâmetros importantes: a duração do período transiente no início da simulação (tempo de *warm-up*) e a duração do período de simulação. Tais parâmetros foram obtidos por meio do aplicativo *Output Analyzer* do *software* de simulação *Arena*.

A duração do período transiente foi avaliada em função do comportamento de uma variável de referência do modelo (variável de resposta), que neste estudo foi o tempo de permanência dos caminhões de cana na usina. Este índice foi escolhido por agrupar registros de todos os veículos canavieiros a cada ciclo de transporte, independente da frente de corte, o que permite gerar dados com grande frequência. Utilizou-se a média móvel para esta avaliação, sendo o instante de corte dado por observação visual, a partir do qual o comportamento da variável de referência se estabilizou.

A duração do período de simulação foi obtida utilizando-se o método do loteamento. A partir de uma simulação longa, já com a fase transiente inicial descartada, o método considerou o agrupamento dos registros de uma variável de resposta em vários lotes independentes. O tempo de permanência do caminhão de cana na usina também foi utilizado como variável de resposta. Neste método, o tamanho do lote deve ser longo o suficiente para que a correlação entre as médias de cada lote sucessivo seja muito pequena, o que pode ser medida por sua covariância. (FREITAS FILHO, 2001).

A partir da média e da variância formada pelas amostras dos lotes, é possível determinar o intervalo de confiança no entorno da média da variável de resposta. Caso o intervalo de confiança obtido contenha os limites desejados para a variável de resposta, aceita-se o período simulado, caso contrário, aumenta-se o período simulado para se obter uma maior amostragem (maior quantidade de lotes).

Uma vez que o modelo de simulação contempla os dois sistemas, de colheita de cana e de aproveitamento de palhiço, foi necessário adotar valores para vários parâmetros como as produtividades de cana-de-açúcar e de palhiço por hectare, tempos operacionais, tempos de manutenção e dados gerais (distâncias médias, cargas transportadas, etc.) dentre

outros. Estes valores foram obtidos nos ensaios de campo e em dados de literatura, além de outras informações adotadas como premissa. Ressalta-se que tais dados constituem parâmetros que podem ser modificados caso haja interesse de se avaliar outros cenários, uma vez que o modelo é flexível. No modelo de simulação elaborado são consideradas premissas de acordo com o tipo de sistema:

- Sistema de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar;
- Sistema de recolhimento de palhiço.

5.2.1.1 Sistemas de Corte, Carregamento e Transporte de Cana-de-açúcar

Moagem: Foi considerada a moagem de 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, considerada uma referência em estudos do setor. O desdobramento dessa premissa representa um processamento diário de 12.000 t de cana e 500 t.h^{-1} de moagem por hora, e indica uma safra com 167 dias efetivos de moagem. Uma vez que a moagem nominal representa um valor médio, foi adicionado um percentual de 5% à capacidade de processamento, ou seja, uma moagem de 525 t.h^{-1} . O estudo contemplou os dias de forma corrida, sem interrupções, por constituir um cenário de pior caso em termos de necessidade de infraestrutura, onde os equipamentos e suas políticas operacionais devem atender o processamento ininterrupto. Na simulação dos cenários com limpeza parcial, adotou-se a eficiência de separação de palhiço da estação de limpeza a seco de 50%, valor informado pelo CTC, que executa projetos desse tipo de instalação.

Linhas de moenda e pontos de descarga: A linha de moenda foi modelada com abastecimento a partir de dois pontos de descarga de caminhões, que podem receber compartimentos de carga (reboques e semirreboques) de todas as configurações.

Frentes de corte e carregamento: Seis frentes de corte e carregamento de cana-de-açúcar foram previstas na elaboração do modelo, das quais apenas quatro foram utilizadas neste estudo, uma vez que o processamento de 3.000 t.dia^{-1} por frente constitui um valor médio de boa referência. As demais frentes poderão ser utilizadas para estudos futuros de expansão da moagem. As quatro frentes foram alocadas com distâncias médias em relação à usina de 15, 20, 20 e 25 km, respectivamente, que se equilibram em 20 km, que constitui uma referência de distância média ponderada em estudo do setor sucroalcooleiro.

Regime de turnos: As frentes operam 24 horas por dia, em regime de três turnos de oito horas, com trocas as 7:00, 15:00 e 23:00 hs. Para a operação de transporte, as trocas são realizadas na usina em função do horário. Considera-se que o veículo poderá sair para mais uma viagem até o limite de meia hora antes de concluir o horário de seu turno. A troca de turno dos operadores de máquinas ocorre diretamente no campo.

Paradas para refeição: Para os equipamentos de CCT, considerou-se uma hora de parada para refeição por turno, com escalonamento de horários entre os operadores para que as atividades das frentes de corte não sejam totalmente interrompidas. Em uma mesma frente, até o máximo de 50% dos operadores/motoristas de um mesmo tipo de equipamento pode parar simultaneamente. Para os veículos, os horários das refeições serão verificados na saída da usina e na chegada dos veículos no campo.

Sistema de colheita: Em cada frente de corte e carregamento foram previstas até oito colhedoras que podem ser utilizadas na simulação. Nos estudos realizados neste trabalho, considerou-se 5 colhedoras por frente, que processam a cana e a direcionam para os transbordos, à razão de dois conjuntos por colhedora. Cada conjunto de transbordo é composto por um trator que traciona dois transbordos.

Sistema de transporte: O modelo foi elaborado para contemplar diferentes composições de transporte. Nas simulações foi considerado o sistema de transporte de cana em rodotrens, por ser uma composição de alta capacidade volumétrica e com a maior capacidade de transporte permitida segundo a legislação de transporte (PBTC). Cada rodotrem recebe a carga relativa a oito transbordos e na operação foi considerado o sistema de bate e volta, tanto no campo como na usina. Na usina e em cada frente de corte foi previsto um conjunto reserva por frente. O ponto de bate e volta na usina foi localizado após a pesagem e sondagem do veículo carregado e antes da descarga na moenda. Adicionalmente, na usina foram considerados dois tratores por ponto de descarga para fazer a movimentação dos semirreboques entre o ponto de engate e desengate (pátio sobre rodas) e os pontos de descarga. Nos estudos, foram utilizados os valores das cargas transportadas dos veículos obtidos nos ensaios de campo.

Operações nas frentes de carregamento: Foram previstas as operações abaixo, conforme o equipamento.

Colhedora: tempo de colheita.

Trator/caminhão transbordo: tempos de deslocamento vazio; colheita; deslocamento carregado, transferência de carga para o caminhão.

Veículo: tempos de desengate de carretas; transferência de carga; engate de carretas; preparação para saída do campo (checagem de pneus, lâmpadas e chicotes elétricos).

Os tempos operacionais de colheita foram obtidos a partir dos levantamentos efetuados nos ensaios de campo, variando conforme o cenário simulado, ou seja, colheita com limpeza convencional e colheita com limpeza parcial. As curvas que representaram a operação de colheita são apresentadas no capítulo 6. Os demais tempos operacionais foram obtidos a partir do estudo de Silva, Alves e Costa (2011) e são resumidos no ANEXO K.

Operações na usina: Foram contempladas as operações de pesagem de caminhões (peso bruto); sondagem de caminhões (retirada de amostras); desengate de carretas (reboques e semirreboques); descarga de caminhões e carretas; engate de carretas e pesagem de caminhões vazios (peso tara). Os tempos considerados para estas operações também foram obtidos por Silva, Alves e Costa (2011), que constam do ANEXO K.

Manutenções: Foram consideradas manutenções para os equipamentos de CCT, utilizando dados de Silva, Alves e Costa (2011), apresentados no ANEXO L, conforme indicado abaixo. Cada manutenção foi modelada utilizando duas distribuições de probabilidade que representam os tempos entre manutenções (MTBF: *Mean Time Between Failures*) e os tempos de reparo (*Mean Time To Repair*):

Colhedora: abastecimento; lubrificação; troca de facas; manutenção no campo e manutenção na oficina.

Trator-transbordo: abastecimento; manutenção no campo e manutenção na oficina.

Veículos: abastecimento; lavagem e lubrificação; manutenção no campo e manutenção na oficina.

5.2.1.2 Sistema de Recolhimento de Biomassa

Os sistemas de colheita integral e de colheita com limpeza parcial consideram a realização das operações no campo em conjunto para a cana e o palhiço, com posterior separação dos materiais na área industrial por meio da estação de limpeza a seco. Portanto, esses sistemas não possuem operações adicionais para o recolhimento da biomassa além das próprias operações de CCT, com as devidas conseqüências do processamento em conjunto dos dois materiais.

Já os sistemas de recuperação de biomassa que resultam da colheita com limpeza convencional são regulados pela liberação das áreas após o prazo de 7 a 15 dias da colheita. Este prazo corresponde ao tempo necessário para que a umidade do palhiço seja reduzida. Na simulação, adotou-se a premissa de que as áreas pudessem estar liberadas para o recolhimento da biomassa no prazo de 10 dias após a colheita.

As operações que lidam com o recolhimento do palhiço são mensuradas diferentemente das operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. No sistema de CCT, a unidade de referência é dada em toneladas processadas; já nas operações de enleiramento e enfardamento do palhiço, a unidade é dada em termos de hectares processados. Dessa maneira, a largura de trabalho dos implementos (enleiradora e enfardadora) e as capacidades de campo dos conjuntos trator-implemento foram mantidas como parâmetros passíveis de configuração. Nas simulações do sistema de colheita de cana e aproveitamento da biomassa, os dados utilizados foram os obtidos nos ensaios de campo no estudo do caso A e em dados de bibliografia, complementados com dados de ensaios de campo, no estudo do caso B.

Frentes de enfardamento: A existência de uma frente de enfardamento associada a cada frente de CCT foi adotada como premissa. As frentes de enfardamento podem ser configuradas em uma série de opções: realização ou não de enleiramento prévio ao enfardamento, uso ou não de transbordo interno de fardos, quantidade de palhiço disponível sobre o solo para recolhimento, largura de trabalho de equipamentos, eficiência de recolhimento de palhiço (decorrente do sistema enleiramento + enfardamento), capacidades de campo de equipamentos e opções diferentes de veículos para o transporte de fardos.

Regime de turnos: Considerou-se que as operações de enleiramento e enfardamento terão suas operações realizadas apenas no período diurno e no início da noite, em dois turnos de trabalho de 6 horas, das 8:00 às 20:00 hs, com início de turno às 8:00 hs e às 14:00 hs. O recolhimento (transbordo interno), o carregamento e o transporte de fardos são realizados 24 horas por dia, em sistema de três turnos de oito horas, nos mesmos horários que as operações de CCT, com trocas as 7:00, 15:00 e 23:00 hs.

Paradas para refeição: Semelhante aos equipamentos de CCT, foi considerado um intervalo de uma hora de parada para refeição por turno para as operações no campo, com escalonamento de horários dos operadores para que as operações não sejam totalmente interrompidas. Para os caminhões, as refeições são verificadas na saída da usina e na chegada dos veículos no campo.

Sistema de transporte de fardos: O modelo de permite o uso de todas as composições de transporte de fardos (caminhão prancha, rodotrens, treminhões, tetraminhões e pentaminhões), mediante indicação da quantidade de fardos transportados por viagem e se o carregamento ocorre diretamente no campo ou na lateral do carreador (opção de transbordo interno). A quantidade de fardos transportados por viagem para as composições de transporte previstas no modelo de simulação é dada na Tabela 5.1 abaixo.

TABELA 5.1 – Quantidade de fardos transportados por viagem conforme composição de transporte.

	Tipo de composição				
	Caminhão Prancha	Rodotrem	Treminhão	Tetraminhão	Pentaminhão
Fardos transportados por viagem	49	60	54	72	90

Nas simulações efetuadas, considerou-se sempre a alocação de um veículo por frente de enfardamento. Visando dinamizar o sistema de transporte de fardos, foi contemplada a realização da operação de “bate e volta” de veículos, tanto no campo quanto na usina. Para tanto, em todos os cenários foi alocado um conjunto reserva de carrocerias por frente de enfardamento no campo e mais um conjunto reserva por frente de enfardamento na usina.

Operações nas frentes de enfardamento: Foram consideradas as operações abaixo, por tipo de equipamento:

Conjunto trator-enleiradora de palhiço: enleiramento.

Conjunto trator-enfardadora de palhiço: enfardamento.

Conjunto trator-recolhedor de fardos: ciclo de carregamento

Carregadora: carregamento de fardos

Veículo: carregamento de fardos.

Os dados para a simulação destas operações foram mensurados diretamente nos ensaios de campo, por meio das capacidades de campo dos conjuntos trator-enleiradora e trator-enfardadora. A operação de recolhimento de fardos (transbordo interno) teve os tempos de recolhimento e de descarregamento mensurados, sendo estas operações consideradas por meio de distribuições teóricas de probabilidade. As simulações consideraram frentes de enfardamento compostas por um equipamento de cada tipo, sendo que as operações de enleiramento e enfardamento do palhiço foram programadas para ocorrer apenas durante o dia, em regime de dois turnos. O tempo de carregamento de fardos nos veículos foi medido por fardo, também a partir dos ensaios de campo. Nas simulações considerou-se sempre a realização da operação de enleiramento de palhiço previamente ao enfardamento.

Operações na usina: O ciclo de operações dos veículos na usina foi previsto pelas atividades de pesagem de caminhões (peso bruto), descarga de fardos e pesagem de caminhões vazios (peso tara). Para a simulação destas operações considerou-se os mesmos tempos dos veículos canavieiros. Para o descarregamento de fardos, definiu-se dois pontos de descarga e adotou-se o tempo de carregamento registrado nos ensaios de campo, por fardo.

Manutenções: Foram consideradas manutenções para os equipamentos de manuseio de fardos: conjuntos trator-enleiradora, trator-enfardadora e trator-recolhedor de fardos a partir de dados de Silva, Alves e Costa (2011). Uma vez que estes equipamentos são tratores com implementos montados, utilizou-se como referência as manutenções das carregadoras de cana inteira. As manutenções consideradas foram o abastecimento de combustível e as manutenções no campo, apresentadas no ANEXO L.

Para os caminhões de transporte de fardos considerou-se as mesmas manutenções dos veículos canavieiros.

5.2.2 Descrição do Modelo de Simulação

O modelo de simulação que representa os sistemas de colheita de cana com aproveitamento do palhiço foi elaborado em duas partes distintas:

- Lógica, que contempla a programação das operações, e representa os processos de colheita de cana e aproveitamento da biomassa;
- Animação, onde por meio de uma interface gráfica é possível acompanhar a dinâmica de funcionamento do modelo, enquanto este é executado.

A Figura 5.33 apresenta a distinção das partes referentes à lógica e à animação:

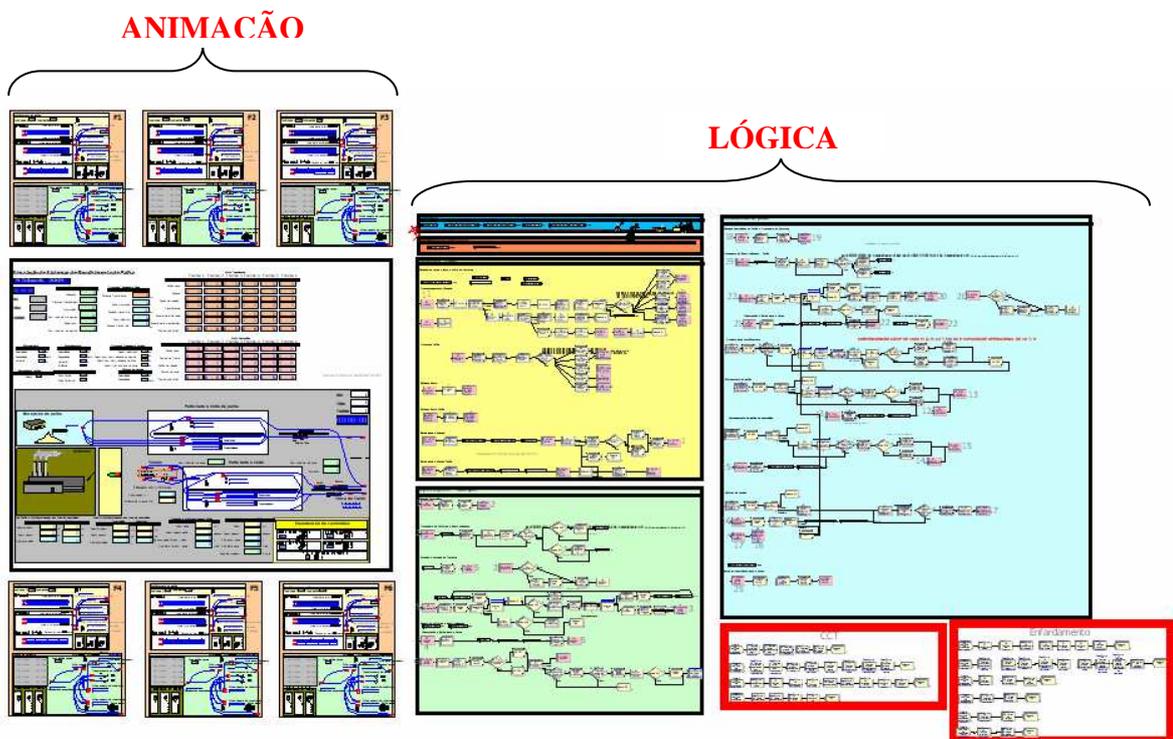


FIGURA 5.33 – Modelo de simulação com distinção da parte lógica e da parte de animação.

A parte lógica do modelo, constituída por fluxogramas de programação, foi dividida em blocos identificados por cores, conforme os grupos de operações que estão sendo representados, para facilitar a identificação na fase de modelagem (Figura 5.33):

- Bloco em amarelo: Operações na área industrial;
- Bloco em verde: Operações de corte, carregamento e transporte de cana;
- Bloco em azul: Operações de recolhimento do palhiço;
- Blocos em branco: Interface para a importação e exportação de dados.

5.2.2.1 Descrição da Lógica do Modelo de Simulação

A Figura 5.34 apresenta o fluxograma das operações referentes à área industrial, onde as entidades que percorrem os processos são os veículos de transporte de cana e os veículos de transporte de fardos (fluxos em linha cheia); e os tratores que executam a movimentação das carretas (reboques e semirreboques) entre o ponto de bate e volta e os pontos de descarga (fluxos em linha tracejada). Os recursos que processam as entidades são as balanças de pesagem, a sonda de amostragem, engatadores e desengatadores de carretas e os pontos de descarga.

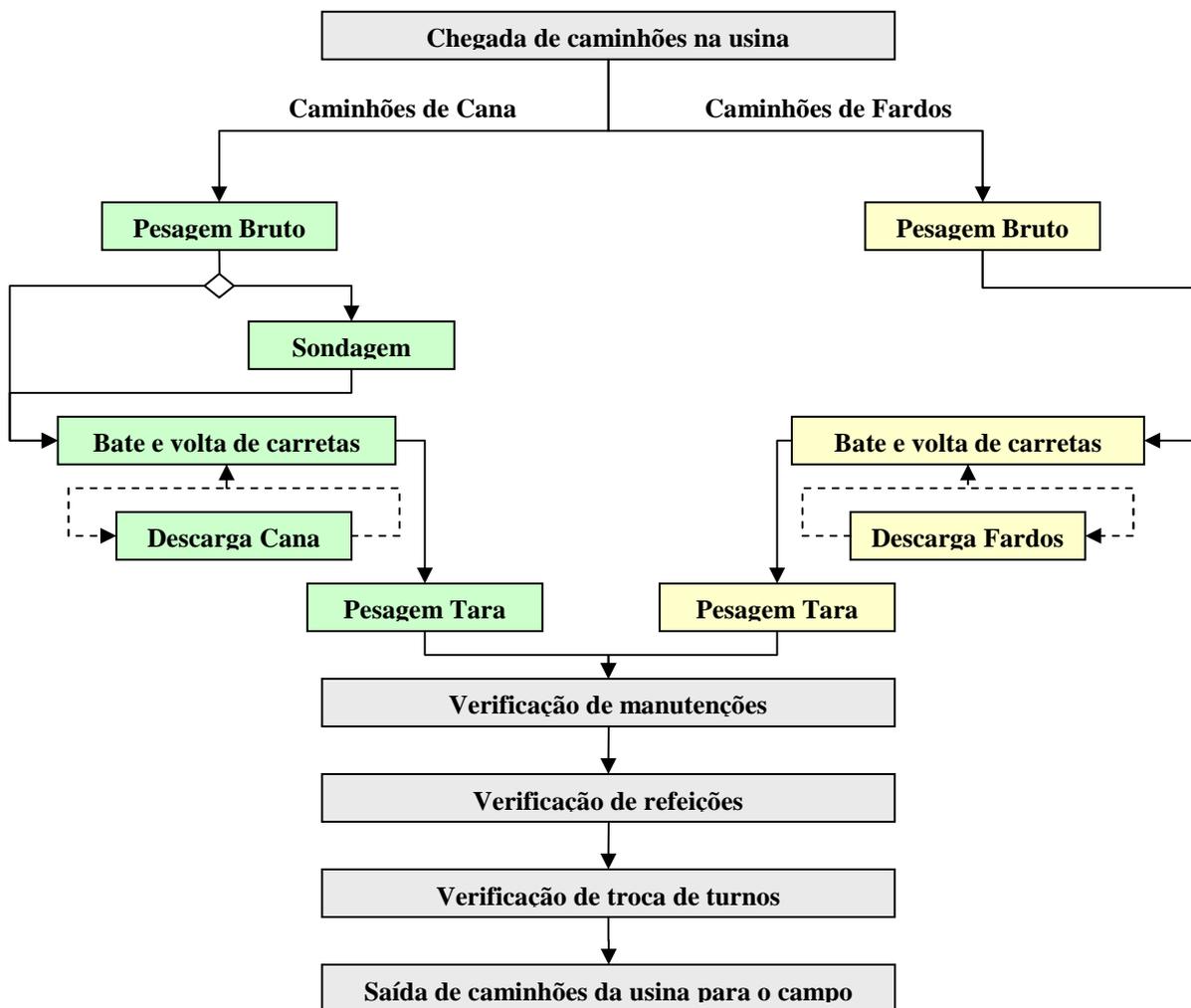


FIGURA 5.34 – Fluxograma das operações na área industrial.

A partir da chegada dos veículos na usina e do registro das informações da viagem do veículo carregado, considerou-se a separação dos processos conforme o material transportado (cana ou fardos). Modelou-se a pesagem dos veículos canavieiros e dos veículos com fardos de palhiço em balanças distintas.

Dos veículos canavieiros, após a pesagem, 30% são direcionados para amostragem na sonda e todos os demais seguem para o ponto de bate e volta de carretas. Nestes pontos, os veículos deixam as carretas carregadas e engatam um conjunto de carretas vazias. Por sua vez, as carretas carregadas são atreladas a tratores cuja função exclusiva é a movimentação das mesmas entre o ponto de bate e volta e os pontos de descarga.

Após a troca de carretas e o registro da tara, as verificações são realizadas em série em todos os veículos antes do retorno ao campo para mais um ciclo. São verificadas se manutenções devem ser executadas, se é necessária a interrupção da operação de transporte para cumprir o horário das refeições e ainda se é necessário aguardar a troca de turno.

Ao longo da simulação do sistema, registros de tempo de uso são acumulados para cada entidade e para cada tipo de manutenção. As verificações de manutenção então comparam os registros acumulados de tempo das entidades com os dados históricos das manutenções, representados no modelo por distribuições de probabilidade que estabelecem o intervalo entre as manutenções. O fluxo da entidade é então interrompido caso tenha atingido o momento de realização de alguma manutenção. A duração da interrupção também é baseada em distribuições de probabilidade, igualmente levantadas com base em dados históricos por tipo de manutenção. Tratam-se dos clássicos tempos MTTR (*Mean Time To Repair*) e MTBF (*Mean Time Between Failures*).

Já as verificações de horário de refeição e de trocas de turno são realizadas comparando-se o instante de passagem da entidade nestes módulos com as respectivas janelas de tempo configuradas na modelagem. Caso o período de interrupção tenha sido atingido, as entidades cumprem o horário de refeição e/ou aguardam o instante de início do novo turno, para em seguida retornar à sequência de operações.

Após as verificações de manutenções, refeições e turnos, os dados referentes aos tempos na usina são registrados e os veículos regressam ao campo para mais um ciclo.

A descrição das operações de corte carregamento e transporte (CCT) de cana-de-açúcar consideradas no modelo é sintetizada no fluxograma da Figura 5.35, onde as entidades circulantes são os veículos canavieiros (fluxos em linha cheia) e os tratores transbordo (fluxos em linha tracejada).

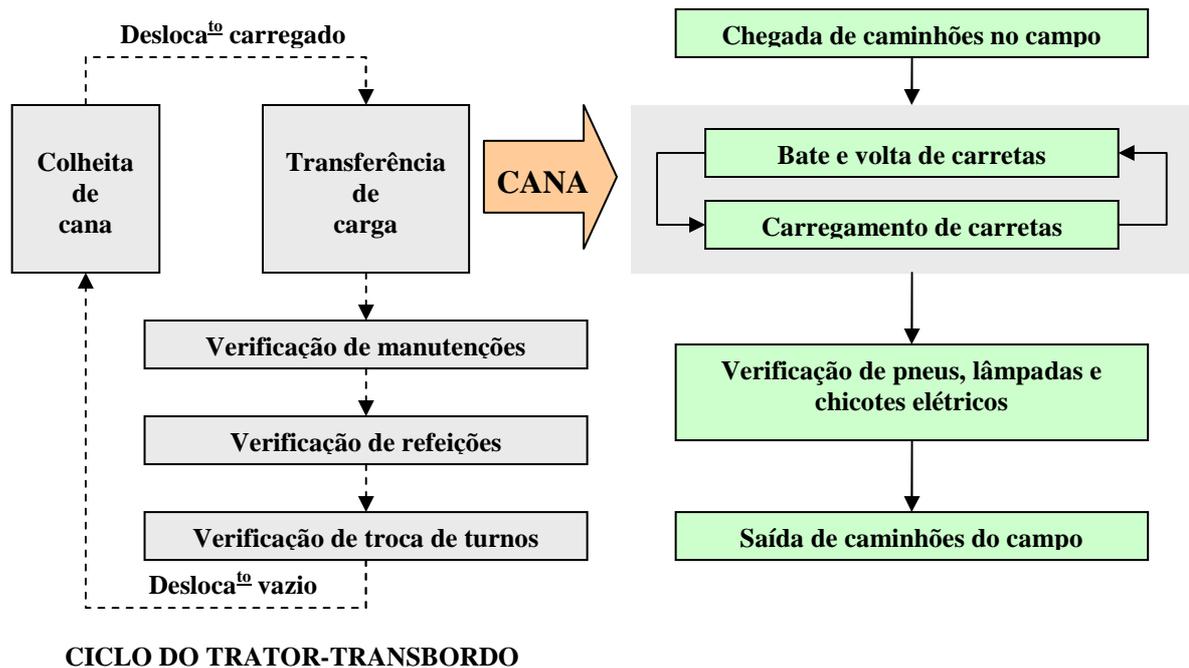


FIGURA 5.35 – Fluxograma das operações de CCT.

No modelo de simulação, após a chegada ao campo e registro das informações da viagem do veículo vazio, as carretas vazias são desengatadas no ponto de bate e volta e aguardam a transferência da carga de cana a partir dos tratores transbordo. Os veículos canavieiros por sua vez atrelam um conjunto de carretas carregadas, verificam pneus, lâmpadas e chicotes elétricos, registram as informações referentes às operações no campo e retornam à usina.

O processo de colheita foi modelado considerando o trator-transbordo como a entidade circulante entre as colhedoras e o ponto de transferência de carga. Em termos operacionais quatro atividades foram representadas: colheita, deslocamento carregado, transferência de carga e deslocamento vazio. A cada ciclo, após a transferência da cana para o caminhão, cada trator-transbordo é avaliado quanto à necessidade de manutenção, realização de refeições e trocas de turno da mesma maneira que os veículos canavieiros e de transporte de fardos.

As colhedoras por sua vez, são tratadas como recursos na simulação, que processam as entidades trator-transbordo e também estão sujeitas às interrupções, segundo regras modeladas de manutenção, refeições e troca de turno.

As operações de recolhimento de palhicho foram modeladas conforme indica esquematicamente a Figura 5.36. Estas operações estão subordinadas às operações de corte, carregamento e transporte de cana, pois dependem da liberação de área para início do recolhimento da biomassa. A defasagem de tempo ocorre em função do tempo de secagem do palhicho após a colheita, no caso, configurado como dez dias. Adicionalmente, as áreas para recolhimento de biomassa foram configuradas para liberação em áreas correspondentes a um dia de moagem da frente. Assim, o modelo registra cumulativamente a área liberada por frente de CCT pós secagem de 10 dias e a cada lote equivalente a um dia de moagem da frente, libera a área para recolhimento de palhicho.

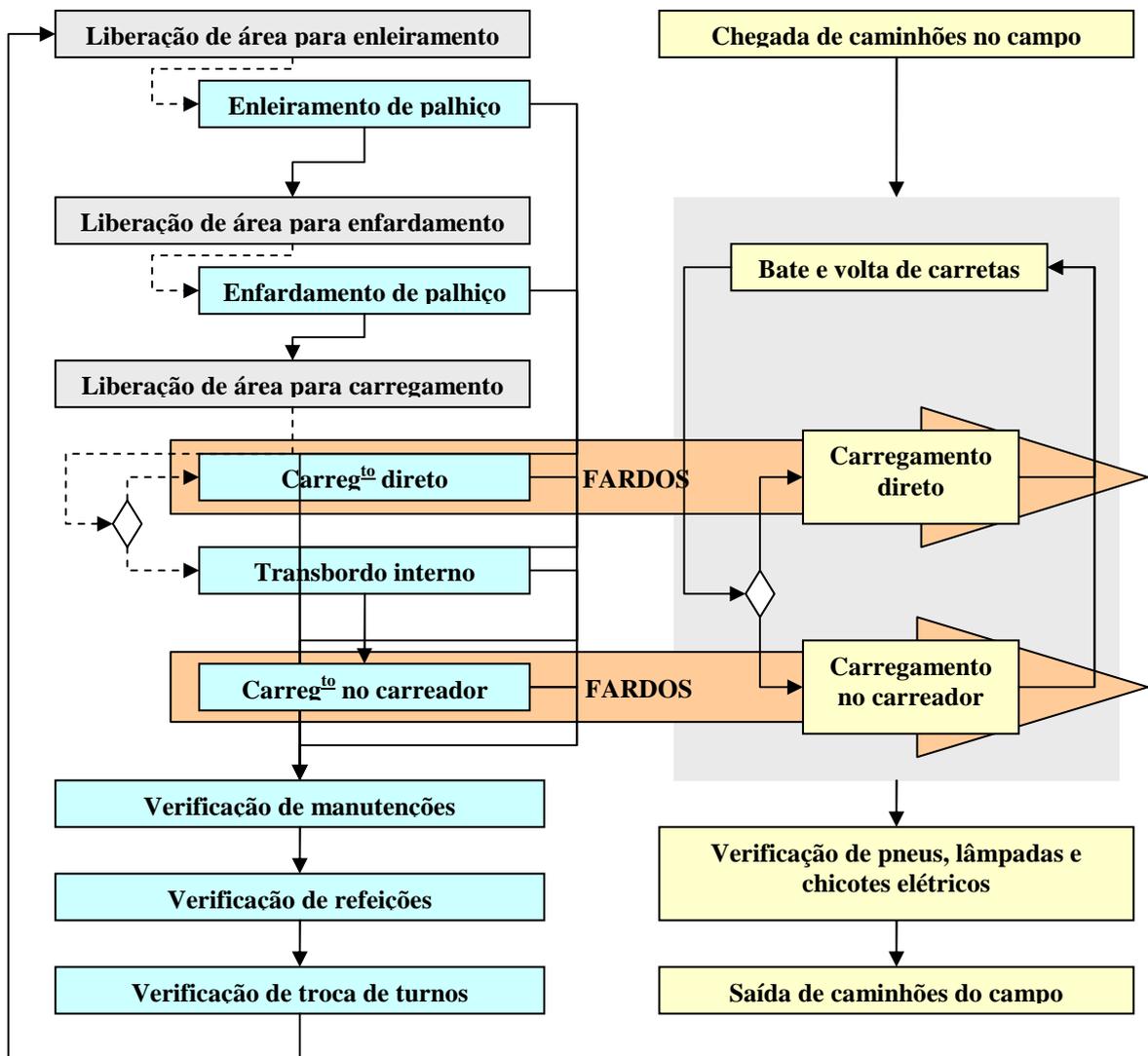


FIGURA 5.36 – Fluxograma das operações de recolhimento de palhicho.

Neste grupo de operações, as entidades que percorrem o modelo são as variáveis de controle (fluxos em linha tracejada), que executam as liberações de áreas para execução das operações subsequentes e os equipamentos de manuseio de palhiço (fluxos em linha cheia): conjuntos trator-enleiradora de palhiço, conjuntos trator-enfardadora, conjuntos trator-recolhedor de fardos, carregadoras e veículos de transporte de fardos. As setas largas indicam operação de carregamento dos fardos para os veículos, que podem ocorrer diretamente na área de recolhimento de palhiço ou na lateral do carreador, conforme configuração do modelo de simulação.

Com a liberação das áreas, após o período de secagem do palhiço, os conjuntos trator-enleiradora iniciam o processamento do palhiço formando leiras que serão posteriormente processadas pelas enfardadoras. Da mesma forma, ao gerar as leiras, o modelo sinaliza às enfardadoras a liberação da área a ser processada pelos conjuntos trator-enfardadora.

As áreas são processadas conforme os tempos operacionais dos equipamentos mensurados nos ensaios, em função de suas capacidades de campo e da largura de trabalho dos implementos. A partir dos tempos operacionais, da disponibilidade de palhiço por hectare, da eficiência de recolhimento dos conjuntos trator-enleiradora e trator-enfardadora, e da massa média dos fardos é possível obter a quantidade de fardos gerados por hectare, contabilizados de forma acumulada por frente de recolhimento de biomassa

Em cada frente, ao se produzir a quantidade de fardos necessária para uma carga do veículo e ao se ter carreta ou veículo disponível no campo, inicia-se a operação de carregamento, que, conforme parametrização do modelo, pode ocorrer diretamente na área de recolhimento ou na lateral desta, junto ao carreador. Após o carregamento de fardos, são registradas informações das operações na frente de recolhimento de palhiço e o veículo de transporte de fardos retorna para a usina, completando o ciclo.

Todos os equipamentos de manuseio de palhiço também estão sujeitos às verificações de manutenção, refeição e troca de turno da mesma maneira que os veículos canavieiros e equipamentos de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.

Por fim, as interfaces para importação e exportação de dados são acionadas no instante inicial e final da simulação, respectivamente. Ao acionar o modelo, são importadas informações a partir da planilha eletrônica referentes a:

- Sistema simulado e tempo de simulação;
- Produtividade de cana-de-açúcar e disponibilidade de palhiço por hectare;

- Taxa de moagem;
- Período de secagem do palhiço;
- Uso ou não de sistema de bate e volta no transporte de fardos e no transporte de cana-de-açúcar;
- Dados referentes ao enleiramento: uso ou não de enleiramento, quantidade de equipamentos, largura de trabalho e capacidade de campo;
- Quantidades de colhedoras, eficiência de limpeza das colhedoras e quantidade de tratores-transbordo;
- Quantidade de veículos canavieiros e equipamentos reserva por tipo de composição;
- Distâncias das frentes de CCT e do recolhimento de palhiço à usina;
- Cargas médias de cana transportadas por tipo de veículo;
- Dados referentes ao enfardamento: quantidades de equipamentos, largura de trabalho, capacidade de campo, massa média do fardo e umidade do fardo;
- Quantidades de veículos de transporte de fardos e quantidade de fardos transportados por tipo de composição;
- Dados referentes ao recolhedor de fardos: quantidade de equipamentos e de fardos transportados;
- Quantidade de carregadoras de fardos por frente;
- Percentual de palhiço na carga, em massa, do veículo canavieiro.

No momento do término da simulação são exportadas para a planilha eletrônica informações referentes a:

- Tempos de utilização, de ociosidade e de manutenção das colhedoras;
- Total de cana colhida;
- Tempos de utilização, de ociosidade e de manutenção dos tratores-transbordo;
- Tempos de ciclo médios dos tratores transbordo: deslocamento vazio, colheita, deslocamento carregado e transferência de carga;
- Quantidade de cana-de-açúcar e de palhiço transportados nos veículos canavieiros;

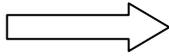
- Tempos de ciclo médios dos veículos canavieiros: deslocamento vazio, tempo na frente, deslocamento carregado e tempo na usina;
- Distância total percorrida e quantidade de viagens dos veículos canavieiros;
- Tempos de ciclo médios dos veículos de transporte de fardos: deslocamento vazio, tempo na frente, deslocamento carregado e tempo na usina;
- Distância total percorrida, quantidade de viagens, tempo de utilização e tempo de manutenção dos veículos de transporte de fardos;
- Resultados da operação das carregadoras: tempo de utilização, tempo em manutenção e total de fardos recolhidos;
- Resultados da operação dos conjuntos trator-enleiradora: tempo de utilização, tempo em manutenção e total de área trabalhada;
- Resultados da operação dos conjuntos trator-enfardadora: tempo de utilização, tempo em manutenção e total de área trabalhada;
- Resultados da operação do conjunto trator-recolhedor de fardos: tempo de utilização, tempo em manutenção e total de fardos coletados.

A validação do modelo de simulação quanto a representação das operações que compõem os sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa (interação entre equipamentos), aderentes aos sistemas reais, foi feita por meio de discussões com especialistas da área de mecanização agrícola do Centro de Tecnologia Canavieira. A validação do modelo foi feita gradativamente ao longo da própria construção do modelo, além da conferência feita em simulações piloto ao término de sua elaboração.

5.2.2.2 Descrição da Animação do Modelo de Simulação

Na parte de animação, destacou-se uma das seis frentes previstas de corte de cana com estrutura de recolhimento de palhicho anexa (Figura 5.37). A animação de cada frente possui uma parte que representa os processos de colheita de cana (operações de colheita, deslocamento de transbordos, transferência de carga, engate e desengate de semirreboques, etc.) e outra parte, que representa o processamento do palhicho (enleiramento, enfardamento, recolhimento de fardos, etc.).

OPERAÇÕES DE
RECOLHIMENTO
DE PALHIÇO



OPERAÇÕES DE
COLHEITA DE
CANA

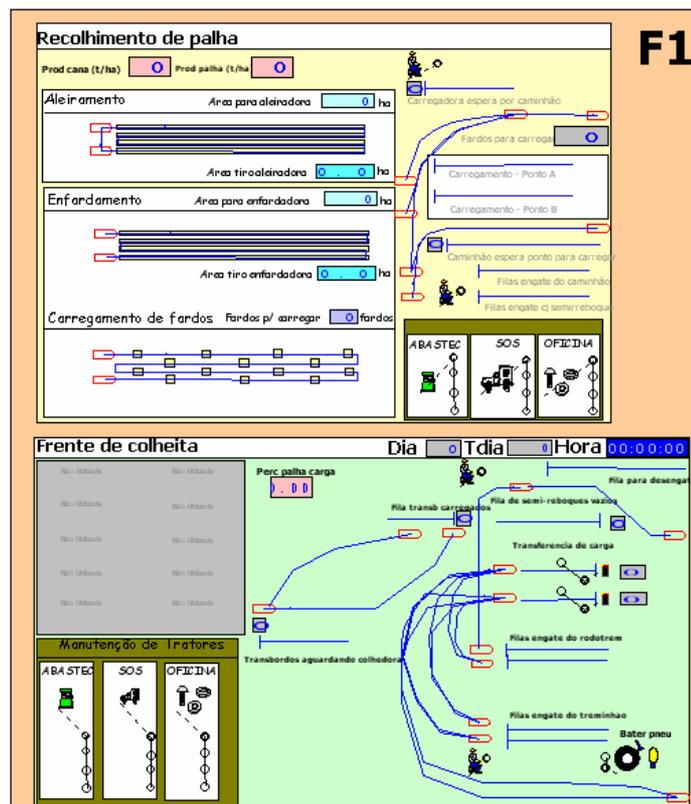
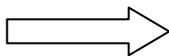


FIGURA 5.37 – Animação de uma frente de colheita de cana, com sistema de recuperação do palhão anexo.

São representadas pela animação os processos do sistema, as filas geradas, as movimentações de entidades, as manutenções de equipamentos e vários indicadores como área trabalhada pelos equipamentos de manuseio de palhão (enleiradora, enfardadora e recolhedor de fardos), quantidade de entidades em fila e outras operações.

A área industrial também foi projetada para representar as operações de recepção de cana-de-açúcar e palhão (Figura 5.38). Foram incluídos *displays* que permitem acompanhar a dinâmica do sistema, com informações como o instante de simulação (relógio), dia de simulação, turno de trabalho, produtividade de cana e palhão, a quantidade de cana e palhão processados no dia por frente, quantidade de veículos e tratores-transbordo em filas, indicação de distâncias médias, quantidades de equipamentos (colhedoras, tratores transbordo, enleiradoras, enfardadoras e veículos) quilometragem percorrida por veículos de cana e de palhão, área liberada para enleirar e enfardar por frente, quantidade de fardos a serem carregados por frente e eficiências de recolhimento de palhão.

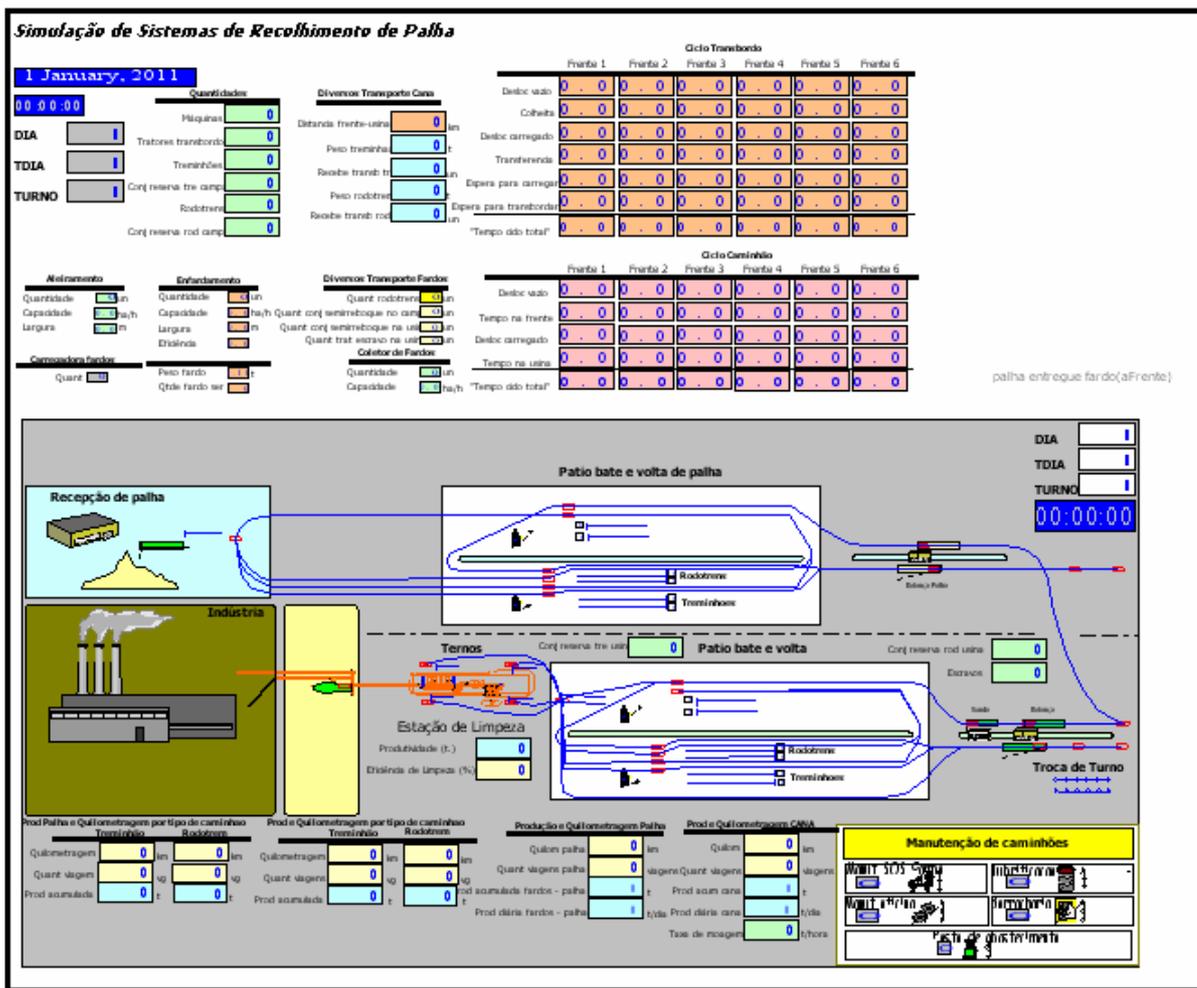


FIGURA 5.38 – Representação da área industrial com *displays* indicativos da simulação

A Figura 5.39 apresenta a animação das operações da área industrial em maior detalhe, com separação das operações com cana e palhço, indicadores de tempo de simulação e da manutenção de veículos.

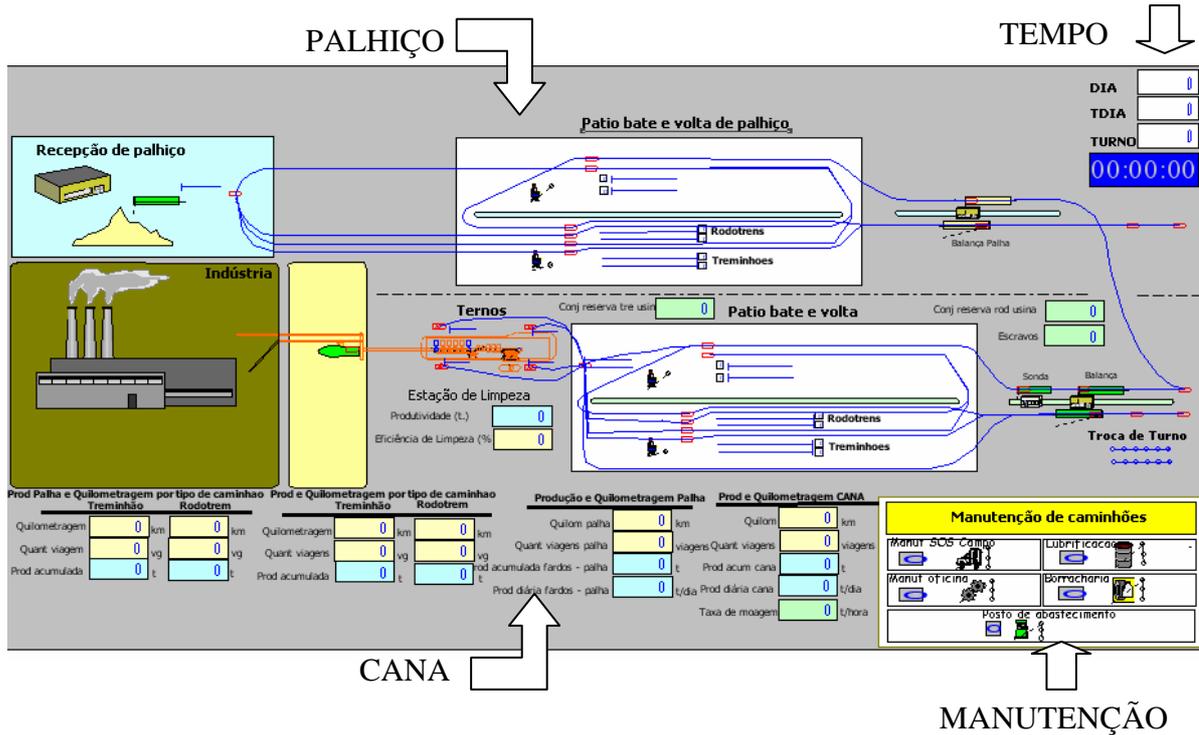


FIGURA 5.39 – Animação das operações realizadas na área industrial.

A forma de interação do usuário do modelo para a simulação dos sistemas é feita da seguinte maneira:

Previamente à simulação, uma planilha de entrada de dados nomeada “Mascara para entrada de dados” elaborada em um arquivo do *Ms Excel* “dados sistema.xls” é configurada com os parâmetros do sistema que será simulado, referentes à moagem, tipo e quantidade de equipamentos, distâncias das frentes à usina, produtividades de cana e palhiço, sistema de recolhimento adotado, tipos de equipamentos e outras informações.

No instante $t=0$ da simulação, ao acionar a execução do modelo, a planilha de entrada de dados é lida e os valores são carregados na lógica do modelo, devidamente parametrizado. A simulação prossegue sendo executada, com registro das informações do sistema (contagem de cargas, quilômetros percorridos, fardos transportados até a usina, manutenções e outros dados.) até o instante em que o modelo atinge a condição de término, no caso, a duração de uma safra de 167 dias.

No instante de término da simulação, o modelo exporta para a planilha “Máscara para saída de dados” uma relação de dados, que são apresentados em uma interface adequada, de maneira a facilitar a análise do cenário. As informações a serem exportadas dizem respeito a produção diária de cana e de palhiço, capacidades operacionais de máquinas e veículos, percentuais de manutenção, ociosidade e utilização de equipamentos, dentre

outras. Mediante a análise da planilha de saída de dados da simulação, novos cenários podem ser configurados e simulados possibilitando sua comparação e refinamento quanto aos objetivos do sistema em estudo.

5.2.3 Interfaces de Entrada e Saída de Dados do Modelo

Foi configurado um único arquivo em Ms Excel – “dados sistema.xls” – com duas planilhas para interface com o modelo de simulação: “Mascara para entrada de dados” e “Mascara para saída de dados”, respectivamente para leitura e exportação de dados do modelo. Os dados de entrada da simulação foram divididos em seções, conforme indicam o Quadro 5.4. e as Figuras 5.40, 5.41, 5.42 e 5.43, configurados para a simulação do sistema 1 – Colheita com limpeza convencional e enfardamento do palhiço com carregamento direto em caminhões.

QUADRO 5.4 – Parâmetros a serem configurados na planilha de dados de entrada.

Seção	Parâmetros
Sistema	Sistema a simular; tempo de simulação; quantidade de frentes de corte e carregamento utilizadas; produtividades de cana e de palhiço; período aguardado para o início do recolhimento de palhiço; área mínima para recolhimento do palhiço; taxa de moagem; uso do enleiramento de palhiço previamente ao enfardamento; quantidade de enleiradoras de palhiço, capacidade de campo da enleiradora e largura da enleiradora; uso de bate e volta de caminhões de palhiço.
Máquinas	Quantidades de colhedoras e tratores-transbordo; eficiência de limpeza das colhedoras.
Transporte de cana	Quantidade de caminhões e conjuntos reserva por tipo no campo e na usina; distâncias médias ponderadas; cargas médias transportadas por viagem; percentual de palhiço na carga; quantidade de transbordos alocados por composição de transporte; uso ou não de sistema bate e volta no campo e na usina.
Enfardamento com carregamento direto	Quantidade de enfardadoras e carregadoras; capacidade de campo da enfardadora; eficiência de recolhimento da enfardadora; peso do fardo; largura da enfardadora; umidade dos fardos; quantidade de veículos e conjuntos reserva no campo e na usina; quantidade de fardos por viagem por veículo;
Enfardamento com transbordo interno	Quantidade de conjuntos trator-recolhedor de fardos por frente; fardos transportados por conjunto trator-recolhedor.
Colheita integral	Percentual de participação do palhiço na carga em massa.
Colheita com limpeza parcial	Percentual de participação do palhiço na carga em massa; eficiência de separação da Estação de Limpeza a Seco; umidade do palhiço.

Sistema Integrado de Colheita de Cana e Recolhimento de palhico
Entrada de dados

Sistema

Sistema a simular Digitar: 1 p/ Enfardamento com carregamento direto
 Tempo de simulação dias 2 p/ Enfardamento com recolhedor de fardos
 Qtde frentes colheita frentes 3 p/ Colheita Integral
 4 p/ Colheita Parcial

Produtividade cana (t/ha) t/ha
 Disponibilidade palhico (t/ha) t/ha Taxa de moagem da usina (t/h)

Area minima p/ recolhimento de palha (ha) Dias p/ inicio do recolhimento

Utiliza aleiramento de palhico? Utilizar 1 para SIM e 0 para NÃO

Enleiradoras	
Frente 1	<input type="text" value="1"/>
Frente 2	<input type="text" value="1"/>
Frente 3	<input type="text" value="1"/>
Frente 4	<input type="text" value="1"/>
Frente 5	<input type="text" value="0"/>
Frente 6	<input type="text" value="0"/>

Capacidade de campo ef da enleiradora (ha/h)
 Largura da aleiradora (m)

Usa bate e volta nos caminhoes com palhico? Utilizar { 1 para SIM No campo
 0 para NÃO Na usina

FIGURA 5.40 – Planilha de inserção de dados. Seção Sistema

Máquinas

	Colhedoras	Tratores transbordo
Frente 1	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="10"/>
Frente 2	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="10"/>
Frente 3	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="10"/>
Frente 4	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="10"/>
Frente 5	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Frente 6	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Eficiencia de limpeza das colhedoras %

Transporte de cana

	Quantidade de veiculos		Quant conj reserva - campo		Distâncias
	Treminhões	Rodotrens	Treminhões	Rodotrens	
Frente 1	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="15"/>
Frente 2	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="20"/>
Frente 3	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="20"/>
Frente 4	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="25"/>
Frente 5	<input type="text" value="0"/>				
Frente 6	<input type="text" value="0"/>				

Quant conj reserva - usina Treminhões Rodotrens Tratores-escravo

Cargas médias por viagem (t) Treminhões Rodotrens Perc palha carga convencional

Quant transbordos por composição (transbordos) Treminhão Rodotrem

Usa bate e volta nos caminhoes de cana? Utilizar { 1 para SIM No campo
 0 para NAO Na usina

FIGURA 5.41 – Planilha de inserção de dados. Seções Máquinas e Transporte de cana

SISTEMAS DE RECOLHIMENTO DE PALHIÇO					
1 - Enfardamento com carregamento direto					
Enfardadoras Carregadoras					
Frente 1	1	1	Cap ef enfardadora (ha/h)	4,2	
Frente 2	1	1	Efic rec enfardadora (%)	43,8	
Frente 3	1	1	Peso do fardo (kg)	413,9	
Frente 4	1	1	Largura enfardadora (m)	2,2	
Frente 5	0	0	Umidade dos fardos (%)	7,6	
Frente 6	0	0			
Quantidade de veiculos					
	Rodotrem	Prancha	Treminhao	Tetraminhão	Pentaminhao
Frente 1	0	1	0	0	0
Frente 2	0	1	0	0	0
Frente 3	0	1	0	0	0
Frente 4	0	1	0	0	0
Frente 5	0	0	0	0	0
Frente 6	0	0	0	0	0
OBS: Escolher apenas um tipo de composição					
Quant fardos por viagem	60	49	54	72	90
Quantidade de conjuntos reserva - campo					
	Rodotrem	Prancha	Treminhao	Tetraminhão	Pentaminhao
Frente 1	0	1	0	0	0
Frente 2	0	1	0	0	0
Frente 3	0	1	0	0	0
Frente 4	0	1	0	0	0
Frente 5	0	0	0	0	0
Frente 6	0	0	0	0	0
OBS: Escolher apenas um tipo de composição					
Quantidade de conjuntos reserva - usina					
	Rodotrem	Prancha	Treminhao	Tetraminhão	Pentaminhao
Usina	0	4	0	0	0
Quantidade de escravos na usina					4

FIGURA 5.42 – Planilha de inserção de dados. Seção Enfardamento com carregamento direto

2 - Enfardamento com transbordo interno	
Coletor fardos	
Frente 1	0
Frente 2	0
Frente 3	0
Frente 4	0
Frente 5	0
Frente 6	0
Fardos transportados coletor	8
Capacidade operacional do coletor (ha/h)	1,8
3 - Colheita Integral	
Percentual de palhiço na carga	14,0%
4 - Colheita com Limpeza Parcial	
Percentual de palhiço na carga	12,7%
Eficiencia de separacao da ELS	50,0
Umidade do palhiço	48,82

FIGURA 5.43 – Planilha de inserção de dados. Seções Enfardamento com transbordo interno, Colheita Integral e Colheita com Limpeza Parcial.

Transporte - cana							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Gtde Rodotrens	4	5	5	6	0	0	20
Gtde Ser res campo	1	1	1	1	0	0	4
Cap prod oper (t/dia)	720,8	650,1	607,3	556,0	-	-	633,5
Gtde Treminhões	0	0	0	0	0	0	0
Gtde Conj res campo	0	0	0	0	0	0	0
Cap prod oper (t/dia)	-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)	18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	
Tempo no Campo (min)	26,2	25,7	34,7	33,7	-	-	
Deslocto carregado (min)	22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	
Tempo na Usina (min)	51,5	51,5	51,5	51,5	-	-	
TEMPO DE CICLO (min)	118,2	131,2	140,2	152,7	0,0	0,0	
Usa bv usina?	sim	Quant conj ser usina	4	Quant trator usina	4		
Usa bv campo?	sim	Quant conj jul usina	0	%Manut. Veiculos	8,7%		

Máquinas - palhiço							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Gtde Enleiradoras	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (ha/dia)	23,3	26,3	24,3	26,8	-	-	25,2
%ocupação	32,9%	37,2%	34,3%	37,8%	-	-	35,5%
%manutenção	9,5%	10,3%	9,3%	10,5%	-	-	9,9%
Gtde Enfardadoras	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (ha/dia)	23,2	26,3	24,3	26,7	-	-	25,1
%ocupação	52,3%	59,2%	54,7%	60,2%	-	-	56,6%
%manutenção	10,5%	10,9%	11,1%	11,3%	-	-	11,0%
Gtde Coletor fardos	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (t/dia)	109,8	124,3	114,9	126,4	-	-	118,8
%ocupação	44,4%	50,4%	46,5%	51,3%	-	-	48%
%manutenção	6,8%	7,0%	6,2%	6,6%	-	-	7%
Gtde Carregadoras	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (t/dia)	109,9	124,3	115,0	126,1	-	-	118,8
%ocupação	13,2%	14,9%	13,8%	15,1%	-	-	14,2%
%manutenção	6,2%	6,1%	5,5%	6,7%	-	-	6,1%

FIGURA 5.45 – Planilha de exportação de dados. Seções Transporte - cana e Máquinas - palhiço.

Transporte - palhiço							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Gtde Rodotrens	0	0	0	0	0	0	0
Gtde Pranchas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gtde Treminhões	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gtde Tetraminhões	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Gtde Pentaminhes	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	4,0
Cap prod oper (t/dia)	109,9	124,3	115,0	126,1	-	-	118,8
Deslocto vazio (min)	18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	
Tempo no Campo (min)	281,7	218,3	247,7	200,3	-	-	
Deslocto carregado (min)	22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	
Tempo na Usina (min)	134,7	134,7	134,7	134,7	-	-	
TEMPO DE CICLO (min)	456,8	406,9	436,3	402,4	0,0	0,0	
Usa bv usina?	sim	Gtde conj res usina	4	Quant trator usina	4		
Usa bv campo?	sim	Gtde conj res frentes	4	%Manut. Veiculos	3,6%		

FIGURA 5.46 – Planilha de exportação de dados. Seção Transporte - palhiço.

5.2.4 Planilha de custo

A planilha de custo faz parte do arquivo “dados sistema.xls” e está integrada com os dados de saída da simulação. Foram considerados os custos fixos e variáveis dos equipamentos que compõem os sistemas logísticos de processamento de cana e palhiço, com base em informações de mercado, dados de fabricantes e em discussões com especialistas do setor.

A planilha resume a produção de cana-de-açúcar e de palhiço, os custos do sistema de corte, carregamento e transporte de cana (CCT) em $\text{R}\$.t.cana^{-1}$ e os custos do palhiço, em $\text{R}\$.t. palhiço^{-1}$, em base úmida e base seca. Uma vez que a umidade do palhiço resultante dos sistemas com fardos é muito inferior à umidade do palhiço do sistema de colheita com limpeza parcial, os custos costumam ser apresentados em base seca para corrigir essa distorção.

O cálculo do custo referente ao palhiço utilizou como referência o sistema de colheita de cana convencional sem recuperação do palhiço, e assim, todo custo adicional do sistema integrado de colheita de cana com aproveitamento do palhiço foi atribuído ao palhiço, seja no formato de fardos ou transportado juntamente com a cana e separado na estação de limpeza a seco.

O custo fixo, que incide sobre o ativo independente de seu uso, foi composto por três componentes, a saber: custo de capital (depreciação e recuperação de capital); seguros, taxas e abrigo e mão de obra. No cálculo do custo de capital considerou-se como premissa a taxa de juros de 12% ao ano. Os custos de seguro, taxas e abrigo foram adotados como sendo de 1% do valor de aquisição do equipamento novo, ao ano.

Os custos de mão de obra foram calculados com base nos salários mensais atribuídos por posto de trabalho com acréscimo de 102% referente a encargos sociais (DIEESE, 2011). Para contemplar as folgas, considerou-se o valor de 3,6 funcionários por posto de trabalho no regime de 3 turnos (operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar além do carregamento e transporte de fardos) e 2,4 funcionários por posto de trabalho no regime de 2 turnos (enleiramento e enfardamento de palhiço). Os custos de mão de obra foram contabilizados para 12 meses (ano safra completo), uma vez que considerou-se que os operadores são utilizados em outros processos na entressafra (plantio, tratamentos culturais, reforma de equipamentos, etc.). Os dados adotados como premissa para o cálculo da parcela de custo fixo são apresentados na Tabela 5.2.

TABELA 5.2 – Dados para cálculo do custo fixo.

Equipamento	Valor de aquisição (R\$)	Vida útil (anos)	Valor residual (% eqp^{to} novo)	Salário mensal (R\$)
Colhedoras	900.000,00	7	25	2.500,00
Tratores p/ transbordo	200.000,00	10	20	2.000,00
Conjunto de transbordos (2 transbordos)	180.000,00	10	10	-
Cavalo mecânico p/ rodotrem	400.000,00	10	25	2.000,00
Conjunto p/ rodotrem (2 semirreboques)	300.000,00	10	10	-
Trator p/ enleiradora	75.000,00	10	20	1.500,00
Enleiradora	100.000,00	10	10	-
Trator p/ enfardadora	200.000,00	10	20	1.500,00
Enfardadora	300.000,00	5	20	-
Trator p/ recolhedor de fardos	200.000,00	10	20	1.500,00
Recolhedor de fardos	280.000,00	15	10	-
Carregadora de fardos	150.000,00	10	20	1.500,00
Caminhão p/ fardos	200.000,00	10	25	2.000,00
Implementos (conjuntos de reboques ou semirreboques p/ veículos de fardos)	prancha	120.000,00		
	rodotrem	200.000,00		
	treminhão	100.000,00	10	10
	tetraminhão	150.000,00		
	pentaminhão	200.000,00		

O custo variável, que incide sobre o ativo em função de seu uso, foi dividido em três parcelas: combustível, lubrificante e manutenção. O cálculo do custo variável é realizado com base no trabalho produzido pelos equipamentos, mensurado em quilometragem, horas trabalhadas ou quantidade de material processado (cana-de-açúcar ou palhiço), que varia conforme sua função.

O custo referente ao consumo de combustível foi obtido em consulta a especialistas e também nos dados levantados no ensaio de campo dos equipamentos de manuseio de palhiço. O custo por litro do diesel foi estipulado em R\$2,00, com base em preços praticados no mercado da cidade de São Paulo em outubro/2011. O custo do consumo de lubrificantes foi considerado como um percentual do custo de combustível e os custos com manutenção (inclui mão de obra) foram considerados como um percentual do valor do

equipamento novo ao ano. As classes de equipamento foram as mesmas indicadas nas premissas para o cálculo do custo fixo. Os valores adotados como premissa para o cálculo do custo variável são dados na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 – Dados para cálculo do custo variável.

Equipamento	Consumo de combustível		Consumo de lubrificante (% cons. comb.)	Custo de manutenção (% eqp ^{to} novo)	Utilização anual
	valor	unidade			
Colhedoras	1,0	l.t ⁻¹	10	15	100.000 t
Tratores para transbordo	0,2	l.t ⁻¹	5	5	50.000 t
Conjunto de transbordos (2 transbordos)	-	-	-	5	50.000 t
Cavalo mecânico p/ rodotrem	1,2	km.l ⁻¹	5	5	50.000 km
Conjunto p/ rodotrem (2 semirreboques)	-	-	-	5	50.000 km
Trator p/ enleiradora	1,97 ^(a)	1.ha ⁻¹	5	5	1.000 h e 3,0 ha.h ^{-1(a)}
	0,93 ^(b)				1.000 h e 4,8 ha.h ^{-1(b)}
Enleiradora	-	-	-	5	1.000 h e 3,0 ha.h ^{-1(a)}
					1.000 h e 4,8 ha.h ^{-1(b)}
Trator p/ enfardadora	6,62 ^(c)	1.ha ⁻¹	5	5	1.000 h e 2,6 ha.h ^{-1(c)}
	5,71 ^(d)				1.000 h e 2,8 ha.h ^{-1(d)}
Enfardadora	-	-	-	10	1.000 h e 2,6 ha.h ^{-1(c)}
					1.000 h e 2,8 ha.h ^{-1(d)}
Trator p/ recolhedor de fardos	5,5	1.ha ⁻¹	5	5	1.500 h e 1,8 ha.h ⁻¹
Recolhedor de fardos	-	-	-	3	1.500 h e 1,8 ha.h ⁻¹
Carregadora de fardos	0,2	l.t ⁻¹	5	5	1.500 h e 15 t.h ⁻¹
Caminhão p/ fardos	1,8	km.l ⁻¹	5	5	30.000 km
Conjuntos p/ fardos (reboques ou semirreboques)	-	-	-	5	30.000 km

^a Enleiradora Bowman

^b Enleiradora New Holland

^c Enfardadora Vicon

^d Enfardadora New Holland

Uma vez que nos ensaios de campo houve mudança nos equipamentos de manuseio de palhico, o que reflete em consumos de combustível e capacidade de campo diferentes entre os ensaios, os índices de custo variável são modificados. Não ocorre mudanças nos índices de custo fixo, pois não considerou-se alterações no valor de aquisição, vida útil e valor residual dos equipamentos.

Os custos de trituração de fardos e da estação de limpeza a seco foram informados pela empresa que executa o projeto destes equipamentos. A Tabela 5.4 resume os índices de custo fixo e variável para cálculo do custo global dos cenários.

TABELA 5.4 – Resumo dos índices dos custos fixo e variável.

Equipamento	Custo fixo (R\$/eqpto. safra)	Custo variável		Unidade
		Valor Ensaio com carregamento direto	Valor Ensaio com recolhedor de fardos	
Colhedoras	446.667	3,55		R\$.t ⁻¹
Tratores para transbordo	214.204	0,62		R\$.t ⁻¹
Conjunto de transbordos (2 transbordos)	34.686	0,18		R\$.t ⁻¹
Cavalo mecânico p/ rodotrem	255.020	2,15		R\$.km ⁻¹
Conjunto p/ rodotrem (2 semirreboques)	57.805	0,30		R\$.km ⁻¹
Trator p/ enleiradora	102.143	5,39	2,73	R\$.ha ⁻¹
Enleiradora	19.268	1,67	1,04	R\$.ha ⁻¹
Trator p/ enfardadora	126.940	17,75	15,56	R\$.ha ⁻¹
Enfardadora	95.668	11,54	10,71	R\$.ha ⁻¹
Trator p/ recolhedor de fardos	170.572	-	15,25	R\$.ha ⁻¹
Recolhedor de fardos	44.661	-	3,11	R\$.ha ⁻¹
Carregadora de fardos	160.653	0,75		R\$.t palhão ⁻¹
Caminhão p/ fardos	214.774	1,50		R\$/km ⁻¹
Conjuntos p/ fardos (reboques ou semirreboques)	prancha	21.921	0,20	
	rodotrem	36.537	0,33	
	treminhão	18.268	0,17	R\$/km ⁻¹
	tetraminhão	27.402	0,25	
	pentaminhão	36.537	0,33	
Triturador de fardos	450.000	7,0		R\$.t palhão ⁻¹
Estação de limpeza a seco	1.252.000	6,70		R\$.t palhão ⁻¹

A planilha de custo anexa ao arquivo “dados sistema.xls” que faz a interface de dados com o modelo de simulação é apresentada no APÊNDICE A.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo foram obtidos segundo a metodologia apresentada, cujos métodos de pesquisa foram a experimentação com os equipamentos de processamento de cana-de-açúcar e biomassa (ensaios de campo) e modelagem e simulação (representação dos sistemas de interesse por meio de um modelo e sua utilização como ferramenta para auxiliar tomadas de decisão).

A título de organização e para facilitar a discussão, os resultados destas duas seções são apresentados em separado, com suas próprias subdivisões: “Ensaios de Campo” e “Simulação”.

6.1 Ensaios de Campo

Os ensaios de campo geraram resultados que foram agrupados em três seções principais: ensaio de colheita, ensaio de recolhimento de fardos com carregamento em caminhão e ensaio de recolhimento de fardos com transbordo interno. Como foram realizados dois ensaios de enfardamento, com variação, abriu-se uma quarta seção para comparar os resultados obtidos pelos equipamentos que executam operação semelhante.

6.1.1 Ensaio de Colheita

O ensaio de colheita foi realizado de 9 a 13 de junho de 2008, com variedade de cana RB867515, de segundo corte, com espaçamento entre linhas de 1,40m. Diariamente os conjuntos de facas de corte de base e facões picadores das colhedoras foram trocados por peças novas, a fim de se trabalhar em igualdade de condições entre os quatro tratamentos:

R1F4 - Rolos picadores com 4 facas e rotação do extrator primário de 650 rpm;

R2F4 - Rolos picadores com 4 facas e rotação do extrator primário de 850 rpm;

R1F5 - Rolos picadores com 5 facas e rotação do extrator primário de 650 rpm;

R2F5 - Rolos picadores com 5 facas e rotação do extrator primário de 850 rpm.

Para cada tratamento foram realizadas 10 viagens de rodotrens, sendo que cada veículo possuía capacidade de acomodar a carga de 8 transbordos. Foram obtidos 40 registros de tempos de produção, referentes ao carregamento de 2 transbordos, tracionados pelos caminhões. Após a transferência da carga, os rodotrens eram direcionados à usina por trajeto em estradas internas das áreas de propriedade da usina.

O tempo de produção das colhedoras foi utilizado para a geração das distribuições teóricas de probabilidade, necessárias para representar as operações na etapa de simulação. A Tabela 6.1 resume os resultados obtidos.

TABELA 6.1 – Tempo de produção de colhedoras.

Tempo de produção	Tratamento			
	R1F4	R1F5	R2F4	R2F5
Média (min.)	11,09 ^a	11,02 ^a	16,12 ^b	16,21 ^b
Desvio padrão (min)	2,09	2,57	2,12	3,31
Coefficiente de variação (%)	18,8	23,4	13,2	20,4

Médias seguidas por letras iguais, em uma mesma linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade.

O tempo de produção apresentou diferença estatística significativa apenas entre as rotações do extrator primário e não devido à quantidade de facas do rolo picador. Os dados para 650 rpm (R1) indicaram médias próximas a 11 minutos enquanto a operação a 850 rpm (R2) resultou em valores na casa dos 16 minutos. A Tabela 6.2 resume os índices obtidos.

TABELA 6.2 – Índices relativos à colhedora.

Índice	Tratamento			
	R1F4	R1F5	R2F4	R2F5
Consumo específico de combustível (L.t ⁻¹)	1,31 ^a	1,10 ^b	1,21 ^{ab}	1,35 ^a
Consumo horário de combustível (L.h ⁻¹)	89,5 ^a	80,8 ^b	81,9 ^{ab}	94,9 ^a
Capacidade de produção efetiva (t.h ⁻¹)	68,7 ^a	74,1 ^a	67,9 ^a	70,6 ^a
Velocidade (km.h ⁻¹)	3,9 ^a	4,2 ^a	4,1 ^a	4,1 ^a

Médias seguidas por letras iguais, em uma mesma linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade.

A capacidade de produção efetiva não apresentou diferença estatística entre os quatro tratamentos. Embora os tempos de colheita apresentassem diferença estatística para o fator rotação (650rpm e 850 rpm), houve uma compensação em função da quantidade de cana processada, ou seja, a diminuição do tempo de colheita nos ensaios a 650 rpm (R1), para um mesmo volume de cana, foi acompanhada pela redução da carga processada, resultando na mesma capacidade de produção efetiva da colhedora em comparação aos ensaios a 850 rpm.

Não foi observada diferença estatística significativa para o consumo de combustível da colhedora a 5% de probabilidade para as médias do fator facas a 850 rpm, bem como para R1F4. As médias de consumo também não apresentaram diferença estatística para R1F5 e R2F4. As velocidades de deslocamento das colhedoras para os quatro tratamentos foram estatisticamente iguais, a 4,0 km.h⁻¹.

Em relação ao transporte de cana, os índices de carga média dos rodotrens por viagem, consumo específico de combustível e rendimento energético do rodotrem, são apresentados na Tabela 6.3.

TABELA 6.3 – Índices relativos ao transporte.

Índice	Tratamento			
	R1F4	R1F5	R2F4	R2F5
Carga líquida média de rodotrens (t)	50,43 ^a	53,68 ^a	72,45 ^b	74,96 ^b
Cons. específico de combustível (l.t ⁻¹)	1,56 ^a	1,52 ^a	1,35 ^b	1,36 ^b
Rendimento energético (t.km.L ⁻¹)	66,4 ^a	67,87 ^a	81,43 ^b	83,67 ^b

Médias seguidas por letras iguais, em uma mesma linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade.

Os índices relativos ao transporte não apresentaram diferença estatística em relação à quantidade de facas, mas sim relativamente à rotação do extrator primário. A operação a 850 rpm (R2) resulta uma carga 50% superior, aproximadamente, em relação aos valores obtidos a 650 rpm (R1). Os valores observados no ensaio de campo ultrapassam os limites do Peso Bruto Total Combinado (PBTC) estabelecido pela legislação de transporte para o rodotrem, que é de 74 t. O transporte realizado no ensaio de campo foi realizado em percurso interno, em áreas da usina.

O consumo específico de combustível foi maior na operação a 650 rpm, atribuído à maior presença do palhiço na carga em comparação à colheita a 850 rpm. Os índices relativos ao sistema de corte, carregamento e transporte são resumidos na Tabela 6.4.

TABELA 6.4 – Índices relativos ao sistema de CCT.

Índice	Tratamento			
	R1F4	R1F5	R2F4	R2F5
Comprimento de rebolos (cm)	18,0 ^a	16,0 ^b	17,7 ^a	15,5 ^b
Perc. imp. vegetais – base úmida (%)	12,4 ^a	13,0 ^a	4,9 ^b	5,8 ^b
Perc. imp. minerais (%)	0,20 ^a	0,53 ^a	0,05 ^b	0,07 ^b
Perc. imp. vegetais – base seca (%)	6,7 ^a	6,8 ^a	2,0 ^b	2,5 ^b
Produtividade do canavial (t.ha ⁻¹)	126,0 ^a	125,6 ^a	116,9 ^a	123,3 ^a

Médias seguidas por letras iguais, em uma mesma linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade.

O comprimento de rebolos apresentou variação significativa para o fator quantidade de facas (F1 e F2), em virtude do mecanismo de corte. Em comparação com o índice carga média de rodotrens apresentado na tabela anterior, a picagem em menor tamanho não foi refletida estatisticamente na diferença de cargas.

Já os índices obtidos para as impurezas apresentaram diferenças estatísticas significativas apenas em relação à velocidade de rotação do extrator primário, indicando que a quantidade de facas no rolo picador não interferiu nos índices. Havia uma expectativa de que o fracionamento do colmo de cana em menor dimensão, com o uso do rolo de 5 facas, pudesse proporcionar uma diferenciação dos resultados. Observa-se que na colheita a 650 rpm (R1), a rotação menor proporcionou menor limpeza do material processado, com impurezas vegetais da ordem de 12% (média de 12,7%) enquanto nos cenários a 850 rpm (R2) o percentual de impurezas era da ordem de 4 a 6% (média de 5,35%). As impurezas minerais e as impurezas vegetais em base seca também apresentaram valores significativamente maiores nos cenários a 650 rpm, com diferença estatística evidenciada apenas para o fator rotação.

Nota-se que a produtividade do canavial não apresentou diferença significativa entre os quatro tratamentos. A produtividade obtida em separado por tratamento, em função das cargas transportadas e das distâncias percorridas pelas colhedoras para a sua formação. Este resultado confirma que a estratégia utilizada no ensaio foi positiva, ao realizar sequencialmente a colheita dos tratamentos na mesma área. Como resultado, houve menor variabilidade da produtividade do canavial entre os tratamentos.

A partir das produtividades do canavial calculadas, do percentual de palhiço na carga e da umidade do palhiço, foi obtida a produção total de palhiço na área de testes e o volume de palhiço enviado à usina. O volume remanescente de palhiço sobre o solo para os quatro tratamentos foi levantado por diferença. A Tabela 6.5 resume os índices obtidos para

cada tratamento e a média agrupada em função da rotação do extrator primário, uma vez que os índices relativos ao transporte apresentaram diferenciação estatística apenas para este fator.

TABELA 6.5 – Índices relativos ao palhiço e a eficiência de limpeza das colhedoras.

Índice	Tratamento			
	R1F4	R1F5	R2F4	R2F5
Produção total de palhiço, b.s. (t.ha ⁻¹)	15,4	15,3	15,6	16,3
Média (t.ha ⁻¹)	15,4		15,9	
Palhiço enviado à usina, b.s. (t.ha ⁻¹)	8,4	8,6	2,3	3,0
Média (t.ha ⁻¹)	8,5		2,7	
Palhiço remanescente sobre o solo, b.s.(t.ha ⁻¹)	7,0	6,7	13,3	13,2
Média (t.ha ⁻¹)	6,9		13,2	
Eficiência de limpeza da colhedora (%)	45	43	85	81
Média (%)	45		83	

O palhiço remanescente sobre o solo resultou em uma média de 6,9 t.ha⁻¹ para a colheita com limpeza parcial, a 650 rpm (R1). Esse volume foi numericamente próximo à referência dada pela literatura para se obter os benefícios agrônômicos de manutenção do palhiço sobre o solo como cobertura morta, de 7,5 t.ha⁻¹, que inibe a proliferação de ervas daninhas (efeito alelopático). O volume de 6,9 t.ha⁻¹ mantido no campo corresponde a 45% do total de palhiço disponível no canavial e o restante do palhiço segue junto com a cana para a usina.

O resultado para a colheita convencional, com rotação do extrator primário de 850 rpm (R2F4 e R2F5), indicou o valor médio de 83% para o índice de eficiência de limpeza, ou seja, do total de palhiço disponível no canavial, em massa, 83% foi removido pelo sistema de limpeza da colhedora. Observa-se que na rotação de 850 rpm, apenas 2,7 t.ha⁻¹ segue para a usina com a carga.

A Figura 6.1 apresenta o comportamento das impurezas vegetais (b.u.) para os quatro tratamentos, identificando os pontos de máximo e mínimo e a média calculada. Também foram indicados os pontos de mínimo, máximo e a média, agrupados por rotação do extrator primário, uma vez que não houve diferença estatística significativa para o fator quantidade de facas.

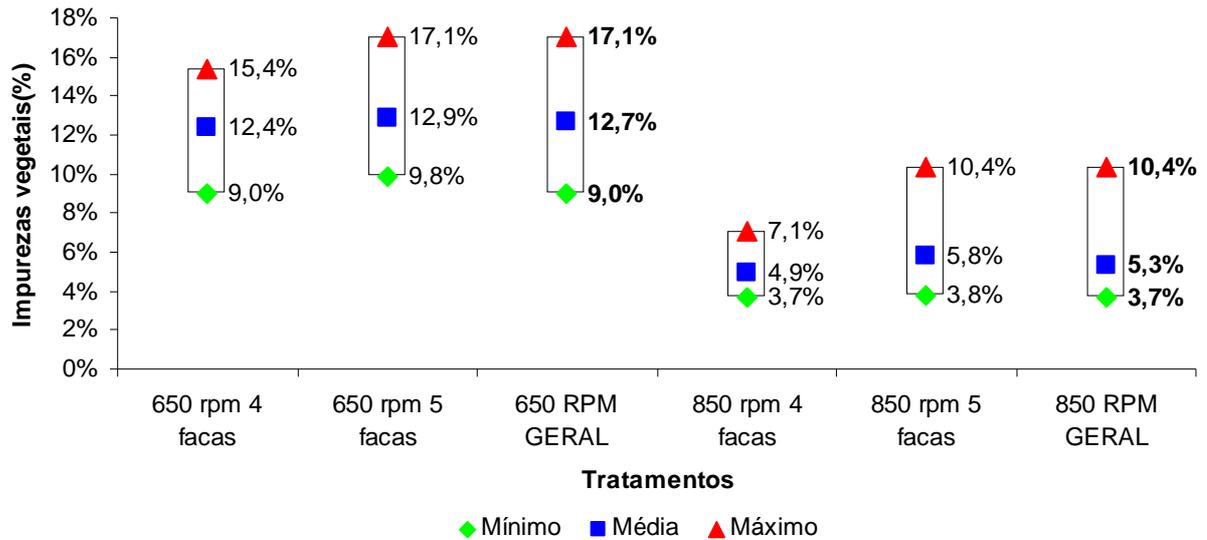


FIGURA 6.1 – Percentual de impurezas vegetais (b.u.) – valores mínimo, médio e máximo por tratamento.

Observando-se os valores agrupados por rotação, percebe-se a amplitude entre os pontos de máximo e mínimo: 8,1 e 6,7 pontos percentuais para 650 rpm e 850 rpm, respectivamente, e as médias para os dois grupos de dados: 12,7% (650 rpm) e 5,4% (850 rpm). Atribui-se a grande variação dos resultados do ensaio de impurezas à distribuição não uniforme das impurezas nas amostras e à variabilidade da impureza vegetal presente no canal. A presença de ponteiros de cana na amostra, por exemplo, eleva os índices de impureza vegetal em base úmida devido à maior umidade em relação às folhas secas.

Da mesma maneira, elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 6.2 que apresenta a variação das cargas transportadas por viagem para os quatro tratamentos avaliados. Para cada tratamento são expostos os limites mínimo e máximo, além da média. Uma vez que não foi observada diferença estatística para o fator facas, o gráfico também apresenta a média e os limites extremos para os dados agrupados para uma mesma rotação, independente da quantidade de facas.

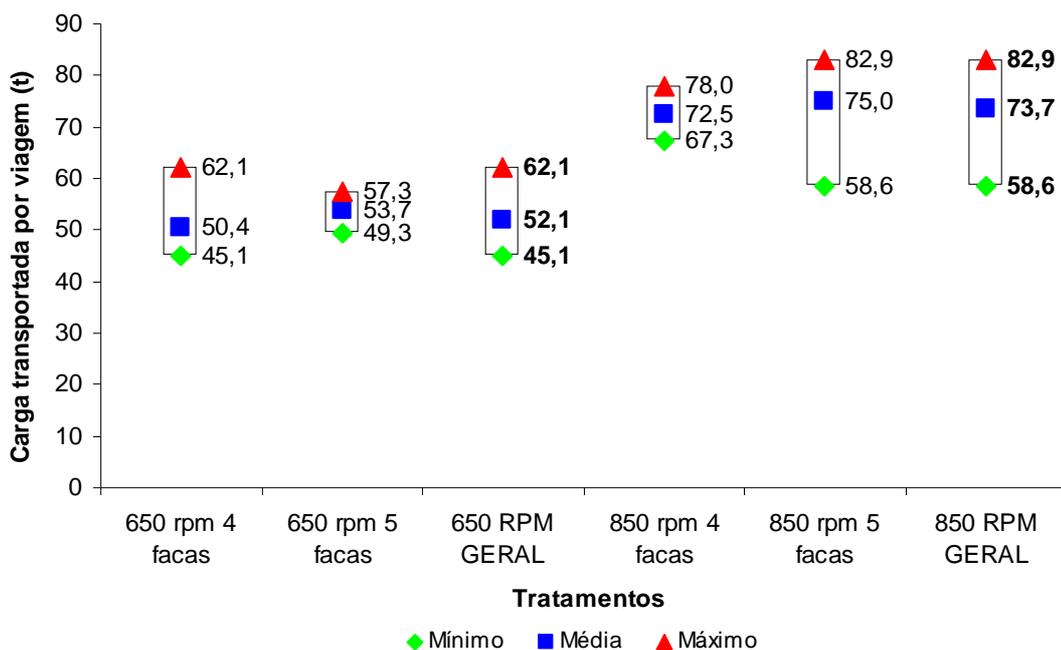


FIGURA 6.2 – Carga transportada por viagem – valores mínimo, médio e máximo por tratamento.

Conforme apresentado anteriormente, a maior participação do palhço no cenário com rotação de 650 rpm fez com que a carga média fosse reduzida em cerca de um terço do seu valor, diminuindo de 73,7 t para 52,1 t, em média. Considerando os dados agrupados, observa-se uma amplitude absoluta de 24,3 t para os cenários a 850 rpm e de 17,0 t para os cenários a 650 rpm, valores considerados altos. A amplitude da carga transportada pode ser atribuída à variabilidade da produtividade do canavial, variação na velocidade de colheita, desregulagem das rotações de limpeza do extrator primário e do mecanismo de corte de rebolos, etc. que podem influenciar nos resultados. Ainda assim, a comparação de médias resultou em diferenças muito significativas para o fator “rotação”

Procurou-se estabelecer algumas relações entre os índices apresentados nas duas figuras anteriores, ou seja, carga transportada por viagem e impurezas vegetais na carga. Os dois índices não apresentaram diferenciação estatística de suas médias quanto ao fator facas, mas apenas em relação ao fator rotação. A Figura 6.3 apresenta a dispersão dos pontos amostrais coletados nos ensaios de campo.

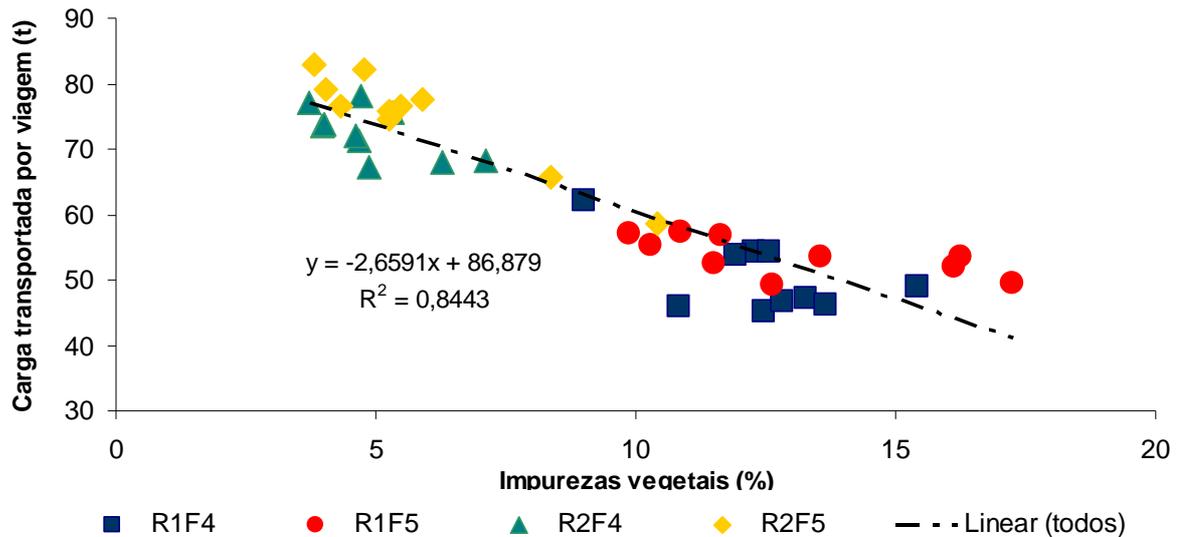


FIGURA 6.3 – Carga transportada por viagem em função das impurezas vegetais (b.u.).

Nota-se a tendência de redução da carga transportada em virtude do aumento da presença de impurezas vegetais na carga. De fato, as impurezas vegetais possuem menor densidade do que a cana e assim, a presença deste material compromete a operação de transporte.

Elaborou-se uma regressão linear para todo o conjunto de dados amostrais, independente do tratamento e obteve-se a equação apresentada na Figura 6.3, com coeficiente de determinação R^2 de 84,4%. Da regressão, o aumento de cada ponto percentual de impurezas vegetais aponta uma redução de 2,7 t na carga do rodotrem.

6.1.2 Ensaio de Enfardamento com Carregamento de Fardos em Caminhões

O ensaio de enfardamento foi realizado no período de 9 a 12 de setembro de 2008 no município de Borebi/SP, com a variedade de cana RB845210, de terceiro corte. O apontamento de tempos do conjunto trator-enleiradora de palhiço resultou nos valores apresentados na Tabela 6.6.

TABELA 6.6 – Divisão das atividades apontadas na operação de enleiramento de palhiço.

Código	Atividades	Tempo (h)	Quantidade de apontamentos	Percentual (%)
1	Enleiramento	7,47	156	55,3%
3	Regulagem	0,53	14	3,9%
4	Deslocamento	0,21	2	1,5%
5	Manutenção	1,30	2	9,6%
6	Manobra de cabeceira	2,90	146	21,5%
8	Bordadura	0,57	8	4,2%
9	Administrativo	0,53	6	4,0%
Total		13,50	334	100,0%

Os demais dados, levantados para a operação de enleiramento de palhiço foram resumidos na Tabela 6.7.

TABELA 6.7 – Dados levantados no ensaio com a enleiradora de palhiço.

Dados	Valores
Tempo total de produção da enleiradora - TPRel (h)	7,47
Tempo máquina total da enleiradora - TMeI (h)	13,50
Combustível total consumido pela enleiradora - LeI (L)	80,5
Quantidade total de fardos transportados pelo veículo - Qv (fardos)	245
Quantidade total de fardos produzidos no ensaio - QFT (fardos)	762
Carga líquida total transportada no ensaio - Pv (t)	101,4
Área total de recolhimento de fardos - AT (ha)	40,91

De posse desses dados foi possível obter os índices de desempenho do conjunto trator-enleiradora, conforme Tabela 6.8:

TABELA 6.8 – Índices levantados para o conjunto trator-enleiradora de palhico.

Índice	Resultado
Capacidade de campo efetiva (ha.h ⁻¹)	5,5
Capacidade de campo operacional (ha.h ⁻¹)	3,0
Consumo específico de combustível, por fardo (L.fardo ⁻¹)	0,11
Consumo específico de combustível, por área (L.ha ⁻¹)	1,97
Capacidade de produção efetiva (t.h ⁻¹)	42,2
Capacidade de produção operacional, por hora (t.h ⁻¹)	23,4

No ensaio de campo o conjunto trator-enleiradora de palhico operou em ritmo constante, exceto por uma interrupção por motivo da quebra de um rolamento na roda de apoio do implemento. O enleiramento de 7m proporcionou um grande ganho de escala para a produção de fardos que viria posteriormente.

Na sequência das operações, o conjunto trator-enfardadora processou as leiras de palhico, formando fardos retangulares com dimensões 2,4m x 1,2m x 0,9m (comprimento x largura x altura), distribuídos uniformemente na área de recolhimento. Os tempos mensurados na operação da enfardadora encontram-se na Tabela 6.9.

TABELA 6.9 – Divisão das atividades apontadas na operação de enfardamento.

Código	Atividade	Tempo (h)	Quantidade de apontamentos	Percentual (%)
1	Enfardamento	9,74	189	60,7%
3	Desembuchamento	0,40	3	2,5%
4	Deslocamento	0,09	4	0,6%
5	Manutenção	0,63	2	3,9%
6	Manobra de cabeceira	1,12	145	7,0%
7	Reparo de barbante	2,67	23	16,6%
8	Administrativo	1,16	24	7,2%
9	Limpeza	0,25	3	1,6%
	Total	16,06	393	100,0%

Além dos os tempos operacionais, foram coletados dados para o levantamento de índices de desempenho do conjunto trator-enfardadora. Os dados coletados foram apresentados na Tabela 6.10.

TABELA 6.10 – Dados levantados no ensaio com a enfardadora de palhiço.

Dados	Valores
Tempo total de produção da enfardadora - TPRef (h)	9,74
Tempo máquina total da enfardadora - TMef (h)	16,06
Combustível total consumido pela enfardadora - Lef (L)	271

Da mesma maneira que o conjunto trator-enleiradora de palhiço, alguns índices foram relacionados ao total de 762 fardos produzidos (QFT) e à massa média dos fardos de 413,8 kg, obtido em função da quantidade total de fardos transportados para a usina no caminhão (QFv) e da respectiva carga líquida registrada nestas viagens (M veic).

No período de avaliação, as paradas da enfardadora eram relacionadas apenas a problemas de amarração dos fardos, registrados na tabela de apontamentos com o código 7 – reparo de “barbante”. O sistema de amarração era composto por seis cordões, presos no sentido do comprimento dos fardos, com consumo total de 42 m por fardo (Figura 6.4).



FIGURA 6.4 – Amarração dos fardos com seis cordões.

Em um fardo cujos cordões haviam rompido, percebeu-se a facilidade de desmanche do mesmo, o que é importante para a operação de trituração na usina. Embora o fardo resultante fosse firme, compacto, o palhiço encontrava-se em camadas justapostas (Figura 6.5).



FIGURA 6.5 – Fardo com cordões cortados e camadas de palhiço abertas.

A equipe da empresa, presente no ensaio, informou que a utilização das enleiradoras e enfardadoras varia conforme a umidade do solo e do material a ser enfardado. De maneira geral a operação inicia em torno das 8 horas da manhã e se estende até as 21 horas, constituindo como uma boa referência a estimativa de 9 horas efetivas de trabalho no dia. Conforme a experiência da empresa, da jornada diária, aproximadamente 70% eram utilizadas efetivamente na operação de enfardamento (eficiência de campo), no processo de enfardamento de *brachiaria*.

Considerando os tempos apontados para a enfardadora, foi possível checar o percentual de horas de operação (Tempo de produção + Tempo de manobra) sobre o total de horas apontadas (Tempo máquina) obtido no ensaio. Os valores são apresentados na Tabela 6.11. Nota-se que o valor obtido encontra-se numericamente próximo à eficiência de campo passada pela empresa.

TABELA 6.11 - Cálculo do percentual de utilização da enfardadora.

Tempos apontados	Conjunto tratores-enfardadora
Tempo total de produção (h)	9,7
Tempo total de manobra (h)	1,12
Tempo total de produção + manobra(h)	10,82
Tempo máquina total (h)	16,05
Eficiência de campo (%)	67,41

Na operação de enfardamento, algumas operações são conduzidas previamente à operação diária, tais como a renovação da graxa da central de distribuição, substituição dos rolos para amarração dos fardos, abastecimento e lubrificação da enfardadora. Conforme indicação da empresa, estas atividades consomem de meia hora a uma hora no início da jornada de trabalho. Essas informações foram particularmente úteis para a confecção do modelo de simulação. A Tabela 6.12 sintetiza os índices que foram calculados para o conjunto trator-enfardadora.

TABELA 6.12 – Índices levantados para o conjunto trator-enfardadora.

Índice	Resultado
Qtde. fardos produzidos por hectare (fardos.ha ⁻¹)	18,6
Capacidade de campo efetiva (ha.h ⁻¹)	4,2
Capacidade de campo operacional, por hora (ha.h ⁻¹)	2,6
Consumo específico de combustível, por fardo (L.fardo ⁻¹)	0,36
Consumo específico de combustível, por área (L.ha ⁻¹)	6,62
Capacidade de produção efetiva (t.h ⁻¹)	32,4
(fardo.h ⁻¹)	78,3
Capacidade de produção operacional, por hora (t.h ⁻¹)	19,6
(fardo.h ⁻¹)	47,4

Em termos de interação entre máquinas, foi possível perceber a importância do enleiramento de palhico previamente ao enfardamento. O enleiramento em 7 metros permitiu o recolhimento de maior quantidade de palhico por metro linear de deslocamento da enfardadora, resultando em menor espaçamento entre os fardos, o que facilita a operação de recolhimento devido à menor movimentação da carregadora.

Na sequência, foram mensuradas as operações de carregamento e transporte de seis viagens do caminhão prancha cujos resultados são apresentados na Tabela 6.13.

TABELA 6.13 – Dados relativos ao transporte dos fardos.

Viagem.	Qtde. fardos (unid.)	Tempo de carregamento (min.)	Carga líquida (t)
1	30	30	13,0
2	37	35	16,3
3	37	45	16,3
4	46	35	19,1
5	46	55	18,6
6	49	40	18,1
Total	245	240	101,4

A quantidade de fardos alocados no caminhão prancha aumentou ao longo do período de realização do ensaio. Isto ocorreu devido ao receio inicial quanto à estabilidade da carga na primeira viagem, fato este que foi superado e motivou a melhor alocação dos fardos. A última viagem, com 49 fardos constitui a referência para o carregamento e transporte dos fardos.

O tempo médio de carregamento dos fardos foi de $0,98 \text{ minuto.fardo}^{-1}$, para uma massa média de $413,8 \text{ kg.fardo}^{-1}$. Após o carregamento, a amarração dos fardos com cordas, de maneira similar ao procedimento com cana inteira apresentou duração em torno de 15 minutos.

Na usina foram retiradas amostras para análise de impurezas minerais e de umidade (20 amostras) por meio da sonda oblíqua. O resultado é apresentado na Tabela 6.14.

TABELA 6.14 – Estatísticas de impureza mineral nos fardos.

Estatísticas	Massa total amostra (g)	Massa impurezas minerais (g)	Perc. imp min (%)	Umidade fardos (%)
Média	2.488,5	356,8	14,3	7,6
Desvio Padrão	855,4	319,8	8,6	2,0
Coeficiente de variação (%)	34,4	89,6	60,1	26,2

Percebe-se grande variabilidade na quantidade de impureza mineral nos fardos, o que indica que estas não se encontram uniformemente distribuídas. Nas amostras que apresentam raízes de cana, a quantidade de impureza mineral é majorada. Considera-se a média de 14,3% de impureza mineral muito alta e prejudicial ao processamento na usina.

Vinte amostras foram tomadas para mensurar a quantidade de palhiço que permaneceu no solo após a operação dos conjuntos trator-enleiradora e trator-enfardadora, que posteriormente subsidiará o cálculo da eficiência de recolhimento de palhiço. Os valores constam da Tabela 6.15.

TABELA 6.15 – Palhiço remanescente sobre o solo e umidade.

Estatísticas	Palhiço remanescente sobre o solo	Umidade
	(t.ha ⁻¹)	(%)
Média	9,9	8,3
Desvio padrão	2,3	2,8
Coefficiente de variação (%)	23,2	33,7

Com a umidade obtida em laboratório de 8,3%, pode-se calcular o índice de palhiço remanescente sobre o solo em base seca, que resultou em 9,1 t.ha⁻¹.

A quantidade de palhiço enfardado em base úmida, por hectare, pode ser obtida pelos dados dos fardos mensurados na usina:

Massa média do fardo	423,8 kg
Quantidade de fardos produzidos por hectare	18,6 fardos.ha ⁻¹
Palhiço enfardado, (b.u.)	7,7 t.ha ⁻¹

Utilizando-se a umidade média das amostras dos fardos de 7,6%, obtém-se o palhiço enviado à usina em base seca, b.s. de 7,1 t.ha⁻¹. Dessa maneira, pode-se obter o palhiço total, em base seca, pelo somatório das duas parcelas de palhiço:

Palhiço remanescente sobre o solo, (b.s.)	9,1t.ha ⁻¹
Palhiço enfardado, (b.s.)	7,1 t.ha ⁻¹
Produção total de palhiço, (b.s.)	16,2 t.ha ⁻¹

De posse das três parcelas de palhiço, a eficiência de recolhimento do sistema foi calculada. Do total de palhiço disponível de 16,2 t.ha⁻¹, a quantidade de 7,1 t.ha⁻¹ foi enfardada, ou seja, a eficiência de recolhimento foi de 43,8%.

6.1.3 Ensaio de Enfardamento com Transbordo Interno de Fardos

O ensaio de enfardamento com transbordo interno de fardos ocorreu no período de 31/08/2010 a 04/09/2010 em Lençóis Paulista. A variedade de cana que havia sido colhida na área do ensaio era a RB867515 de quarto corte.

O tempo de duração das atividades que formam a operação do conjunto trator-enleiradora de palhiço foi apontado em planilha da mesma maneira que o ensaio anterior, sendo resumido na Tabela 6.16.

TABELA 6.16 – Divisão das atividades apontadas na operação de enleiramento de palhiço.

Código	Atividades	Tempo (h)	Quantidade de apontamentos	Percentual %
1	Enleiramento	4,40	90	80,7
4	Deslocamento	0,10	1	1,8
6	Manobra de cabeceira	0,76	87	14,0
9	Administrativo	0,19	4	3,5
Total		5,45	182	100,0

O enleiramento de palhiço transcorreu com poucas interrupções e não registrou qualquer tipo de quebra, diferentemente do ensaio anterior, cuja enleiradora apresentou quebra no rolamento da roda de apoio. O projeto deste implemento era substancialmente diferente dos projetos das enleiradoras tradicionais. O fabricante alegou que este equipamento poderia proporcionar menor índice de terra. Os demais dados obtidos, necessários para o cálculo dos índices do conjunto trator-enleiradora de palhiço encontram-se no Tabela 6.17.

TABELA 6.17 – Dados levantados no ensaio com a enleiradora de palhiço.

Dados	Valores
Tempo de produção da enleiradora - TPRel (h)	4,40
Tempo máquina da enleiradora - TMeI (h)	5,45
Combustível consumido pela enleiradora - LeI (L)	24,0
Quantidade de fardos transportados pelo veículo - QFv (fardos)	264
Quantidade total de fardos produzidos no ensaio - QFT (fardos)*	411
Massa líquida transportada - M veic (t)	102,4
Área total de recolhimento de fardos - AT (ha)	25,9

*estimativa com base em 16,77 ha enfardados, que produziu 266 fardos.

Com os dados obtidos, foi possível calcular os índices operacionais para o conjunto trator-enleiradora, reunidos na Tabela 6.18.

TABELA 6.18 – Índices levantados para o conjunto trator-enleiradora de palhico.

Índice	Resultado
Capacidade de campo efetiva (ha.h ⁻¹)	5,9
Capacidade de campo operacional, por hora (ha.h ⁻¹)	4,8
Consumo específico de combustível, por fardo (L.fardo ⁻¹)	0,06
Consumo específico de combustível, por área (L.ha ⁻¹)	0,93
Capacidade de produção efetiva (t.h ⁻¹)	36,2
Capacidade de produção operacional, por hora (t.h ⁻¹)	29,3

A enfardadora processou as leiras de palhico formadas pela enleiradora, quando foram apontados os tempos de duração das atividades conforme a Tabela 6.19.

TABELA 6.19 – Divisão das atividades apontadas na operação de enfardamento.

Código	Atividade	Tempo (h)	Quantidade de apontamentos	Percentual %
1	Enfardamento	4,59	78	75,5
2	Manobra de cabeceira	0,36	56	5,8
3	Desembuchamento	0,24	13	3,9
4	Deslocamento	0,10	2	1,7
5	Reparos Mecânicos	0,08	1	1,4
7	Reparo de Barbante	0,45	9	7,3
8	Administrativo	0,27	4	4,4
	Total	6,09	163	100,0%

Da mesma maneira que a operação de enleiramento, outros dados operacionais também foram coletados, sendo agrupados na Tabela 6.20.

TABELA 6.20 – Dados levantados no ensaio com a enfardadora de palhico.

Dados	Valores
Tempo de produção da enfardadora - TPRef (h)	4,59
Tempo máquina da enfardadora - TMef (h)	6,09
Combustível consumido pela enfardadora - Lef (L)	95,8
Área total de recolhimento de fardos - AT (ha)	16,77

Assim como no ensaio anterior, foi possível calcular o percentual de horas de operação sobre o total de horas apontadas da enfardadora, que corresponde à eficiência de campo. Este cálculo foi realizado para confirmar o valor de 70% que havia sido informado anteriormente pela empresa proprietária do equipamento. Este índice não foi replicado neste ensaio, onde o tempo de produção foi bastante alto em relação aos demais tempos apontados, indicando um percentual de utilização elevado, de 81,3%.(Tabela 6.21).

TABELA 6.21 - Cálculo do percentual de utilização da enfardadora.

Tempos apontados	Conjunto tratores-enfardadora
Tempo de produção (h)	4,59
Tempo de manobra (h)	0,36
Tempo de produção + manobra(h)	4,95
Tempo máquina (h)	6,09
Eficiência de campo (%)	81,28

Da mesma maneira que o conjunto trator-enleiradora de palhico, índices foram calculados com base nas informações levantadas no transporte. A Tabela 6.22 sintetiza os índices calculados para o conjunto trator-enfardadora a partir dos dados levantados em campo.

TABELA 6.22 – Índices levantados para o conjunto trator-enfardadora.

Índice	Resultado
Qtde. fardos produzidos por hectare (fardos.ha ⁻¹)	15,86
Capacidade de campo efetiva (ha.h ⁻¹)	3,7
Capacidade de campo operacional, por hora (ha.h ⁻¹)	2,8
Consumo específico de combustível, por fardo (L.fardo ⁻¹)	0,36
Consumo específico de combustível, por área (L.ha ⁻¹)	5,71
Capacidade de produção efetiva (t.h ⁻¹)	22,4
(fardo.h ⁻¹)	57,7
Capacidade de produção operacional, por hora (t.h ⁻¹)	16,9
(fardo. h ⁻¹)	43,6

Após o enfardamento, o conjunto trator-recolhedor de fardos iniciou o processo de coleta da biomassa, trazendo os fardos para junto do carreador. Assim como no caso dos

demais equipamentos, as atividades envolvidas no recolhimento de fardos também foram registradas em planilha específica, apresentadas na Tabela 6.23:

TABELA 6.23 – Divisão das atividades apontadas na operação de recolhimento de fardos.

Código	Atividade	Tempo (h)	Quantidade de apontamentos	Percentual %
1	Carregamento	4,73	58	51,8
2	Manobra de cabeceira	0,36	31	4,0
3	Deslocamento vazio	0,54	33	5,9
4	Deslocamento carregado	1,54	33	16,9
5	Descarga no carreador	1,17	33	12,8
8	Administrativo	0,39	7	4,3
9	Queda de fardo	0,39	2	4,3
Total		9,12	197	100,0

Os demais dados levantados no ensaio com o conjunto trator-recolhedor de fardos são apresentados na Tabela 6.24

TABELA 6.24 - Dados levantados para o conjunto trator-recolhedor de fardos.

Dados	Valores
Tempo total de produção do recolhedor de fardos - TPRrf (h)	4,73
Tempo máquina total do recolhedor de fardos - TMrf (h)	9,12
Combustível total consumido pelo recolhedor de fardos - Lrf (L)	93,0
Quantidade total de fardos transportados pelo veículo - QFv (fardos)	264
Quantidade total de fardos produzidos no ensaio - QFT (fardos)	266
Massa líquida total transportada - M veic (t)	102,4
Área total de recolhimento de fardos - AT (ha)	16,77

A quantidade de fardos produzidos, recolhidos e transportados para a usina foi de 264 unidades. Dois fardos foram descartados por rompimento de cordões.

Utilizando os dados levantados em campo e os dados obtidos do transporte dos fardos, foram calculados os índices de desempenho para o conjunto trator-recolhedor de fardos que se encontram resumidos no Tabela 6.25.

TABELA 6.25 – Índices levantados para o conjunto trator-recolhedor de fardos.

Índice	Resultado
Capacidade de campo efetiva (ha.h ⁻¹)	3,6
Capacidade de campo operacional, por hora (ha.h ⁻¹)	1,8
Consumo específico de combustível, por fardo (L.fardo ⁻¹)	0,35
Consumo específico de combustível, por área (L.ha ⁻¹)	5,55
Capacidade de produção efetiva (t.h ⁻¹)	21,7
(fardo.h-1)	55,9
Capacidade de produção operacional, por hora (t.h ⁻¹)	11,2
(fardo.h-1)	28,9

Neste sistema foram realizadas três viagens do pentaminhão à usina, por trajeto interno às fazendas, com apontamento de registros por unidade de transporte (caminhão plataforma ou reboque). Em cada unidade foram alocados 18 fardos (3 camadas com 6 fardos), exceto no último reboque do último caminhão onde foram alocados apenas 12 fardos. Os resultados são apresentados na Tabela 6.26, resumidos por veículo.

TABELA 6.26 – Dados relativos ao transporte dos fardos.

Viagem	Qtde. fardos transportados (unid.)	Tempo de carregamento (min.)	Carga líquida (t)
1	90	55	37,1
2	90	61	34,2
3	84	60	31,1
Total	264	176	102,4

Considerando as três viagens, o tempo médio de carregamento por fardo foi de 0,67 minuto.fardo⁻¹, para uma massa média de 388,0 kg.fardo⁻¹. Uma vez que as carrocerias de transporte de cana inteira estavam sendo utilizadas, não era necessário fazer a amarração dos fardos como havia sido feito com o caminhão prancha no ensaio anterior.

Em relação às impurezas minerais presentes nos fardos, 34 amostras foram coletadas, sendo as médias apresentadas na Tabela 6.27.

TABELA 6.27 – Ensaio de impureza nos fardos.

Estatísticas	Massa total amostra (g)	Massa impurezas minerais (g)	Perc. imp min (%)	Umidade fardo (%)
Média	203,5	21,4	10,5	6,5
Desvio Padrão	46,0	21,3	6,4	1,2
Coeficiente de variação (%)	22,6	99,3	60,8	17,8

A impureza mineral nos fardos apresentou grande variabilidade em função da presença pontual de raízes e conseqüentemente terra em algumas amostras. Também foram levantadas 34 amostras para mensurar o potencial de palhiço na área de enfardamento (Palhiço total). A Tabela 6.28 apresenta o total de palhiço disponível, em base úmida.

TABELA 6.28 – Quantidade total de palhiço disponível e umidade.

Estatísticas	Quantidade total de palhiço disponível (b.u.) (t.ha⁻¹)	Umidade (%)
Média	11,04	7,9
Desvio padrão	5,02	2,2
Coeficiente de variação	45,5	27,6

Utilizando-se os valores médios acima, 11,04 t.ha⁻¹ (palhiço total disponível, em base úmida) e 7,9% (umidade) foi obtida a quantidade total de palhiço disponível, em base seca, cujo resultado foi de 10,2 t.ha⁻¹(b.s.). A quantidade de palhiço enfardado em base úmida, por hectare, foi obtida em função dos fardos enviados à usina:

Massa média do fardo	388 kg
Quantidade de fardos produzidos por hectare	15,86 fardos.ha ⁻¹
Palhiço enfardado, (b.u.)	6,2 t.ha ⁻¹

Utilizando-se a umidade média das amostras de fardos (6,5%), foi possível obter o palhiço enviado à usina no formato de fardos em base seca (b.s.) de 5,7,1 t.ha⁻¹. De posse dos dados de palhiço enviado a usina e do palhiço total, calculou-se por diferença o palhiço remanescente sobre o solo, em base seca:

Produção total de palhiço, (b.s.)	10,2 t.ha ⁻¹
Palhiço enfardado, (b.s.)	5,7 t.ha ⁻¹
Palhiço remanescente sobre o solo, (b.s.)	4,5 t.ha ⁻¹

A eficiência de recolhimento de palhiço do sistema foi obtida por meio da Equação 5.36, onde, do total de palhiço inicialmente disponível de $10,2 \text{ t.ha}^{-1}$, a quantidade de $5,7 \text{ t.ha}^{-1}$ foi enfardada, ou seja, a eficiência de recolhimento foi de 55,9%.

6.1.4 Comparação Entre os Ensaios de Enfardamento

Os ensaios de enfardamento puderam ser comparados entre si quanto aos equipamentos utilizados com a mesma função. A Tabela 6.29 apresenta uma comparação dos índices de desempenho da operação de enleiramento de palhiço para os dois equipamentos.

TABELA 6.29 – Comparação dos índices da enleiradora de palhiço.

Índices referentes ao enleiramento do palhiço	Enleiradora	
	Bowman	New Holland
Cap. de campo efetiva (ha.h^{-1})	5,5	5,9
Cap. de campo operacional, por hora (ha.h^{-1})	3,0	4,8
Cons. específico de combustível, por fardo (L.fardo^{-1})	0,11	0,06
Cons. específico de combustível, por área (L.ha^{-1})	1,97	0,93
Cap. de produção efetiva (t.h^{-1})	42,2	36,2
Cap. de produção operacional, por hora (t.h^{-1})	23,4	29,3

As capacidades de campo efetiva resultaram em médias numericamente próximas, com diferença de 7,3% a maior para a enfardadora New Holland. Em contrapartida, a capacidade de produção efetiva foi mais favorável à enfardadora da Bowman em 16,6%. Atribui-se à maior disponibilidade de palhiço (t.ha^{-1}) na área do primeiro ensaio o melhor desempenho da enleiradora Bowman.

Os consumos de combustível apresentaram grande variação. As capacidades operacionais foram influenciadas pelas horas gastas em outras atividades além do enleiramento, que correspondeu ao total de 44,7% dos apontamentos da enleiradora Bowman e apenas 19,3% para a enleiradora New Holland.

A avaliação das capacidades operacionais deveria ser realizada por um período mais longo. Idealmente ela deve ser realizada por meio de registros em computador de bordo durante a operação comercial dos equipamentos, em sistemas designados para o controle da frota (controle de operadores com motivos de parada).

A comparação dos índices da enfardadora de palhiço obtidos nos dois ensaios é dada pela Tabela 6.30.

TABELA 6.30 – Comparação dos índices da enfardadora de palhiço.

Índices referentes ao enfardamento de palhiço	Enfardadora	
	Vicon	New Holland
Qtde. fardos produzidos por hectare (fardos.ha ⁻¹)	18,6	15,9
Capacidade de campo efetiva (ha.h ⁻¹)	4,2	3,7
Cap. de campo operacional, por hora (ha.h ⁻¹)	2,6	2,8
Cons. específico de combustível, por fardo (L.fardo ⁻¹)	0,36	0,36
Cons. específico de combustível, por área (L.ha ⁻¹)	6,62	5,71
Cap. produção efetiva (t.h ⁻¹)	32,4	22,4
(fardo.h ⁻¹)	78,3	57,7
Cap. produção operacional, por hora (t.h ⁻¹)	19,6	16,9
(fardo.h ⁻¹)	47,4	43,6

A Tabela 6.30 indica a quantidade de fardos formados por hectare para os dois ensaios, 18,6 fardos.ha⁻¹ com a enfardadora Vicon e 15,9 fardos.ha⁻¹ com a enfardadora New Holland. A massa média dos fardos foi de 413,9 kg e 388,0 kg para cada equipamento, respectivamente, o que acentua ainda mais a diferença da quantidade de palhiço para os dois ensaios.

A capacidade de campo efetiva foi superior para a enfardadora Vicon, com 4,2 ha.h⁻¹, que corresponde a 13,5% a mais em relação à enfardadora New Holland. Da mesma forma, a capacidade de produção efetiva também foi superior para a enfardadora Vicon, com 32,4 t.ha⁻¹.

Os consumos de combustível indicaram valores numéricos próximos para os equipamentos. A maior diferença foi observada para o consumo específico por área, que indicou um consumo maior em 15,9% para a enfardadora Vicon.

O percentual de tempos efetivamente em operação (eficiência de campo) variou entre os dois ensaios, sendo de 60,7% para a enfardadora Vicon e 75,5 % para a enfardadora New Holland. A diferença entre os percentuais interferiu nos índices de capacidade operacional dos equipamentos pois o tempo máquina apresentou uma proporção diferenciada entre o tempo de produção e os tempos de preparação e interrupção. Neste caso, a enfardadora New Holland apresentou maior eficiência operacional. A obtenção de índices

de capacidade operacional mais confiáveis requer maior tempo de coleta de dados, preferencialmente com base em controles de frota, conforme comentado para as enleiradoras.

Os índices para o carregamento e transporte de fardos encontram-se resumidos na Tabela 6.31. Dois caminhões diferentes foram utilizados nos ensaios: o caminhão prancha no primeiro ensaio (carregamento direto) e o pentaminhão com carroceria de cana inteira no segundo ensaio (sistema com transbordo interno).

TABELA 6.31 – Comparação de índices do carregamento e transporte.

Índices referentes ao carregamento e transporte de fardos	Sistema com carregamento direto	Sistema com transbordo interno
Massa média do fardo (kg)	413,9	388,0
Fardos transportados por viagem (fardos)	49 (prancha)	90 (pentaminhão)
Tempo de carregamento por fardo (min)	0,98	0,67
Percentual de impurezas minerais (%)	14,3	10,5
Umidade do fardo (%)	7,6	6,5

O uso de caminhões diferentes implicou na variação da quantidade de fardos transportados por viagem. Em virtude de os fardos estarem agrupados, nota-se uma grande diferença no tempo de carregamento por fardo em comparação com o sistema de carregamento direto: $0,98 \text{ minuto.fardo}^{-1}$ para o sistema com carregamento direto e $0,67 \text{ minuto.fardo}^{-1}$ para o carregamento com transbordo interno.

O percentual de impurezas minerais também foi considerado alto. Este é um índice de alta criticidade para o processamento industrial e a presença da terra nos fardos é resultante das operações do sistema de enleiramento de palhiço e do próprio enfardamento. Em relação ao enleiramento, os dois ensaios utilizaram equipamentos com elementos ativos diferentes. A enleiradora da Bowman (Figura 6.6) possuía mecanismo com hastes metálicas que promoviam o arraste contínuo do palhiço para a formação da leira. Já a enleiradora da New Holland possuía discos e hastes em material polimérico (Figura 6.7) que movimentavam o palhiço revirando-o. Acredita-se que o projeto da enleiradora do segundo ensaio tenha contribuído para o índice de terra ter se apresentado menor.



FIGURA 6.6 – Enleiradora de palhico fabricada pela Bowman.



FIGURA 6.7 – Enleiradora de palhico New Holland.

A quantidade de biomassa trabalhada no campo também era diferente na comparação dos dois ensaios. A Tabela 6.32 resume as parcelas que compõem o palhico total, em base seca (b.s.) para cada sistema.

TABELA 6.32 – Comparação dos índices referentes ao palhicho.

Índices referentes ao palhicho	Sistema com carregamento direto	Sistema com transbordo de fardos
Palhicho remanescente no solo, b.s. (t.ha ⁻¹)	9,1	4,5
Palhicho enfardado, b.s. (t.ha ⁻¹)	7,1	5,7
Produção total de palhicho, b.s. (t.ha ⁻¹)	16,2	10,2
Eficiência de recolhimento (%)	43,8	55,9

Nota-se que o primeiro ensaio possuía grande quantidade de biomassa disponível, sendo recolhido 43,8% do total de 16,2 t.ha⁻¹. Já o segundo ensaio recolheu apenas 5,7 t.ha⁻¹, que percentualmente corresponde a 55,9% do total disponível.

Adicionalmente, no ensaio de colheita, para a situação de colheita convencional, com o extrator primário operando a 850 rpm, a quantidade de palhicho sobre o solo que resultou da colheita mecanizada foi 15,9 t.ha⁻¹. Esse valor foi numericamente muito próximo à quantidade de palhicho disponível sobre o solo do primeiro ensaio de enfardamento, que resultou em 16,2 t.ha⁻¹, realizado em área de colheita convencional.

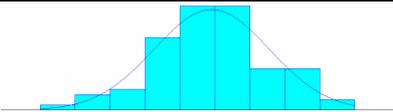
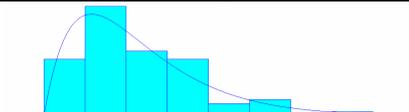
6.2 Simulação

Os ensaios de campo subsidiaram o levantamento de dados para representar as operações de colheita mecanizada e de aproveitamento de biomassa no modelo de simulação. Foram utilizadas distribuições de probabilidade para a representação das operações de colheita mecanizada e de recolhimento de fardos.

Na colheita mecanizada, uma vez que a análise de variância apresentou diferença estatística apenas em relação à rotação do extrator primário, agrupou-se os tempos de colheita para uma mesma rotação, independente da quantidade de facas dos rolos picadores. Assim, duas distribuições de probabilidade foram determinadas para representar os tempos de colheita: para rotação de 650 rpm (colheita com limpeza parcial) e para rotação de 850 rpm (colheita com limpeza convencional).

Utilizando-se o aplicativo *Input Analyzer*, ferramenta auxiliar do *software Arena*, obteve-se as distribuições teóricas de probabilidade apresentadas no Quadro 6.1, observadas quanto à aderência por meio do erro quadrático médio e dos testes estatísticos de *Chi quadrado* e *Kolmogorov-Smirnov (KS)*, com intervalo de confiança de 95%.

QUADRO 6.1 - Distribuições de probabilidade referentes ao tempo de colheita.

Parâmetros	Distribuições de probabilidade do tempo de colheita (min)	
	850 rpm	650 rpm
Histograma		
Distribuição	NORM(16.2,2.75)	8+ERLA(1.45,2)
Erro quadrático	0,006	0,007
Teste Chi ²	<i>p value</i> = 0,34	<i>p value</i> = 0,208
Teste KS	<i>p value</i> > 0,15	<i>p value</i> > 0,15

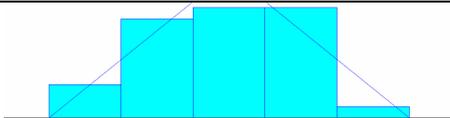
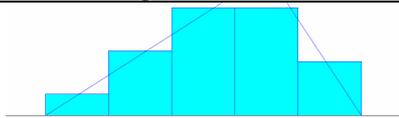
Para as duas situações operacionais, o erro quadrático mostrou-se baixo, inferior a 1%, e os testes estatísticos de *Chi²* e *KS* apresentaram valores adequados, com *p value* > 0,1, o que indica que as curvas podem ser candidatas à representação das operações. (FREITAS FILHO, 2001).

Segundo Lapponi (2005, p.355) o *p value* é a “probabilidade de qualquer média da amostra ser mais extrema do que a média da amostra X extraída para o teste, sem rejeitar a hipótese nula.”.

As próprias figuras obtidas indicam uma boa aderência entre o histograma e a distribuição de probabilidade candidata a representar o evento. A comparação entre o histograma e a curva já representa um indício de aceitação da distribuição de probabilidade.

Os ensaios de campo também possibilitaram o levantamento de distribuições de probabilidade para representar duas atividades da operação de recolhimento de fardos: o tempo de ciclo do recolhedor de fardos, referente à coleta de 8 fardos, e o tempo de descarregamento de fardos ao lado do carreador. As distribuições de probabilidade para as duas atividades são apresentadas no Quadro 6.2, com os parâmetros estatísticos referentes à qualidade de ajuste.

QUADRO 6.2 - Distribuições de probabilidade referentes à operação de recolhimento de fardos

Parâmetros	Distribuições de probabilidade do recolhimento de fardos (min)	
	Coleta de fardos	Descarregamento de fardos
Histograma		
Distribuição	TRIA(8,13,18)	TRIA(0.57,2.5,3.31)
Erro quadrático	0,011	0,003
Teste Chi ²	<i>p value</i> = 0,326	<i>p value</i> = 0,551
Teste KS	<i>p value</i> > 0,15	<i>p value</i> > 0,15

Após a conclusão do modelo de simulação, vinculado às planilhas eletrônicas, e a inserção dos dados obtidos nos ensaios de campo, rodadas de simulação preliminares foram conduzidas para a determinação do período transiente a ser descartado do início da simulação (tempo de *warm-up*), além da determinação do período total a ser simulado. A ferramenta *Output Analyzer*, vinculada ao *software Arena*, foi utilizada com esse intuito. Nestas rodadas preliminares considerou-se o sistema de colheita de cana convencional com enfardamento e carregamento do palhicho enfardado diretamente em caminhões prancha.

Para a determinação do período transiente do início da simulação, executou-se uma experimentação piloto, com duração de 30 dias, nos quais se observou o comportamento da variável “tempo de permanência do veículo na usina”, considerada representativa para avaliação do sistema. Como premissa para a avaliação, estabeleceu-se que variações de até 5% em torno de sua média seriam adequadas para o sistema, para um intervalo de confiança de 95%.

O critério para determinação do período transiente foi feito pela análise da média móvel da variável escolhida, com agrupamento de 100 em 100 registros. A Figura 6.8 apresenta o comportamento dos registros da variável, bem como da média móvel, para os primeiros 20 dias da simulação piloto.

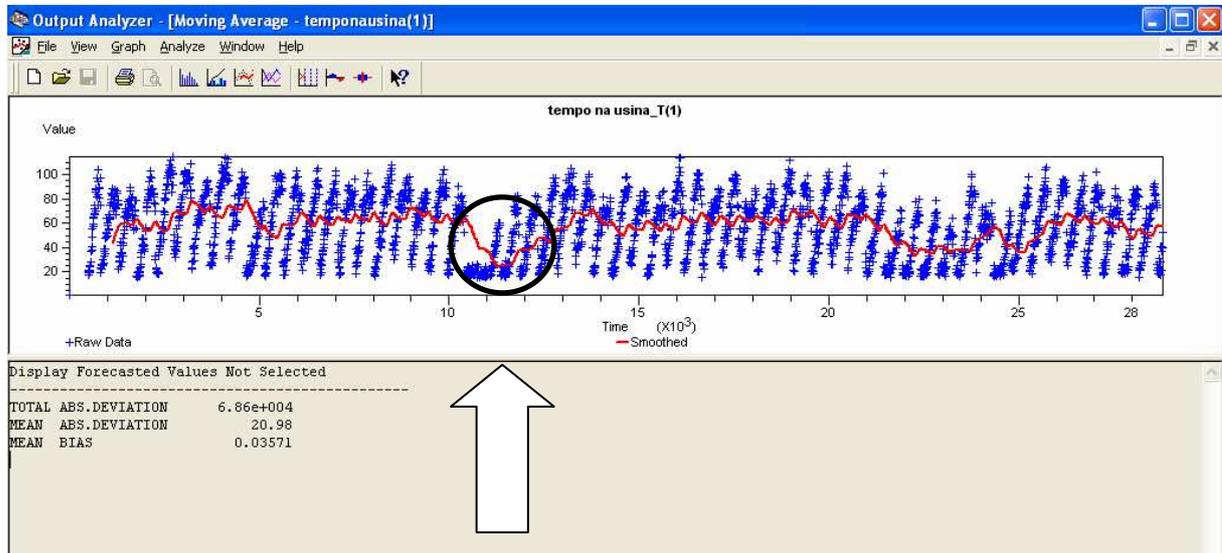


FIGURA 6.8 – Média móvel da variável tempo de permanência do veículo na usina.

Observou-se que a média móvel apresentou um período de descontinuidade em torno de 11.000 minutos, indicado pela seta. A partir desse tempo, assumiu-se que o modelo de simulação entrou em equilíbrio dinâmico (*steady state*). Visando adotar um valor conservador, considerou-se que o período transiente, cujas estatísticas do modelo de simulação foram descartadas, referia-se a 10 dias, ou seja, a 14.400 minutos.

Visando determinar o período da simulação, utilizou-se o método do loteamento, quando foi observada a correlação dos registros sucessivos da variável “tempo de permanência do veículo na usina” para diversos tamanhos de lote. Este procedimento também foi feito por meio do *software Output Analyzer*, comando *Correlogram*. Para lotes formados por 19 observações, indicada na Figura 6.9 pelas setas, a análise apresentou baixa correlação, ou seja, os registros sucessivos se mostraram independentes para lotes de 19 observações. A influência do “tempo de permanência na usina” de um veículo é praticamente nula em relação ao “tempo de permanência na usina” registrado 19 posições anteriores em uma série histórica. Assim, o longo período da simulação, após o descarte do período transiente, foi subdividido em lotes com essa quantidade mínima de observações.

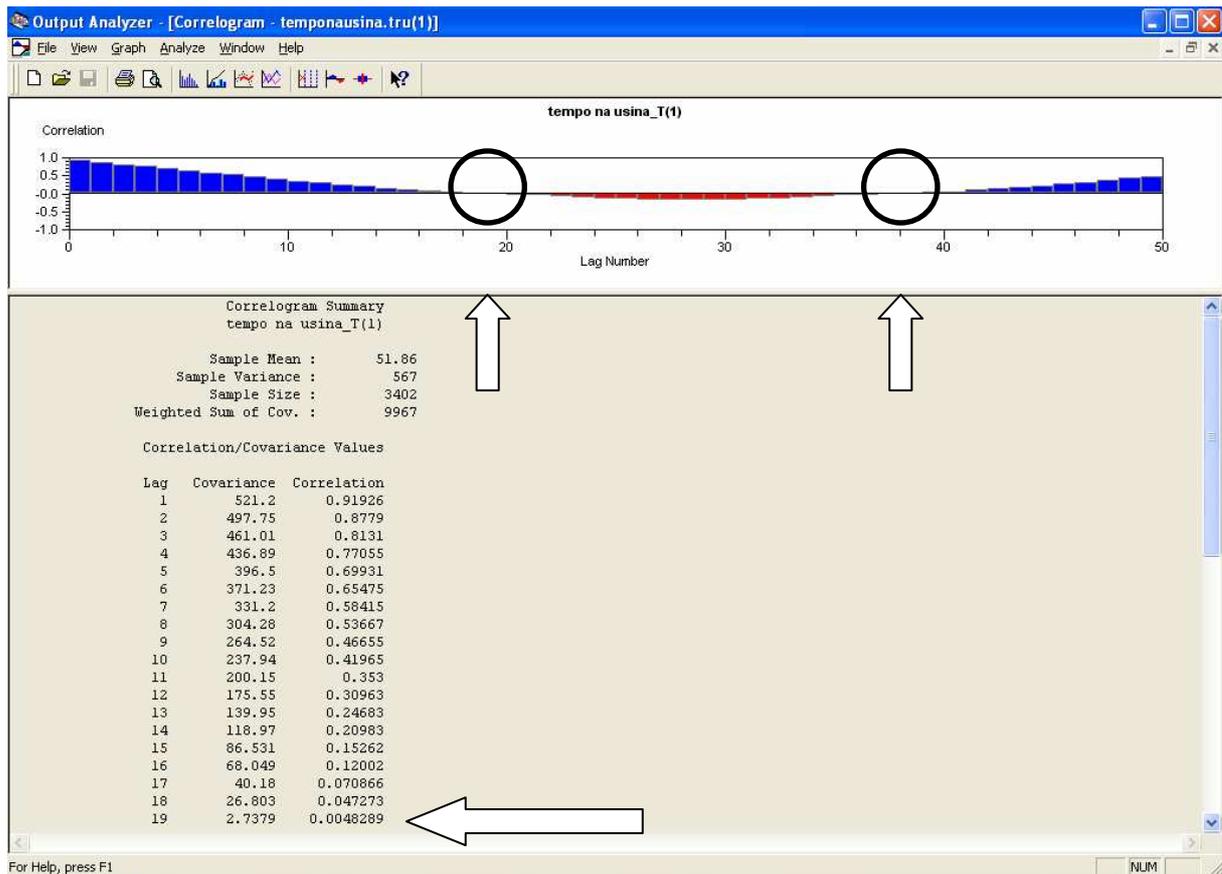


FIGURA 6.9 – Indicação da correlação da variável tempo de permanência do veículo na usina.

Conforme indica a literatura (FREITAS FILHO, 2001), o tamanho do lote mínimo costuma ser multiplicado por um fator 10 para garantir a independência das médias observadas nos registros. Assim, 190 observações por amostra foram definidas para compor cada lote.

A simulação piloto de 30 dias efetuou 5.067 registros da variável de referência “tempo de permanência do veículo na usina” em um período de 43.200 minutos simulados. Assim, o intervalo entre registros sucessivos da variável de referência foi de 8,52 minutos entre observações.

Da equação empírica 6.1, é possível calcular o tempo total de simulação, sendo que a quantidade de amostras desejadas foi selecionada seguindo-se sugestão da literatura que indica que uma amostra de 30 observações é suficiente para se conhecer sua variabilidade e estimar intervalos de confiança no entorno da média (FREITAS FILHO, 2001).

$$TS = TD + (N * Q * TA) \quad (\text{Equação 6.1})$$

Onde:

TS = Tempo de simulação

TD = Tempo de descarte

N = Quantidade de amostras

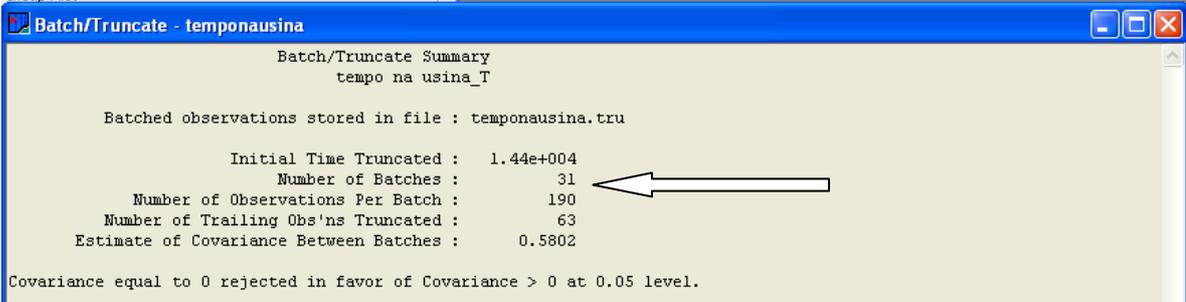
Q = Quantidade de observações por amostra

TA = Tempo de simulação de cada amostra

Atribuindo-se valores aos termos da equação, obtém-se:

$$TS = 14.400 \text{ minutos} + (30 * 190 * 8,52) = 62.964 \text{ minutos.}$$

Arredondando-se o valor obtido para uma quantidade inteira de dias, obtém-se TS = 64.800 min, referente a uma simulação de 45 dias. Simulando-se novamente o sistema para o período indicado, confirma-se a formação de 31 lotes com 190 observações, conforme indicam as Figuras 6.10 e 6.11. Devido ao arredondamento do período de simulação, houve a geração de um lote adicional de 190 observações.



```

Batch/Truncate Summary
tempo na usina_T

Batched observations stored in file : temponausina.tru

Initial Time Truncated : 1.44e+004
Number of Batches : 31
Number of Observations Per Batch : 190
Number of Trailing Obs'ns Truncated : 63
Estimate of Covariance Between Batches : 0.5802

Covariance equal to 0 rejected in favor of Covariance > 0 at 0.05 level.

```

FIGURA 6.10 – Indicação da quantidade de lotes formados em 45 dias de simulação.

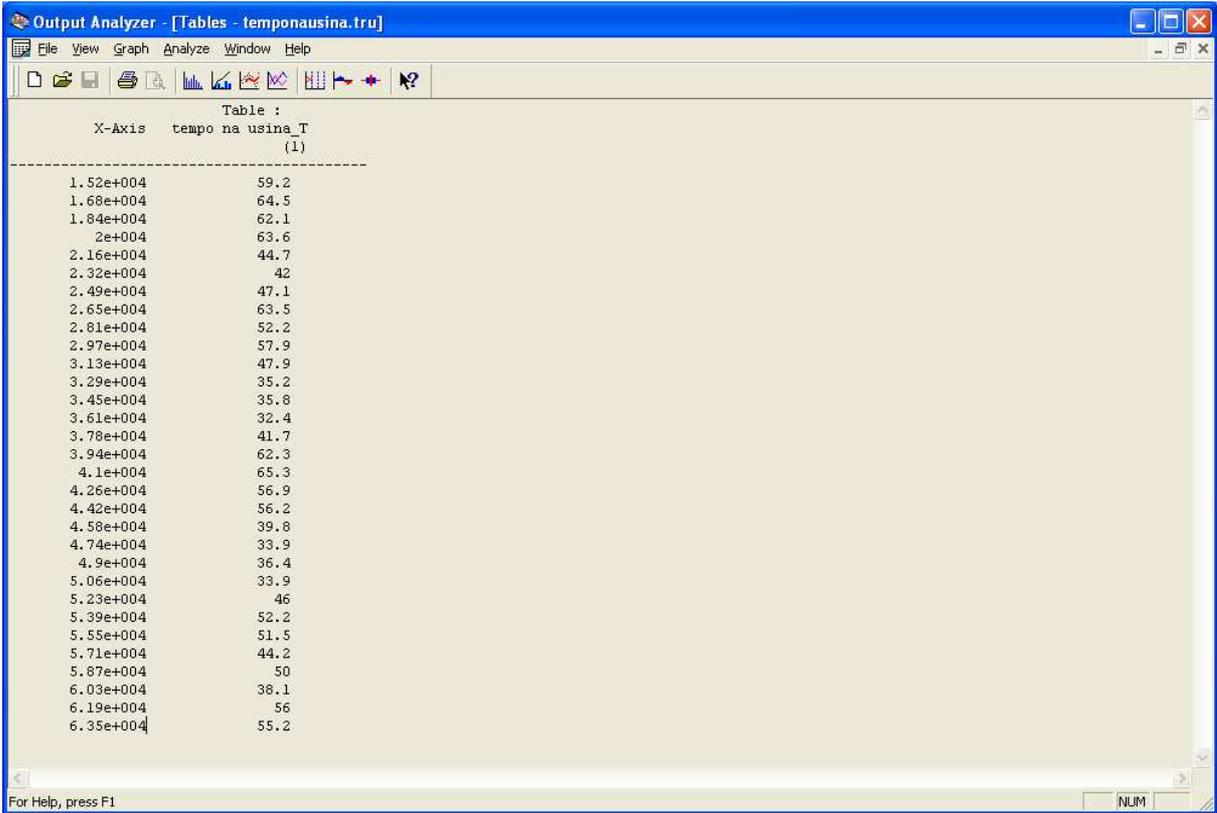


FIGURA 6.11 – Valor médio da variável de referência em cada lote formado.

Finalmente, o intervalo de confiança da variável de referência “tempo de permanência do veículo na usina” foi obtido com base nas 31 amostras de lotes formados. No caso, o semi-intervalo de confiança desta variável foi de 3,85 minutos no entorno da média de 49,3 minutos, conforme apresentado na Figura 6.12.

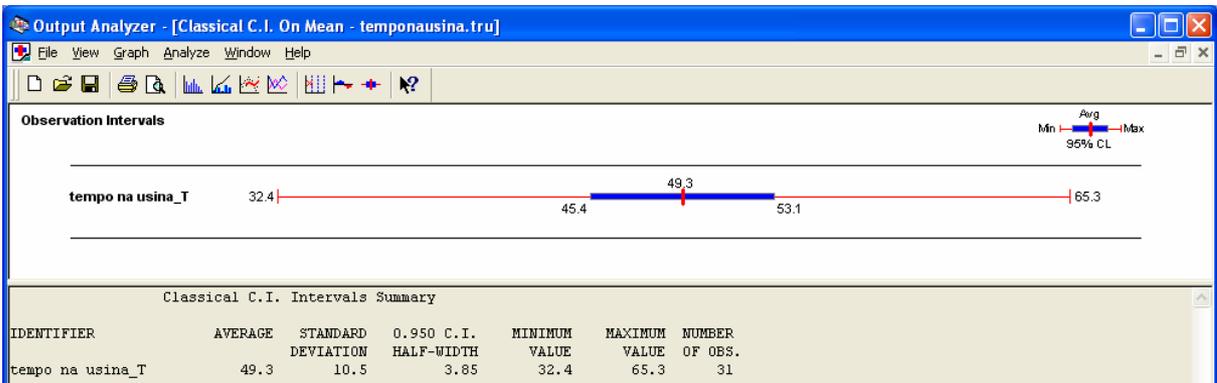


FIGURA 6.12 – Intervalo de confiança de 95% no entorno da média para o período de 45 dias.

Analisando-se o resultado, nota-se que o valor do semi-intervalo de confiança, de 3,85 minutos é superior ao limite que previamente havia sido estipulado de 5% no entorno da média, que no caso é 2,46 minutos (5% de 49,3 minutos). Assim, é necessário encontrar um novo tamanho da amostra para atender ao limite estabelecido. Este procedimento foi feito por meio da equação empírica 6.2, apresentada por FREITAS FILHO (2001):

$$n^* = [n(h/h^*)^2] \quad (\text{Equação 6.2})$$

Onde:

n^* = nova estimativa para n

n = quantidade de amostras já utilizadas (31 amostras)

h = semi intervalo de confiança já obtido (3,85 minutos)

h^* = semi intervalo de confiança desejado (2,46 minutos)

$$n^* = [31(3,85/2,46)^2] = 75,9 \text{ amostras, arredondado para } 76 \text{ amostras}$$

Aplicando-se novamente a equação 6.1 encontra-se o novo tempo de simulação (TS) de 137.428,8 minutos correspondente a um período de 95,4 dias. Este período foi arredondado para 144.000 minutos, que corresponde ao período de 100 dias. O modelo foi executado para o novo período e o novo intervalo de confiança foi encontrado, apresentado na Figura 6.13.

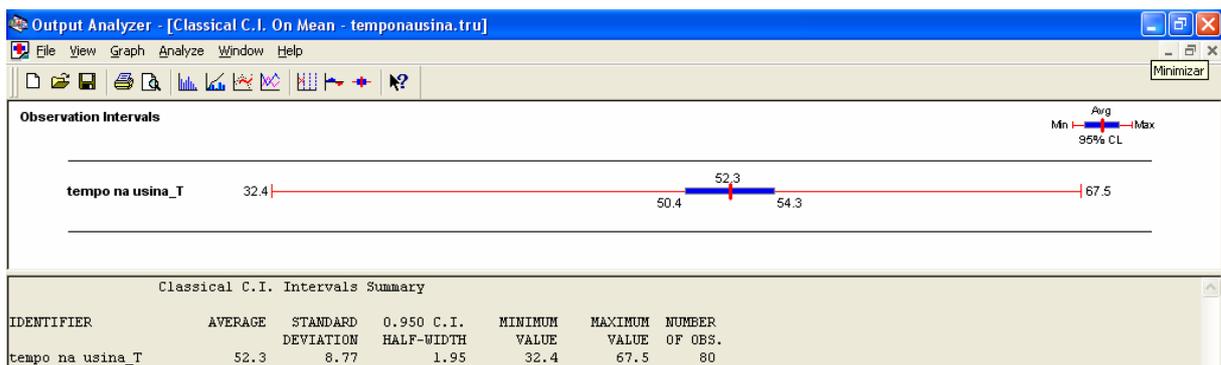


FIGURA 6.13 – Intervalo de confiança de 95% no entorno da média para o período de 100 dias.

Analisando-se o resultado do intervalo de confiança, nota-se que o valor do semi-intervalo de confiança, de 1,95 minutos é inferior ao limite de 5% no entorno da média, que no caso é 2,61 minutos (5% de 52,3 minutos). Isto significa que o objetivo de precisão foi alcançado, ou seja, que a variável “tempo de permanência do veículo na usina” encontra-se no intervalo da média $\pm 5\%$ com 95% de confiança.

Uma vez que o tempo de simulação foi baixo, inferior a 1,5 minuto, estendeu-se o tempo de simulação para contemplar o período completo da safra, com a duração de 167 dias úteis. Com a ampliação do tempo simulado, o tempo de execução da simulação aumentou para 2,5 minutos.

Após a conclusão do modelo e a determinação do período transiente e do tempo de simulação, o modelo foi utilizado para executar dois estudos:

Estudo A) Comparação dos sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa, configurados a partir das condições operacionais dos ensaios de campo.

Estudo B) Comparação de sistemas de colheita de cana e aproveitamento de biomassa em igualdade de condições operacionais.

6.2.1 ESTUDO A - Comparação dos Sistemas de Colheita de Cana e Aproveitamento de Biomassa, Configurados a Partir das Condições Operacionais dos Ensaios de Campo.

Foram simulados três sistemas de colheita de cana-de-açúcar e aproveitamento da biomassa para uma usina com moagem de dois milhões de toneladas de cana na safra, a partir da reprodução das condições operacionais acompanhadas nos ensaios de campo.

O intuito do estudo foi avaliar a adequação do modelo de simulação para representar tais sistemas, tanto do ponto de vista operacional quanto de custos. Os sistemas foram configurados a partir dos dados de desempenho dos equipamentos observados nos ensaios de campo. Os sistemas avaliados foram:

- A1) colheita com limpeza convencional e aproveitamento da biomassa via enfardamento e carregamento de fardos diretamente em caminhões prancha;
- A2) colheita com limpeza convencional e aproveitamento da biomassa via enfardamento, com transbordo interno de fardos e carregamento dos fardos em pentaminhões ao lado da área de recolhimento;
- A3) colheita com limpeza parcial e transporte de cana e palhiço juntos em rodotrens e separação do palhiço na usina.

Nestes cenários, a quantidade de equipamentos de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar (colhedoras, tratores-transbordos, caminhões e carretas reserva na usina e no campo) foi mantida constante, conforme indicado na Tabela 6.33.

TABELA 6.33 – Quantidade de equipamentos de CCT utilizada na simulação.

Tipo de equipamento	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4
Colhedora	5	5	5	5
Trator-transbordo	10	10	10	10
Rodotrem	4	5	5	6
Conjunto reserva de rodotrem no campo	1	1	1	1
Conjunto reserva de rodotrem na usina	1	1	1	1

As quatro frentes foram configuradas para a produção da mesma quantidade de cana-de-açúcar. No entanto, uma vez que variou-se a distância média das frentes, considerou-se quantidades diferentes de veículos nas frentes, alocando mais caminhões para as frentes mais distantes da usina.

Os equipamentos de manuseio de palhiço (conjunto trator-enleiradora, conjunto trator-enfardadora, conjunto trator-recolhedor de fardos, carregadora, veículos e carretas reserva no campo e na usina) foram alocados na razão de um equipamento por frente, da mesma maneira como ocorreram os ensaios de campo.

Os resultados completos operacionais da simulação dos três cenários deste estudo A1, A2 e A3, são apresentados respectivamente nos APÊNDICES B, C e D, e o Quadro 6.3 resume as principais informações e resultados.

QUADRO 6.3 – Resumo dos resultados das simulações para o Estudo A.

Informações e Resultados	Cenário		
	A1	A2	A3
Sistema de colheita de cana	Limpeza convencional	Limpeza convencional	Limpeza parcial
Sistema de recolhimento de palhiço	Enfardamento	Enfardamento	Cana e palhiço juntos
Sistema de carregamento de palhiço	Carregamento direto	Recolhimento de fardos e carregamento no carreador	Cana e palhiço processados juntos
Sistema de processamento de palhiço na usina	Triturador de fardos	Triturador de fardos	Estação de limpeza a seco
Sistema de transporte de palhiço	Prancha (fardos)	Pentaminhão (fardos)	Rodotrem (cana + palhiço)
Produção de cana-de-açúcar (t.dia ⁻¹) (t.safra ⁻¹)	12.554,6 2.096.618	12.525,9 2.091.827	11.415,2 1.906.339
Carga de cana transportada por viagem (t)	73,7	73,7	52,1
Percentual de palhiço na carga – b.u. (%)	5,4	5,4	12,7
Produção de palhiço – base úmida (t.dia ⁻¹) (t.safra ⁻¹)	827,6 138.218	748,4 124.990	724,9 121.053
Umidade do palhiço (%)	7,6	6,5	48,8
Produção de palhiço – base seca (t.dia ⁻¹) (t.safra ⁻¹)	764,7 127.713	699,8 116.865	371,1 61.955
Fardos produzidos (fardos.dia ⁻¹) (fardos.safra ⁻¹)	2.000 334.000	1.929 322.143	- -
Massa do fardo (kg)	413,9	388,0	-
Custo			
CCT (R\$.t cana ⁻¹)	18,57	18,60	20,40
Palhiço (R\$.t palhiço ⁻¹) em base seca	44,38	61,23	32,77

Os custos obtidos para os três cenários indicaram que o cenário A3 apresentou o valor mais alto para o corte, carregamento e transporte (20,40 R\$.t cana⁻¹) e o valor mais baixo para o palhiço (32,77 R\$.t palhiço⁻¹, em base seca).

A diferença de custo do palhiço a menor do cenário A3 em relação aos outros dois cenários deve-se à estrutura adicional de equipamentos dos cenários A1 e A2, referente às enleiradoras, enfardadoras e veículos, dedicados ao processamento do palhiço. No cenário A2, a estrutura para o manuseio de palhiço é maior, devido à utilização do conjunto trator-recolhedor de fardos, cujos custos são totalmente incorporados ao palhiço.

No cenário A3 esta estrutura é inexistente, uma vez que cana e palhiço são processados juntos até serem separados na estação de limpeza a seco, na usina. Em contrapartida, a presença do palhiço juntamente com a cana, tornou o custo de CCT maior, devido à menor densidade. Nos cenários A1 e A2, com sistema de colheita de cana com limpeza convencional, o palhiço na carga corresponde a 5,4% em massa enquanto no cenário A3 a quantidade de palhiço na carga se eleva a 12,7%.

É importante ressaltar que os resultados de produção e custo deste estudo devem ser observados com muita cautela, pois nota-se que o cenário A3 não atingiu a cota inicialmente estipulada de 12.000 t de cana.dia⁻¹ e de 2.10⁶ t de cana.safra⁻¹, discussão que é abordada ao longo do Estudo B.

Reforça-se também que este primeiro estudo visou reproduzir as condições operacionais verificadas nos testes de campo, para avaliação da representatividade do modelo de simulação e para auxiliar o entendimento dos sistemas de processamento de cana-de-açúcar e biomassa. Nos ensaios de campo as características operacionais dos ensaios não foram uniformes, o que requer cuidado na análise comparativa dos cenários. Como exemplo, o sistema de transporte de fardos diferiu significativamente, com o uso de caminhões prancha no cenário A1 e pentaminhões no cenário A2, com diferenças operacionais e conseqüentemente de custos significativas, uma vez que o volume de fardos transportados por viagem variou de 49 fardos, no caso do caminhão prancha, para 90 fardos no transporte por pentaminhões. O mesmo ocorreu para as diferenças de disponibilidade de palhiço, onde no primeiro ensaio de campo (cenário A1) registrou-se 16,2 t palhiço.ha⁻¹ e no segundo ensaio (cenário A2) obteve-se 10,2 t palhiço.ha⁻¹, o que interfere na quantidade de biomassa disponível para enfardamento.

A partir do Quadro 6.3, nota-se também que a produção de palhiço em base seca no cenário A3 foi da ordem de 62.000 t.safra⁻¹ enquanto nos cenários A1 e A2, as produções foram de 128.000 e 117.000 t.safra⁻¹, respectivamente.

Mesmo considerando as variações operacionais observadas nos ensaios de campo, os dois sistemas de processamento de palhiço diferem substancialmente. Um dos fatores que interferem na menor entrega de palhiço no cenário A3 é a eficiência de separação da estação de limpeza a seco, cujo valor utilizado foi de 50%, como reflexo da dificuldade de separação física da cana e do palhiço. Este percentual já justifica de antemão as diferenças de produção de palhiço dos três cenários, obtidas por meio das simulações.

Com foco no desempenho das máquinas utilizadas, a Tabela 6.34 apresenta um resumo dos principais resultados (capacidades e percentuais de ocupação médios dos recursos), registrados para os três cenários do Estudo A.

TABELA 6.34 – Resultados operacionais médios para o Estudo A.

Resultados operacionais médios	Cenários		
	A1	A2	A3
Colhedora de cana			
Quantidade	5	5	5
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	627,7	626,3	570,8
Percentual de utilização, (%)	38,3	38,2	33,2
Trator transbordo			
Quantidade	10	10	10
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	313,9	313,1	285,4
Percentual de utilização, (%)	39,7	39,6	43,0
Conjunto trator-enleiradora de palhiço			
Quantidade	1	1	-
Capacidade de campo operacional, (ha.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	27,0	41,7	-
Percentual de utilização, (%)	40,9	59,0	-
Conjunto trator-enfardadora de palhiço			
Quantidade	1	1	-
Capacidade de campo operacional, (ha.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	27,0	30,8	-
Percentual de utilização, (%)	53,5	69,3	-
Conjunto trator-recolhedor de fardos			
Quantidade	-	1	-
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	-	187,1	-
Percentual de utilização, (%)	-	75,9	-
Carregadora de fardos			
Quantidade	1	1	-
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	206,9	187,1	-
Percentual de utilização, (%)	34,0	22,4	-

Os resultados indicaram que na comparação entre os cenários A1 e A2, as máquinas relacionadas aos processos de CCT, colhedoras e tratores transbordo, apresentaram

valores numericamente próximos para a capacidade de produção operacional (diferença máxima inferior a 0,25 %). Ambos cenários operam com colheita convencional nas condições observadas nos ensaios de campo e possuem a mesma estrutura de equipamentos de CCT. Já o cenário A3 apresentou capacidade de produção operacional média 9,0% inferior para as colhedoras. Este desempenho é reflexo da rotação do extrator primário a menor, que reduz a carga processada, como também da maior necessidade de transporte, que passou a ser a restrição (gargalo) do sistema e cuja infraestrutura não foi alterada neste estudo.

Sobre as operações de processamento do palhicho (enleiramento, enfardamento, recolhimento e carregamento de fardos), os cenários não permitem comparação entre si, uma vez que os equipamentos utilizados e as disponibilidades de palhicho variaram. No entanto, nota-se que no cenário A2, as capacidades de campo operacionais médias das operações de enleiramento de palhicho e de enfardamento resultaram em valores diferentes, sendo menor no enfardamento. Considerando que foram alocados apenas um conjunto trator-enleiradora e um conjunto trator-enfardadora por frente, isto ocorreu devido à menor capacidade de campo do enfardamento em comparação ao enleiramento, conforme levantado nos ensaios de campo. Lembra-se que no teste de campo relativo a esta alternativa de processamento de cana e biomassa, a capacidade de campo efetiva da enleiradora foi de 5,9 ha.h⁻¹ e da enfardadora foi de 3,7 ha.h⁻¹.

Na simulação do cenário A1, as capacidades de campo operacionais médias para o enleiramento e para o enfardamento foram de 27,0 ha.dia⁻¹, pois nos ensaios de campo, o enfardamento apresentou capacidade de campo efetiva superior ao enleiramento (5,5 ha.h⁻¹ e 4,2 ha.h⁻¹, respectivamente). Uma vez que as operações de enleiramento e enfardamento ocorrem nesta sequência, a operação mais restritiva no cenário A1 foi o enleiramento, que processou uma área que posteriormente foi totalmente atendida pelo enfardamento.

No cenário A2, como ocorreu o contrário, conclui-se que nem toda a área enleirada foi processada pela operação de enfardamento, que passou a figurar como restrição (gargalo) no sistema. Neste caso, para o cenário A2, seria necessário alocar um segundo conjunto trator-enfardadora por frente para atender toda a área trabalhada pelo conjunto trator-enleiradora de palhicho. Observa-se que o cenário A2 apresentou percentual médio de utilização do conjunto trator-enfardadora de 69,3%, com capacidade de campo operacional de 30,8 ha.dia⁻¹ enquanto os mesmos índices para o conjunto trator-enleiradora foram de respectivamente 41,7 ha.dia⁻¹ e 59,0 %, confirmando que o enfardamento estava em carga máxima de trabalho.

Os percentuais de utilização médios dos equipamentos também apresentaram bastante variação. O equipamento mais sobrecarregado nas simulações foi o conjunto trator-recolhedor de fardos no cenário A2, cujo valor médio foi de 75,9%, o que pode representar um indício de restrição para o sistema. Por outro lado, o mesmo cenário apresentou percentual de utilização de apenas 22,4% para a carregadora.

No Estudo A foi mantida a utilização de apenas um tipo de equipamento por frente, conforme os ensaios de campo. Esta discussão é retomada na análise do Estudo B, quando variou-se a quantidade utilizada de equipamentos por frente e os cenários foram comparados em igualdade de condições operacionais.

Com foco na operação de transporte, os resultados do tempo de ciclo dos caminhões entre a usina e o campo, tanto para o transporte de cana-de-açúcar como para o transporte de palhiço, foram agrupados na Tabela 6.35.

TABELA 6.35 – Tempos médios de ciclo dos veículos para o Estudo A.

Cenário	Tempos operacionais (minutos)			
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4
	15km	20km	20km	25km
A1				
Tempo de ciclo do transporte de cana-de-açúcar em rodotrens	118,2	132,7	131,8	150,5
Tempo do veículo na frente de carregamento de cana)	23,9	25,0	24,1	29,3
Tempo de ciclo do transporte de fardos em caminhões prancha	104,8	106,2	104,6	113,7
Tempo do veículo na frente de carregamento de fardos	37,2	25,1	23,5	19,1
A2				
Tempo de ciclo do transporte de cana-de-açúcar em rodotrens	120,5	132,5	134,1	149,2
Tempo do veículo na frente de carregamento de cana	30,5	29,1	30,7	32,3
Tempo de ciclo do transporte de fardos em pentaminhões	173,8	174,1	172,6	169,4
Tempo do veículo na frente de carregamento de fardos	74,3	61,1	59,6	42,9
A3				
Transporte de cana-de-açúcar + palhiço em rodotrens	85,9	103,7	101,3	117,5
Tempo do veículo na frente de carregamento de cana	21,7	26,0	23,6	26,3

Nota-se que os tempos de ciclo dos veículos canavieiros apresentaram valores médios crescentes conforme aumentava a distância da frente à usina, o que é coerente. Já em relação ao tempo de ciclo do transporte de fardos (cenários A1 e A2), esta regra não foi observada. Pelo acompanhamento da animação do modelo e pelo registro do tempo de permanência do veículo no campo, notou-se que a operação de carregamento de fardos ocupava uma grande parcela de tempo, sobretudo no cenário A2. Assim, nas frentes mais próximas, observou-se que era freqüente o caminhão retornar ao campo para mais um

carregamento de fardos e encontrar o conjunto reserva ainda sendo processado, obrigando-o a esperar por conjuntos carregados por maior tempo em comparação às frentes mais distantes. Por este motivo, nos cenários A1 e A2, o tempo de permanência do veículo de transporte de fardos no campo apresentou valores decrescentes com o aumento da distância, em um mesmo cenário.

No cenário A2, o tempo de ciclo dos veículos de transporte de fardos foi superior a 160 minutos, em média. Como o veículo utilizado foi o pentaminhão, com capacidade de 90 fardos, os tempos de carregamento e descarregamento demandavam no mínimo uma hora cada, o que reforça a necessidade das carretas reserva para acelerar o ciclo dos veículos. Adicionalmente, uma vez que há o processamento do caminhão plataforma, o benefício da troca de carretas é menor em comparação ao cenário A1, que utilizou o caminhão prancha. Lembra-se que os tempos de permanência no campo e na usina ainda estão sujeitos a filas, esperas causadas por quebras dos demais equipamentos, espera pelo preparo dos fardos e às regras de paradas para refeições e trocas de turno.

6.2.2 ESTUDO B - Comparação de Sistemas de Colheita de Cana e Aproveitamento de Biomassa em Igualdade de Condições Operacionais.

Neste estudo simulou-se os mesmos cenários apresentados no Estudo A, porém padronizando-se as condições operacionais dos sistemas para possibilitar a comparação adequada dos mesmos:

- B1) colheita com limpeza convencional e aproveitamento da biomassa via enfardamento e carregamento de fardos diretamente em rodotrens;
- B2) colheita com limpeza convencional e aproveitamento da biomassa via enfardamento, com transbordo interno de fardos e carregamento de fardos em rodotrens ao lado da área de recolhimento;
- B3) colheita com limpeza parcial e transporte de cana e palhiço juntos em rodotrens e separação do palhiço na usina.

Como premissa comum aos cenários, adotou-se a produtividade de cana-de-açúcar de 85 t.ha^{-1} , obtida de CTC (2010), como média de 7 safras para a região Centro-Sul, a partir de dados de 280 unidades produtoras. A produtividade de palhiço adotada foi a referenciada na literatura por Hassuani, Leal e Macedo (2005) de 14% da produtividade de colmos, em base seca. A configuração de transporte adotada para a movimentação dos fardos para a usina foi o sistema rodotrem, com capacidade de 60 fardos por viagem e realização de bate e volta no campo e na usina.

Os ensaios de campo que envolvem o enfardamento do palhiço foram realizados com dois conjuntos diferentes de máquinas de enleiramento e enfardamento. Para uniformizar as simulações, adotou-se os equipamentos testados no segundo ensaio de campo, com suas respectivas características e índices de desempenho obtidos nos ensaios de campo. Este conjunto de equipamentos apresentou resultado melhor no quesito de presença de impureza mineral nos fardos (10,5%), o que é importante para a área industrial, além de serem equipamentos com projeto mais moderno e com maior eficiência de recolhimento de palhiço (55,9%).

Nas simulações do Estudo B, a quantidade de equipamentos foi alterada em relação ao Estudo A. Uma vez que no cenário A2 a diferença nas capacidades operacionais de campo indicou que a manutenção da relação de um conjunto trator-enfardadora para um conjunto trator-enleiradora proporcionava restrição para o enfardamento de toda a área enleirada, alocou-se dois conjuntos trator-enfardadora por frente. Outra alteração foi no

cenário B2, onde alocou-se dois conjuntos trator-recolhedor de fardos por frente para que todos os fardos pudessem ser recolhidos efetivamente. Estas novas quantidades de equipamentos foram confirmadas como necessárias em simulações prévias, para que os cenários pudessem atingir a meta de produção de cana-de-açúcar (2.10^6 t.safra⁻¹) e processamento do palhiço correspondente. Os resultados completos dos cenários estão nos APÊNDICES E, F e G, cujas principais informações são resumidas no Quadro 6.4.

QUADRO 6.4 – Resumo dos resultados das simulações para o Estudo B.

Informações e Resultados	Cenário		
	B1	B2	B3
Sistema de colheita de cana	Limpeza convencional	Limpeza convencional	Limpeza parcial
Sistema de recolhimento de palhiço	Enfardamento	Enfardamento	Cana e palhiço juntos
Sistema de carregamento de palhiço	Carregamento direto	Recolhimento de fardos e carregamento no carreador	Cana e palhiço processados juntos
Sistema de processamento de palhiço na usina	Triturador de fardos	Triturador de fardos	Estação de limpeza a seco
Sistema de transporte de palhiço	Rodotrem (fardos)	Rodotrem (fardos)	Rodotrem (cana + palhiço)
Produção de cana-de-açúcar (t.dia ⁻¹) (t.safra ⁻¹)	12.539,6 2.094.112	12.520,6 2.090.943	11.415,2 1.906.339
Carga de cana transportada por viagem (t)	73,7	73,7	52,1
Percentual de palhiço na carga – b.u. (%)	5,4	5,4	12,7
Produção de palhiço – base úmida (t.dia ⁻¹) (t.safra ⁻¹)	1.027,4 171.581	1.027,0 171.507	724,9 121.053
Umidade do palhiço (%)	6,5	6,5	48,8
Produção de palhiço – base seca (t.dia ⁻¹) (t.safra ⁻¹)	960,6 160.429	960,2 160.359	371,0 61.955
Fardos produzidos (fardos.dia ⁻¹) (fardos.safra ⁻¹)	2.648 442.216	2.647 442.049	- -
Massa do fardo (kg)	388,0	388,0	-
Custo CCT (R\$.t cana ⁻¹) Palhiço (R\$.t palhiço ⁻¹) em base seca	18,58 44,32	18,61 61,52	20,40 32,77

Observa-se de imediato que as produções de cana-de-açúcar dos cenários B1 e B2 atingiram a meta estipulada de 2.10^6 t.safra⁻¹, o que não ocorreu no cenário B3. A produção inferior foi atribuída à diferença da participação da cana-de-açúcar e do palhiço no material entregue, que varia entre os cenários que lidam com colheita com limpeza convencional (B1 e B2) e o cenário de colheita com limpeza parcial (B3), sendo de 5,4% nos dois primeiros e 12,7% no último. Os níveis diferenciados de impureza refletem diretamente na carga transportada por viagem: 73,7 t (colheita com limpeza convencional) e 52,1 t (colheita com limpeza parcial), o que corresponde a uma diferença de 30% a menor para a colheita com limpeza parcial.

Assim, para a comparação na mesma base, tendo a cana-de-açúcar como o produto de referência, o cenário B3 deveria entregar uma quantidade maior de material (cana + palhiço) para processar a mesma quantidade de cana dos cenários com colheita com limpeza convencional. A Tabela 6.36 apresenta a quantidade de material (cana + palhiço) a ser processada adicionalmente nos cenários de colheita com limpeza parcial, respeitando a diferença da participação do palhiço no material entregue.

TABELA 6.36 – Quantidade de material (cana+palhiço) a ser entregue na usina, conforme o sistema de limpeza adotado.

Parâmetros	Sistema de colheita	
	Limpeza convencional	Limpeza parcial
Cana (t)	$1,89.10^6$	$1,89.10^6$
Palhiço (t)	$0,108.10^6$	$0,275.10^6$
Moagem na safra (cana+ palhiço)	$2,0.10^6$	$2,17.10^6$
Participação do palhiço (%)	5,4	12,7

Dessa forma, para se manter a mesma entrega de cana dos cenários com limpeza convencional ($1,89.10^6$ t. safra⁻¹), respeitando-se a participação diferenciada de palhiço dos dois sistemas de colheita, o volume de material a ser processado deve ser de $2,17.10^6$ t.safra⁻¹ ou 12.977 t.dia⁻¹.

O alcance do novo volume para o cenário B3 está vinculado ao aumento na estrutura de equipamentos. Para melhor análise comparativa dos resultados operacionais dos equipamentos considerados nos três cenários, selecionou-se os valores médios de capacidade de produção, capacidade de campo e percentuais de utilização dos equipamentos e agrupou-se estas informações na Tabela 6.37.

TABELA 6.37 – Resultados operacionais médios para o Estudo B.

Resultados operacionais médios	Cenários		
	B1	B2	B3
Colhedora de cana			
Quantidade	5	5	5
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	627,0	626,5	570,8
Percentual de utilização, (%)	38,3	38,3	33,2
Trator-transbordo			
Quantidade	10	10	10
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	313,5	313,0	285,4
Percentual de utilização, (%)	39,7	39,6	43,0
Conjunto trator-enleiradora de palhiço			
Quantidade	1	1	-
Capacidade de campo operacional, (ha.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	36,2	36,2	-
Percentual de utilização, (%)	51,2	51,1	-
Conjunto trator-enfardadora de palhiço			
Quantidade	2	2	-
Capacidade de campo operacional, (ha.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	18,1	18,1	-
Percentual de utilização, (%)	40,8	40,8	-
Conjunto trator-recolhedor de fardos			
Quantidade	-	2	-
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	-	128,6	-
Percentual de utilização, (%)	-	52,2	-
Carregadora de fardos			
Quantidade	1	1	-
Capacidade de produção operacional, (t.dia ⁻¹ .equipamento ⁻¹)	256,9	256,7	-
Percentual de utilização, (%)	45,0	30,8	-

Observa-se que a simulação dos cenários B1 e B2 revelou praticamente a mesma capacidade de produção operacional média para as colhedoras e tratores-transbordo. O cenário B3, no entanto, indica capacidade de produção operacional e percentual de utilização menores para as colhedoras, ou seja, estas possuem uma ociosidade maior em comparação aos cenários B1 e B2. Por outro lado, a análise do desempenho dos tratores-transbordo apontou que, apesar da capacidade de produção operacional menor, o percentual de utilização foi ligeiramente maior em três pontos percentuais em relação aos cenários B1 e B2.

No cenário B3, o percentual de utilização médio das colhedoras foi de 33,2% e apesar do percentual de utilização médio dos tratores-transbordo ter aumentado para 43,0%, considera-se este valor ainda baixo. Assim, para o aumento da produção de cana-de-açúcar deste cenário, as colhedoras e tratores-transbordo não representam as operações mais restritivas e a quantidade de equipamentos utilizada possui folga para atender a um aumento da produção.

Conforme comprovado nos ensaios de campo, na colheita com limpeza parcial, a diferença das cargas é compensada pela realização mais rápida da colheita (tempo para completar a carga dos transbordos). Assim, os valores mensurados da capacidade de produção efetiva da colhedora não apontaram diferença estatística relacionada aos fatores de rotação ou de quantidade de facas testados nos ensaios de campo. A aceleração do ciclo operacional dos tratores-transbordo foi comprovada pelo acompanhamento da animação da simulação, pois notou-se que era freqüente a formação de filas de tratores-transbordo carregados aguardando veículos para fazer a transferência de carga. Estes fatos sugerem que a quantidade de equipamentos de transporte constitui a restrição do cenário B3 para se atingir a produção de $2,17.10^6$ t.safra⁻¹ ou 12.977 t.dia⁻¹ que permite comparar os sistemas em igualdade de condições.

Sobre o desempenho dos equipamentos de manuseio de palhiço, apresentado na Tabela 6.37, observa-se por meio da quantidade de equipamentos e das capacidades de campo operacionais que, utilizando dois conjuntos trator-enfardadora por conjunto trator-enleiradora de palhiço, toda a área previamente enleirada foi atendida pela operação de enfardamento. Complementarmente, observa-se também que no cenário B2 os dois conjuntos trator-recolhedor de fardos utilizados foram suficientes para atender à demanda da carregadora de fardos.

A produção total de palhiço em base seca, apresentada no Quadro 6.4 e conforme já havia sido evidenciada na simulação do Estudo A, apresentou uma entrega maior para os cenários em que o palhiço é recebido enfardado, da ordem de 160.000 t.safra⁻¹, em comparação ao cenário B3 cuja produção foi da ordem de 62.000 t.safra⁻¹. Conforme argumentação anterior, um dos fatores que contribuíram para a produção menor do cenário B3 foi a baixa eficiência de separação de palhiço da estação de limpeza a seco, adotada como 50%. Outro fator que contribuiu para a menor entrega foi a própria produção a menor de material (cana + palhiço), apresentada neste cenário.

Para focar o desempenho da operação de transporte, de maneira análoga ao procedimento utilizado no Estudo A, a Tabela 6.38 apresenta o resumo dos tempos de ciclo relativos ao transporte de cana-de-açúcar e de palhiço verificados nas simulações dos cenários que compõem o Estudo B.

TABELA 6.38 – Tempos médios de ciclo dos veículos para o Estudo B.

Cenário	Tempos operacionais (minutos)			
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4
	15km	20km	20km	25km
B1				
Tempo de ciclo do transporte de cana-de-açúcar em rodotrens	117,3	132,0	131,3	154,2
Tempo do veículo na frente de carregamento de cana	24,3	25,4	24,7	34,2
Tempo de ciclo do transporte de fardos em rodotrens	104,6	104,7	103,0	112,0
Tempo do veículo na frente de carregamento de fardos	37,7	24,3	22,5	18,0
B2				
Tempo de ciclo do transporte de cana-de-açúcar em rodotrens	119,9	133,2	135,6	146,7
Tempo do veículo na frente de carregamento de cana	27,8	27,6	30,0	27,7
Tempo de ciclo do transporte de fardos em rodotrens	98,2	103,9	103,7	109,8
Tempo do veículo na frente de carregamento de fardos	31,3	23,5	23,2	15,9
B3				
Transporte de cana-de-açúcar + palhiço em rodotrens	85,9	103,7	101,3	117,5
Tempo do veículo na frente de carregamento de cana	21,7	26,0	23,6	26,3

Uma vez que a quantidade de veículos alocados por frente de transporte no Estudo B não foi alterada entre os cenários, pode-se comparar os tempos médios de ciclo entre o campo e a indústria dos três sistemas. Os tempos de ciclo dos veículos são influenciados pelo sistema de colheita (com limpeza convencional ou com limpeza parcial), filas nos pontos de processamento, procedimentos de troca de turno, paradas para refeições, manutenções dos demais equipamentos e pelas próprias manutenções dos veículos.

Os tempos médios de ciclo da operação de transporte de fardos (cenários B1 e B2), independente do cenário e da distância entre a frente e a usina, apresentaram amplitude baixa, de 13,8 minutos (variação entre 98,2 minutos e 112,0 minutos). Assim como na análise dos cenários do Estudo A, nota-se que as frentes mais distantes apresentaram valores médios menores para o tempo de permanência do veículo no campo. Conforme acompanhado na animação do modelo, uma vez que o tempo de carregamento dos veículos mostrou-se uma operação demorada, mesmo com a utilização de carretas reserva em sistema de bate e volta, era comum o veículo retornar ao campo para um novo carregamento e aguardar o conjunto reserva ter o carregamento de fardos finalizado. Assim, o maior tempo de percurso das frentes mais distantes até a usina proporcionava a menor espera dos veículos no campo.

Os tempos médios de ciclo do transporte de cana-de-açúcar mostraram-se coerentes, aumentando nas frentes com maior distância média. Independente do cenário simulado, os tempos de permanência dos veículos nas frentes variaram entre 21,7 minutos e 34,2 minutos. O cenário B3 apresentou tempos médios de ciclo menores para os veículos de

transporte de cana em relação aos cenários B1 e B2. A comparação entre os tempos médios de ciclo, com a indicação da redução percentual do cenário B3 em relação aos cenários B1 e B2, é apresentada na Tabela 6.39.

TABELA 6.39 – Redução dos tempos médios de ciclo dos veículos para o Estudo B.

Cenários	Tempo de ciclo médio para o transporte de cana-de-açúcar (minutos)			
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4
	15km	20km	20km	25km
B1	117,3	132,0	131,3	154,2
B2	119,9	133,2	135,6	146,7
B3	85,9	103,7	101,3	117,5
Redução B1/B3: $\left(\frac{B1-B3}{B1}\right)*100$	-26,8%	-21,4%	-22,8%	-23,8%
Redução B2/B3: $\left(\frac{B2-B3}{B2}\right)*100$	-28,4%	-22,1%	-25,3%	-19,9%

As reduções do tempo de ciclo médio, calculadas por frente, apresentaram índices entre 20 e 30%. Estes índices reforçam o argumento de que o sistema de colheita com limpeza parcial acelera o processamento dos tratores-transbordo e conseqüentemente disponibiliza cargas aos veículos com maior freqüência, em comparação aos sistemas que utilizam colheita com limpeza convencional.

Complementarmente, o registro de tempo de permanência dos veículos no campo no cenário B3 apresentou valor baixo, com média de 24,4 minutos (amplitude de 21,7 a 26,3 minutos entre frentes), o que indica que a infraestrutura de transporte poderia ser ampliada para obter aumento de produção. O percentual de utilização da moenda na simulação deste cenário apresentou o valor de 90,6% o que também corrobora para a necessidade de aumento da frota de veículos para obter maior produção no sistema que opera com limpeza parcial na colheita.

A título de experimentação, simulou-se novos cenários de aumento da estrutura de transporte a partir de variações do cenário B3, para se atingir a cota de $2,17.10^6$ t.safra⁻¹. Os cenários adicionais configurados foram:

- B3_1 – alocação de um rodotrem adicional por frente;
- B3_2 – alocação de dois rodotrens adicionais por frente;
- B3_3 – alocação de dois rodotrens e um conjunto de semirreboques adicionais por frente.

A Tabela 6.40 resume os principais resultados das simulações adicionais, variantes do cenário B3. As informações completas destes cenários encontram-se nos APÊNDICES H, I e J, respectivamente para os cenários B3_1, B3_2 e B3_3.

TABELA 6.40 – Resumo das simulações adicionais do cenário B3.

Informações e Resultados	Cenário			
	B3	B3_1	B3_2	B3_3
Quantidade de rodotrens total	20	24	28	28
Quantidade de semirreboques reserva nas frentes	4	4	4	8
Percentual de uso da moenda (%)	90,6	94,4	98,2	99,0
Tempo médio do caminhão no campo (min)	24,4	35,8	42,7	30,6
Produção de cana-de-açúcar (t.dia ⁻¹)	11.415,2	11.898,5	12.377,0	12.480,9
(t.safra ⁻¹)	1.906.339	1.987.042	2.066.963	2.084.313
Produção de palhiço (b.s.) (t.dia ⁻¹)	371,0	386,7	402,2	405,6
(t.safra ⁻¹)	61.955	64.577	67.175	67.739
Custo				
CCT (R\$.t cana ⁻¹)	20,40	20,45	20,51	20,50
Palhiço (R\$.t palhiço ⁻¹) em base seca	32,77	59,06	83,21	87,61

Nota-se que o aumento progressivo da frota proporcionou maior entrega de cana e palhiço, porém, a meta de $2,17 \cdot 10^6$ t.safra⁻¹ não foi possível de ser obtida. Por meio do percentual de uso da moenda conclui-se que a continuidade de aumento da frota, mantidas todas as demais premissas, iria apenas proporcionar o aumento de custo, pois o cenário B3_3 já está no limite de ocupação da moenda, com 99% de ocupação. Este fato indica que os pontos de descarga passaram a operar na capacidade máxima, sendo o ponto de restrição do sistema, o que demandaria novos investimentos na área industrial.

Uma vez que nos cenários de colheita com limpeza parcial (B3 e variantes), a carga por unidade de transporte é menor que os cenários de colheita com limpeza convencional (B1 e B2) e o tempo de descarga independe da carga transportada, mesmo operando com 100% de utilização, os pontos de descarga não conseguem abastecer a usina para se atingir a meta de $2,17 \cdot 10^6$ t.safra⁻¹ e 12.977 t.dia⁻¹. O cenário B3_3, de maior produção, com $2,08 \cdot 10^6$ t.safra⁻¹, apresentou um desempenho apenas 3,8% inferior à meta, uma diferença considerada pequena. Acredita-se que, mediante ajustes operacionais, uma diferença de até 5% poderia ser superada na prática, uma vez que o modelo de simulação tende a ser mais restritivo que o sistema real.

O incremento gradual da frota também trouxe como consequência o aumento do tempo de permanência dos veículos no campo, o que era esperado, uma vez que aumentou a disputa dos caminhões pelos mesmos recursos de processamento (colhedoras e tratores-transbordo). Nota-se porém, que a simulação do cenário B3_3 indicou uma redução do tempo de permanência no campo de 42,7 para 30,6 minutos em relação ao cenário B3_2. Ou seja, para a situação representada, a estratégia de dispor de um conjunto adicional de semirreboque por frente dinamizou a operação do rodotrem, uma vez que ao chegar à frente de carregamento, o cavalo mecânico desacopla o conjunto de semirreboques vazio e imediatamente pode acoplar um conjunto já carregado, caso esteja disponível, e retornar para a usina.

Percebe-se também que a primeira variação do cenário B3, que foi a alocação de um veículo adicional por frente (cenário B3_1), foi suficiente para aumentar a produção do sistema em 483 t.dia^{-1} e consequentemente o custo do palhiço aumentou para $59,06 \text{ R\$.t palhiço}^{-1}$, ou seja, um custo já superior ao cenário B1, que considera colheita convencional e enfardamento do palhiço.

Outra alternativa para atingir a meta de cana estipulada seria manter a estrutura utilizada de equipamentos e consequentemente a manutenção da quantidade processada por dia, porém com aumento dos dias de safra.

Considerando-se esta alternativa, a quantidade necessária de dias de safra é uma relação direta entre a meta de $2,17 \cdot 10^6 \text{ t.safra}^{-1}$ e a entrega diária média obtida de $11.415,7 \text{ t.dia}^{-1}$, o que requer 190 dias de safra, ou seja, 23 dias úteis adicionais além dos 167 dias inicialmente considerados. É prudente salientar que a hipótese de aumento da safra implica considerar no sistema real uma maior probabilidade de operação em dias chuvosos e não aptos para a colheita.

Simulando-se esta alternativa (cenário B3_4), com período de safra de 190 dias, o sistema conseguiu atingir a produção de $2,17 \cdot 10^6 \text{ t.safra}^{-1}$ ($11.425,7 \text{ t.dia}^{-1}$). Mantendo-se a estrutura de custos variáveis inalterada, e considerando um aumento proporcional dos custos fixos em 13,8%, correspondente à relação direta entre 190 e 167 dias, obteve-se os custos de $20,40 \text{ R\$.t cana}^{-1}$ e $108,92 \text{ R\$.t palhiço}^{-1}$, em base seca. Lembra-se que os custos atribuídos ao processamento do palhiço referem-se totalmente à diferença de custos em relação ao cenário de colheita com limpeza convencional, em 167 dias. O resultado completo deste cenário adicional encontra-se no APÊNDICE K

A Figura 6.14 compara os cenários simulados para o Estudo B quanto à produção e o custo para a cana e para a biomassa.

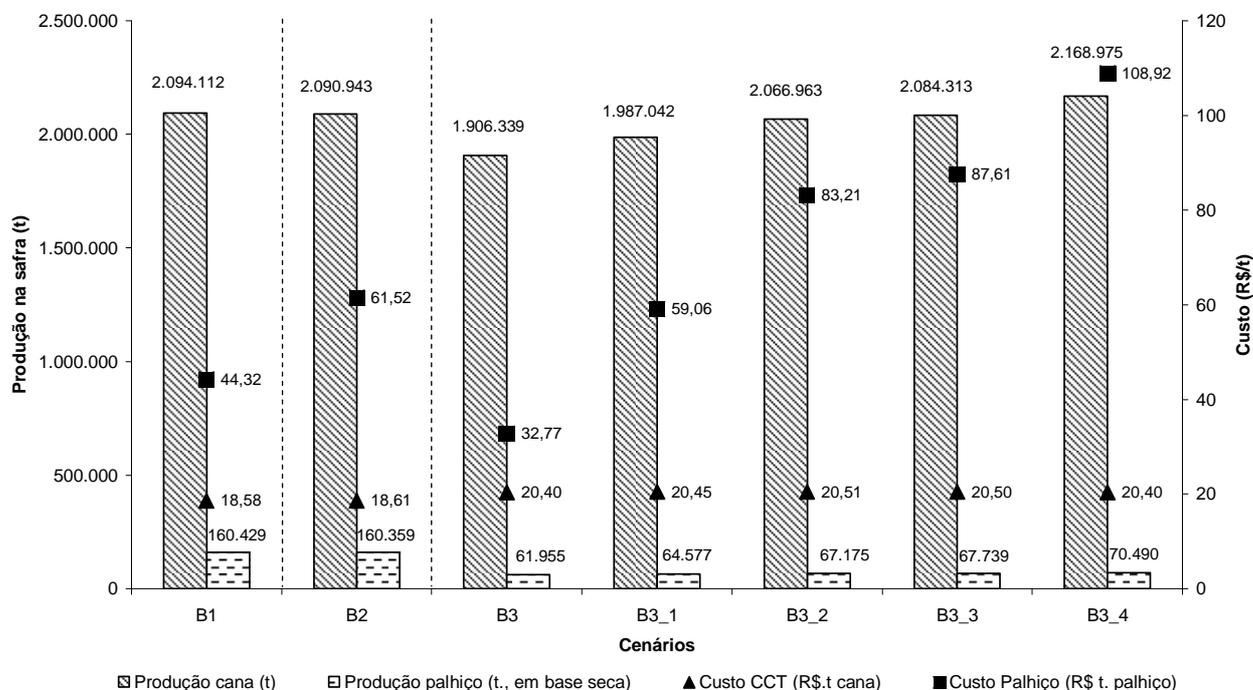


FIGURA 6.14 – Comparativo da produção e custos dos cenários do Estudo B.

A comparação dos cenários simulados em igualdade de condições operacionais mostra o cumprimento da moagem de 2.10^6 toneladas de cana.safra⁻¹ dos cenários B1 e B2, com sistema de colheita convencional em comparação aos cenários que operam com colheita com limpeza parcial. O cumprimento da meta de moagem proposta não ocorre no cenário B3 e, em suas variantes, e apenas no cenário B3_3, obtém-se um resultado aproximado, considerado factível, como reflexo da maior participação do palhiço na carga, promovida pela menor rotação do extrator primário, conforme observado nos ensaios de campo.

No cenário B3_3, que utiliza uma estrutura de equipamentos maior, atinge-se a produção diária de $2,08.10^6$ t cana.safra⁻¹, portanto, 3,8% abaixo da meta estipulada de $2,17.10^6$ t cana.safra⁻¹. Conforme argumentação anterior, acredita-se que a diferença na entrega de material (cana + palhiço) a menor poderia ser superada por ajustes operacionais.

Nos cenários derivados de B3, a tentativa de alcançar a meta de moagem de cana-de-açúcar via aumento da frota, de fato promoveu o aumento da entrega de cana, porém com custos de aproveitamento de biomassa elevados, uma vez que todo o custo de infraestrutura adicional para o processamento da biomassa foi atribuído ao palhiço.

Apesar dos cenários B1, B2 e B3, que possuem a mesma estrutura de transporte, terem resultado no menor custo da obtenção da biomassa para B3 (32,77 R\$.t palhiço⁻¹), ao se alocar um veículo adicional por frente de corte e carregamento para aumentar a produção (cenário B3_1), o custo da biomassa já se eleva a 59,06 R\$.t palhiço⁻¹ sem atingir a meta de entrega. Este custo é superior ao cenário de enfardamento com carregamento direto (44,32 R\$.t palhiço⁻¹) e inferior ao cenário B2 que utiliza o implemento recolhedor de fardos (61,52 R\$.t palhiço⁻¹). O cenário B2, particularmente, possui estrutura adicional para efetuar o recolhimento dos fardos para a lateral do carreador, o que o torna uma opção de custo mais elevado para a biomassa.

A ampliação da entrega de cana-de-açúcar e consequentemente de biomassa, utilizando-se o sistema de colheita com limpeza parcial (cenário B3 e variantes), é possível de ser alcançada apenas mediante o aumento da infraestrutura de transporte e das instalações na usina (aumento da capacidade de moagem e de pontos de recepção de carga).

O cenário B3_4, que contempla o aumento do período de safra, atinge a meta considerando-se colheita com limpeza parcial e separação do palhiço na estação de limpeza a seco, com custo de 108,92 R\$. t.palhiço⁻¹. Porém, esta alternativa requer a ampliação da safra em 23 dias úteis além do período convencional, o que implica na operação do sistema real em época com maior probabilidade de chuvas.

Efetuando-se a comparação dos três sistemas de colheita de cana-de-açúcar com aproveitamento do palhiço (cenários B1, B2 e B3_3), que atingem a produção estabelecida como meta, a alternativa de menor custo foi o sistema de colheita convencional com enfardamento do palhiço e carregamento dos fardos diretamente em caminhões (cenário B1). O custo referente às operações de corte, carregamento e transporte de cana deste cenário foi de 18,58 R\$.t cana⁻¹ e de aproveitamento de biomassa de 44,32 R\$.t palhiço⁻¹.

O sistema de colheita convencional com enfardamento e transbordo interno de fardos (cenário B2) possui custos de CCT na mesma ordem de grandeza em relação a B1, com 18,61 R\$.t cana⁻¹, com diferença a maior de apenas 0,16% e custo de manuseio de biomassa de 61,52 R\$. t palhiço⁻¹, 38,8% superior ao cenário B1, devido à maior quantidade de equipamentos utilizados.

Já a colheita com limpeza parcial (Cenário B3_3) apresentou os custos mais elevados de CCT e de manuseio de biomassa, respectivamente de 20,50 R\$.t cana⁻¹ e 87,61 R\$.t palhiço⁻¹. Apesar do sistema de colheita com limpeza parcial não necessitar de uma estrutura dedicada ao processamento da biomassa (tratores, enleiradoras, enfardadoras, veículos para fardos, etc.) como os demais sistemas, o incremento dos equipamentos de

transporte e o custo da estação de limpeza a seco fazem com que os custos totais desta alternativa sejam ampliados.

Complementarmente e conforme argumentado anteriormente, outro fator importante que contribui negativamente para o sistema de colheita com limpeza parcial é a eficiência de separação da estação de limpeza a seco, definida em 50%. Com isso, metade do palhiço transportado até a usina segue para moagem com a cana, o que, dependendo da quantidade, pode comprometer a extração do caldo na moagem e o restante do desempenho industrial de fabricação de açúcar e etanol.

A Tabela 6.41 resume a destinação da biomassa para os cenários selecionados B1, B2 e B3_3, em valores absolutos e percentuais.

TABELA 6.41 – Destinação da biomassa nas simulações do Estudo B

Biomassa	Biomassa por cenário (t.safra ⁻¹ , b.s.)		
	B1	B2	B3_3
Aproveitada ^a	160.429 (54,7%)	160.359 (54,8%)	67.739 (25,3%)
Processada com a cana ^b	-	-	67.739 (25,3%)
Mantida no campo	132.747 (45,3%)	132.373 (45,2%)	133.023 (49,5%)
Total	293.176 (100%)	292.732 (100%)	268.501 (100%)

^a fardo ou palhiço na usina.

^b parcela da biomassa não separada na estação de limpeza a seco.

Dos três cenários selecionados para comparação dos sistemas de processamento de cana e aproveitamento de palhiço, a diferença da quantidade de biomassa aproveitada entre os cenários que utilizam o enfardamento (B1 e B2) e o cenário de colheita com limpeza parcial (B3_3) é 57,7% a menor para este último cenário. A menor quantidade é justificada pela entrega de material total (cana + palhiço) a menor do cenário B3_3 em relação aos cenários B1 e B2, pelo desempenho da estação de limpeza a seco e pelo próprio sistema de colheita com limpeza parcial que deixa uma parte da biomassa no campo. Nota-se que 50% da biomassa foi mantida no campo e 50% trazida para a usina.

Nos cenários B1 e B2, o percentual de biomassa aproveitada corresponde à parcela recolhida que foi observada no segundo ensaio de campo (eficiência de recolhimento de 55,9%), resultante das operações de enleiramento e enfardamento do palhiço, com diferença da ordem de 1,1% em relação ao valor obtido na simulação.

Observando-se a quantidade absoluta de biomassa mantida no campo, os valores para os três sistemas foram numericamente próximos, com variação máxima observada de 650 t.safra⁻¹ em base seca, (0,5% de diferença) entre os cenários B3_3 e B2.

Pode-se encontrar a área necessária para atendimento dos sistemas de processamento de cana-de-açúcar e biomassa a partir da produtividade de referência adotada de 85 t.ha⁻¹ e das produções de cana obtidas nos cenários. Uma vez que esta produtividade é mensurada com base no sistema convencional, com 5,4% de palhiço, é necessário efetuar um ajuste da produção do cenário B3_3.

O volume de material (cana + palhiço) entregue no cenário B3_3 foi de 2.084.313 t.safra⁻¹, com 12,7% de palhiço em massa, contra 2.090.943 t.safra⁻¹ com 5,4% de palhiço em massa no cenário B2. Considerando o desconto de 12,7% em massa na produção original do cenário B3_3, em sistema de colheita com limpeza parcial e acréscimo de 5,4% em massa, referente à participação do palhiço na carga do sistema de colheita com limpeza convencional, a produção corrigida para a cana com 5,4% de palhiço é de 1.917.863 t.safra⁻¹. A partir deste valor e das produções dos cenários B1 e B2, pode-se encontrar a área necessária para cada sistema, considerando a produtividade adotada para o Estudo B, de 85 t.ha⁻¹. Os parâmetros relativos a esta análise são resumidos na Tabela 6.42.

TABELA 6.42 – Produções e áreas processadas nos cenários do Estudo B

Parâmetros	Cenário		
	B1	B2	B3_3
Produção de cana+palhiço (t.safra ⁻¹)	2.094.112	2.090.943	2.084.313
Participação do palhiço na carga b.u. (%)	5,4	5,4	12,7
Produção corrigida para 5,4% de palhiço (t.safra ⁻¹)	-	-	1.917.863 ^a
Área processada ^b (ha.safra ⁻¹)	24.636,6	24.599,3	22.563,1

^a considerando ajuste para 5,4% em massa, referente ao palhiço na colheita com limpeza convencional.

^b considerando produtividade de 85 t.ha⁻¹.

Na análise da Tabela 6.42, nota-se que a área e a produção foram menores para o cenário B3_3. Lembra-se que, para a mesma quantidade de cana dos cenários de colheita com limpeza convencional, a meta de entrega dos cenários de colheita com limpeza parcial deveria ser de 2,17.10⁶ t.safra⁻¹, devido à diferença da participação no palhiço na carga.

Para as premissas consideradas neste estudo, a maior produção do sistema de colheita com limpeza parcial, a partir do cenário B3_3, seria possível de ser atingida apenas com o aumento de infraestrutura na usina, de forma a ampliar a capacidade de recepção de material (cana + palhiço), além do aumento da área processada, para cumprir a meta de 2,17.10⁶ t.safra⁻¹.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em cumprimento ao objetivo traçado para esta pesquisa, foi desenvolvido um modelo de simulação discreta capaz de representar a integração dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar e de processamento da biomassa. O modelo foi utilizado para responder às questões que haviam sido enunciadas:

- Por meio dos ensaios de campo que subsidiaram a coleta de dados para o modelo de simulação, foi possível compreender o elevado grau de integração operacional dos processos de colheita de cana-de-açúcar e de processamento da biomassa, que podem ser configurados em uma diversidade de opções, com variações de tipos de equipamentos bem como de suas regulagens.
- O interesse na integração dos sistemas fica evidenciado na interação dos sistemas de manuseio de cana-de-açúcar e palhiço, pois conforme as opções adotadas, as operações são interdependentes e seus custos são compartilhados. A título de exemplo, no sistema de colheita com limpeza parcial, o processamento da cana-de-açúcar e do palhiço ocorrem em uma mesma operação, cujo desempenho é influenciado pela regulagem da colhedora.
- O modelo de simulação foi capaz de representar as operações observadas nos ensaios de campo de maneira adequada, respeitando a interação entre os processos. A representação dos sistemas por meio do modelo de simulação possibilita a análise dos mesmos ainda na etapa de planejamento.
- Os estudos realizados por meio do modelo de simulação proporcionaram melhor compreensão dos sistemas em análise e suportaram a tomada de decisão sob os critérios de produção e custo para as condições de contorno adotadas.

O modelo desenvolvido auxiliou a escolha de sistemas e a determinação da quantidade de equipamentos para uma situação previamente definida de uma usina com moagem de dois milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra. Combinando produção e custo, o sistema com melhor desempenho, dadas as premissas do estudo em igualdade de condições operacionais (Estudo B), foi a colheita convencional com aproveitamento da biomassa por meio do enfardamento e carregamento de fardos diretamente em caminhões.

Os modelos de simulação podem ser projetados para trabalhar com maior ou menor detalhamento das operações que estão sendo representadas. Neste trabalho, desenvolveu-se um modelo diferenciado, que pode ser utilizado para avaliar decisões sistêmicas relativas aos processos de obtenção de dois produtos: cana-de-açúcar e biomassa, e não apenas para uma operação isolada ou um conjunto limitado de operações. Ainda assim, há espaço para refinamento dentro dos próprios sistemas avaliados. Nos sistemas de colheita com limpeza parcial, por exemplo, por se trabalhar com cargas mais leves, projetos de colhedoras e equipamentos de transporte podem ser desenvolvidos com potencial de ganhos operacionais e de redução de custo, principalmente relativos ao consumo de combustível.

O modelo desenvolvido possui interface com planilhas eletrônicas parametrizadas, que de fato facilitaram a interação com a simulação, tanto na inserção de dados como na exportação e análise de resultados. Essas funcionalidades são importantes para viabilizar o uso do modelo de maneira ágil como ferramenta gerencial, até mesmo por tomadores de decisão sem formação em simulação, mediante interface com aplicativos computacionais de maior difusão, como planilhas *MS Excel*.

É importante ressaltar outras características diferenciais do modelo desenvolvido que incluem questões típicas de gestão, como definição de turnos, sistemas de trocas, paradas para refeições e manutenção de equipamentos, que revelam maior minúcia de modelagem e maior abrangência para realização de estudos de cenários adicionais.

Outra funcionalidade da simulação que se mostrou extremamente útil foi a animação do modelo. A possibilidade de acompanhamento da animação dos processos se mostrou importante tanto para a melhor compreensão das interações das operações representadas, como para corrigir erros surgidos durante a fase de modelagem dos sistemas.

Os ensaios de campo constituíram oportunidades singulares de aprendizagem real sobre os sistemas, particularmente os testes com protótipos de dispositivos (rolos de 4 e 5 facas) e regulagens (rotações de 650 e 850 rpm) das colhedoras e os equipamentos de enfardamento e transbordo interno que até então não haviam sido testados em cana-de-açúcar. Além dos índices de desempenho operacional, foram observadas as limitações técnicas dos equipamentos, as necessidades de manutenção e principalmente sua rotina de trabalho, que refletem em sua utilização. Dessa maneira, os aspectos observados nos ensaios de campo forneceram os principais dados para a modelagem e posterior simulação desses sistemas.

Como primeira ferramenta que aborda os dois sistemas em conjunto por meio de simulação discreta, há algumas limitações do modelo que podem ser gradativamente superadas, mediante o refinamento do mesmo. Como premissa para o modelo, no Estudo B

(comparação de sistemas em igualdade de condições operacionais), foram adotadas produtividades médias para a cana-de-açúcar e para o palhiço, independente da variedade de cana processada. Acredita-se que, com o aumento de interesse na biomassa, futuramente haverá bancos de dados que relacionem as produtividades de palhiço com as variedades de cana e com o estágio de corte, da mesma maneira que os sistemas de controle hoje fazem com a cana. Estes dados poderão subsidiar o gerenciamento da biomassa, ou seja, a informação de quais áreas poderão fornecer palhiço, em qual quantidade e em que período.

Sabe-se também que os índices levantados para os equipamentos de manuseio de biomassa (enleiradoras e enfardadoras) podem apresentar variação de desempenho (índices mensurados em ha.h^{-1} e eficiências de recolhimento) frente aos níveis diferenciados de palhiço. Os ensaios de campo foram ótimas oportunidades de levantamento de dados com critério, que forneceram resultados considerados de referência.

Reconhece-se também que foram realizados três ensaios de campo (ensaio de colheita + 2 ensaios de enfardamento) em usinas e com equipamentos e situações operacionais diferentes, principalmente quanto a disponibilidade de palhiço, que forneceram os principais dados para este trabalho. No entanto, as condições de realização dos ensaios de campo foram limitadas à disponibilidade das usinas em fornecer os equipamentos e à infraestrutura disponível na área industrial em cada uma destas empresas. A título de exemplo, a usina que possui estação de limpeza a seco, que possibilitou o processamento da cana com maior percentual de palhiço, resultante da colheita com limpeza parcial, não possui estrutura para processamento de fardos, e vice-versa. Este fato obrigou a realização dos ensaios em locais diferentes.

Ainda assim, a forma como o modelo foi estruturado considera os índices de desempenho como parâmetros, que podem ser modificados para realizar estudos de análise de sensibilidade e de configuração de operações, por exemplo, em situação de pior caso. Esta é uma das maiores funcionalidades proporcionadas pelos modelos de simulação, objetivo central deste trabalho.

De modo particular, no Estudo B, buscou-se configurar os parâmetros de desempenho operacional dos equipamentos da maneira mais isenta possível, para permitir a comparação dos sistemas de colheita de cana e aproveitamento da biomassa minimizando as distorções e possíveis ruídos causados pelos dados coletados nos três ensaios de campo. No Estudo B, por exemplo, padronizou-se os dados das operações de manuseio de palhiço totalmente pelo desempenho dos equipamentos avaliados no segundo ensaio de enfardamento.

No momento, o estado da arte dos sistemas para colheita de cana-de-açúcar com recuperação de biomassa não aponta uma resposta única consolidada. Diversos estudos estão em curso, observando os processos pontualmente, e não consideram os sistemas como um todo. Há usinas propensas a adotar o sistema de enfardamento da biomassa e outras com interesse de operar com sistema de colheita com limpeza parcial, por entenderem o enfardamento como uma “segunda colheita”, com infraestrutura própria a ser gerenciada.

Há outros casos de usinas em que todo o palhiço é deixado sobre o solo e outras que realizam apenas o enleiramento para favorecer a brotação das soqueiras. O aumento do percentual de áreas com eliminação da queima controlada, segundo a imposição da legislação, contribuirá para que mais pesquisas sejam efetuadas e que os melhores sistemas dos pontos de vista agrônomico e operacional sejam indicados.

O interesse na questão do aproveitamento da biomassa ocorre na mesma medida em que a tecnologia de processo para a utilização do palhiço como matéria prima para produção de etanol se solidifique, assim como o aumento da remuneração paga à energia exportada para a rede por meio do processo de cogeração.

Enquanto isso, pesquisas que exploram tecnologias para o manuseio de cana e palhiço têm buscado soluções para o melhor desempenho dos equipamentos e a diminuição da terra agregada à biomassa. Os projetos de colhedoras, transbordos e carrocerias de caminhões atuais não foram concebidos para operar com cana e palhiço em conjunto, como considera a hipótese de adoção da alternativa de colheita com limpeza parcial. Na opção de enfardamento, as carrocerias de caminhões testadas no transporte de fardos foram veículos e implementos de transporte de cana, que também podem ter seu projeto aprimorado.

Outro caso para inovação de projeto são as próprias enfardadoras, que podem passar por melhorias em dispositivos para redução de impurezas minerais. De qualquer maneira, para avaliar estas alternativas operacionalmente, dispor de um modelo de simulação traz a vantagem de realização de testes e análises de sensibilidade desses sistemas previamente à sua implementação.

Como sugestão de trabalhos futuros, mediante modificação do modelo elaborado, estudos podem ser conduzidos para contemplar a utilização de todos os sistemas de colheita de cana e manuseio de biomassa em conjunto, ou seja, pode-se simular uma usina com frentes operando com colheita de cana convencional e enfardamento do palhiço enquanto outras frentes operam em colheita com limpeza parcial, por exemplo. Muito embora as usinas tenham buscado uma solução única para o sistema de recolhimento de palhiço, as alternativas não são mutuamente excludentes.

Nesta pesquisa, para cada frente de colheita de cana-de-açúcar foi associada uma frente de processamento de biomassa. Mediante ajustes no modelo, outras variações podem ser testadas para avaliar o atendimento de duas ou mais frentes de colheita por uma mesma frente de processamento de biomassa.

As frentes de colheita neste trabalho foram delineadas com produção nominal de 3.000 t cana.dia⁻¹. A variação do tamanho das frentes de colheita também pode trazer análises interessantes do ponto de vista de aproveitamento de palhiço, uma vez que o desempenho e a necessidade de equipamentos são influenciados por esta característica.

Outras sugestões de estudos podem contemplar a mudança dos horários das jornadas de trabalho, a modificação dos procedimentos de manutenção, a variação das produtividades de cana e de palhiço disponível no campo, alterações na largura de trabalho das máquinas e o uso de novos equipamentos, como a máquina recolhadora de forragem, que embora atualmente tenha uso menos difundido, pode ser que com o futuro torne-se uma alternativa interessante. Todos estes estudos também são possíveis de serem conduzidos por meio de modelos de simulação discreta.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. Por que morrem os cortadores de cana? **Saúde e sociedade**. v.15, n. 3, p. 90-98, set.-dez. 2006.

ALVES, F. Processo de trabalho e danos à saúde dos cortadores de cana. **Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente**. v.3, n. 2, abr.-ago. 2008.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

BALLOU, R. H. **Logística empresarial: Transportes, administração de materiais, distribuição física**. São Paulo: Atlas, 1993.

BANKS, J. **Handbook of simulation**. Atlanta: John Wiley & Sons, 1998.

BATALHA, M. O.; SILVA A. L. Gerenciamento de sistemas agroindustriais: definições, especificidades e correntes metodológicas. In: BATALHA, M. O. (Org.). **Gestão Agroindustrial**. São Paulo: Atlas, 2007. v. 1, p. 1-62.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: Operations Management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**. v. 22, n.2, p 241-264, 2002.

BUSATO, P.; BERRUTO, R. PICCAROLO, P. Simulation and optimization of biomass harvest and transport system. In.: CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING. XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. 37. Foz do Iguaçu. **Resumos...**, 2008.

CASTRO, N. J.; BRANDAO, R. DANTAS, G. A, A bioeletricidade sucoenergética na matriz elétrica. In: SOUZA, E. L. L.; MACEDO, I.C. (Org.) **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Conceituando biomassa**. [S.I.]: Disponível em < <http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/conceituando.htm> > Acesso em 24 jul. 2011.

CIMINO, A.; LONGO, F.; MIRABELLI, G. A general simulation framework for supply chain modeling: State of the art and Case Study. **International Journal of Computer Science Issues**, v. 7, n.3, mar. 2010

CTC. Centro de Tecnologia Canavieira. **Bagaço**. [S.I.]: Disponível em <http://www.ctcanavieira.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=367&Itemid=1323> Acesso em 24 jul. 2011.

CTC. Centro de Tecnologia Canavieira. **Censo varietal e de produtividade em 2009**. [S.I.]: 20p., ago. 2010.

DE MOL, R. M.; JOGEMS, M.A.H.; VAN BEEK, P.; GIGLER, J. K. Simulation and optimization of the logistics of biomass fuel collection. **Netherlands Journal of Agricultural Science**. 45 p. 219-228, 1997.

DÍAZ, J. A.; PÉREZ, I. L. Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 32. 2000, Orlando. **Proceedings...** Orlando, 2000 p.1114-1117.

DIEESE. Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Econômicos. **Encargos sociais e desoneração da folha de pagamentos: revisitando uma antiga polêmica**. Nota técnica. n.101 jul. 2011

ERENO, D. Álcool de celulose: Bagaço e palha são cotados para aumentar a produção de etanol. **PESQUISA FAPESP**. 133 ed. [S.I.]: mar. 2007.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com Aplicações em Arena**. 1 ed. Florianópolis: Visual Books, 2001.

HANSEN, A. C.; BARNES, A. J.; LYNE, P. W. L. Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems. **Transactions of the ASAE**. vol. 45(3). p. 531–538. 2002.

HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass power generation**. Sugar cane bagasse and trash. Published by UNDP-UN / Centro de Tecnologia Canavieira-CTC, Piracicaba: 2005

HIGGINS, A.; DAVIES, I. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computer and electronics in agriculture**, v. 47, p. 85-102, 2005.

HILLIER F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. Tradução Ariovaldo Griesi. São Paulo: McGraw Hill, 2006.

HOFSTRAND, D. **Brazil's Ethanol Industry**. Apresenta comparação da produção brasileira e americana de etanol. Iowa State University – University Extension. Ag Decision Maker. Newsletter. jan. 2009. Disponível em <<http://www.extension.iastate.edu/agdm/articles/hof/HofJune07.html>> Acesso em 29 dez. 2010.

IANNONI, A. P.; MORABITO, R. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar : um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão e Produção**, v. 9, n. 2, p. 07-28, ago 2002.

JANK, M. S.; NAPPO, M. Etanol de cana-de-açúcar: uma solução energética global sob ataque. In: ABROMOVAY, R.(Org.) **Biocombustíveis: A energia da controvérsia**. São Paulo: SENAC, 2009.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P; SADOWSKY, D. A. **Simulation with Arena**. New York: McGraw-Hill, 1998.

LAW, A. M.; KELTON, W. D.: **Simulation modeling and analysis**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando Excel**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005

Le GAL, P. Y.; Le MASSON, J.; BEZUIDENHOUT; LAGRANGE, L. F. Coupled modeling of sugarcane planning and logistic as a management tool. **Computers and Electronics in Agriculture**, n. 68, p. 108-177, 2009.

MACEDO, I. C. (org) **A energia da cana-de-açúcar: doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V; SILVA, J. E. A. R. **Emissões de gases de efeito estufa (GEE) na produção e uso do etanol no Brasil: situação atual (2002)**. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, 2004.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Produção brasileira de cana, açúcar e etanol**. Disponível em <[http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/SETEMBRO_2011/07_%20prod_cana_acucar_etanol\(1\).pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/producao/SETEMBRO_2011/07_%20prod_cana_acucar_etanol(1).pdf)>. Acesso em 30 out. 2011.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar: Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. **EMBRAPA**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro: 2009. 58p.

MARQUES, F. **O alvo é o bagaço**: subproduto abundante da indústria da cana dá vantagem competitiva ao Brasil na busca do etanol de segunda geração. **PESQUISA FAPESP Online** 163. ed. [S.I.]: set. 2009. Disponível em <<http://revistapesquisa.fapesp.br/extras/imprimir.php?id=3934&bid=1>> Acesso em 03 jan. 2011.

MARTINS, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.) **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p. 45-61.

MDIC. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Balança Comercial Brasileira** – dados consolidados> Janeiro-Setembro, 2010. Disponível em <http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1289220857.pdf>. Acesso em 24 dez. 2010.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Desenvolvimento da produção – **Álcool combustível**. Disponível em <<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=999>>. Acesso em 24 jul. 2011.

MELLO, A. M. **Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento de palhiço**. 2009. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Ceres, 1974. 301p.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 12, n.5, p.546-552, 2008.

MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Org.) **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p. 165-194.

NEVES, J. L. M., **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras de cana-de-açúcar picada e alternativas para a sua redução**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, jul. 2003.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

RANGEL, J. J. A.; CUNHA, A. P.; PACHECO, A. P.; MORGADO, I. F.; MONTANÈ, F. A. T. Simulação computacional para análise do frete no transporte de cana-de-açúcar – um estudo de caso no estado do Rio de Janeiro. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**. v. 3, n. 3, p. 250-261, set-dez 2008.

RIPOLI, T. C. C. **Utilização do material remanescente de colheita de cana-de-açúcar (Saccharum spp):** equacionamento dos balanços energético e econômico. Piracicaba, 1991. 150p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar:** colheita, energia e ambiente. 1. ed. Piracicaba: Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2004. v. 1. 302 p.

RODRIGUES, D. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasileiros aceleram pesquisas sobre etanol de segunda geração. **EMBRAPA**. fev. 2010. Disponível em <<http://www.embrapa.gov.br/imprensa/noticias/2010/fevereiro/3a-semana/brasileiros-aceleram-pesquisas-sobre-etanol-de-segunda-geracao/>> Acesso em 03 jan. 2011.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. 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. **Anais...** Ouro Preto: out. 2003.

SILVA, A. K. **Método para avaliação e seleção de softwares de simulação de eventos discretos aplicados a análise de sistemas logísticos**. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2006.

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 e Produção**. v. 18, n. 1, p.73-90, 2011.

SOKHANSANJ, S.; TURHOLLOW, A. ; WILKERSON, E.; **Development of the integrated Biomass Supply Analysis and Logistics Model (IBSAL)**. [S.I.]. Mar, 2008. Oak Ridge National Laboratory. Disponível em <<http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub10657.pdf>> Acesso em 27 dez. 2010.

SUGIMOTO, L. Palha e bagaço na linha de produção **Jornal da UNICAMP**. 14 de julho a 2 de agosto de 2008. Ano XXII n. 42. p. 4.

TORREZAN, H. F. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2003.

TOSO, E. A. V., SILVA, J. E. A. R.; SANTOS, S. U .C. O; MARIN, M. C.; FUJII, F.Y. Planejamento de mão de obra: análise do trade-off entre turnos de trabalho adicionais e a utilização de horas extras. In XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...** Salvador, out. 2009.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Sustentabilidade – Protocolo Agroambiental**. Disponível em <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={BEE106FF-D0D5-4264-B1B3-7E0C7D4031D6}#>>. Acesso em 24 jul. 2011.

_____. União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Renovação**. Disponível em <<http://www.unica.com.br/Renovacao/default.asp> > Acesso em 27 jul. 2011b.

VIAN, C. E. F.; MARIN, F. R. Logística e Transporte. **EMBRAPA** Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_133_22122006154842.html#> Acesso em 28 dez 2010.

ZUURBIER, P.; VOOREN, J. V. **Sugarcane ethanol: contributions to climate change mitigation and the environment**. Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Planilha de custo

SISTEMA DE COLHEITA DE CANA E APROVEITAMENTO DO PALHIÇO																	
PLANILHA DE CUSTOS																	
SISTEMA <input type="checkbox"/> ENFARDAMENTO COM CARREGAMENTO DIRETO																	
Premissas Gerais:																	
Taxa de juros	12% a.a.																
Seguros, taxas e abrigo	1% do valor do equipamento novo, anualmente																
Custo do diesel	2 R\$/l																
Encargos s/ salário mensal c/13º	102,00%																
Operadores /equipamento	3,6 operadores/equipamento (3 TURNOS) e 2,4 operadores/equipamento (2 TURNOS)																
A - CUSTOS FIXOS																	
	3T	3T	3T	3T	3T	2T	2T	2T	2T	3T	3T	3T	3T	3T	3T	3T	3T
Valor Inicial do Equipamento (R\$)	900.000,00	200.000,00	400.000,00	180.000,00	300.000,00	75.000,00	100.000,00	200.000,00	300.000,00	200.000,00	260.000,00	150.000,00	200.000,00	120.000,00	-	-	-
Vida útil (anos)	7	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	10	10	10	10	15	15
Valor residual (%)	25	20	25	10	10	20	10	20	20	20	10	20	10	25	10	10	10
Valor Final do Equipamento (R\$)	225.000,00	40.000,00	100.000,00	18.000,00	30.000,00	15.000,00	10.000,00	40.000,00	60.000,00	40.000,00	28.000,00	30.000,00	50.000,00	12.000,00	-	-	-
Salário mensal operador	2.500,00	2.000,00	2.000,00	-	-	1.500,00	-	1.500,00	-	-	1.500,00	-	1.500,00	-	-	-	-
A1 - DEPREC E RECUP CAPITAL	R\$ 219.507,45	R\$ 37.676,20	R\$ 75.492,03	R\$ 32.682,85	R\$ 54.804,77	R\$ 14.128,57	R\$ 18.268,26	R\$ 37.676,20	R\$ 92.687,50	R\$ 37.676,20	R\$ 41.581,87	R\$ 28.257,15	R\$ 38.248,04	R\$ 21.521,91	R\$ 450.000,00	R\$ 1.252.000,00	
A2 - SEGUROS, TAXAS, ABRIGO	9.000,00	2.000,00	4.000,00	1.800,00	3.000,00	750,00	1.000,00	2.000,00	3.000,00	2.000,00	2.800,00	1.500,00	2.000,00	1.200,00	-	-	-
A3 - MÃO DE OBRA	218.180,00	174.528,00	174.528,00	-	-	87.264,00	-	87.264,00	-	-	130.856,00	-	130.856,00	174.528,00	-	-	-
Custo Fixo (R\$/ano eqpto)	446.667,45	214.204,20	255.920,03	34.682,85	57.804,77	102.342,57	19.268,26	126.940,20	95.667,50	170.572,20	44.661,87	150.653,15	214.774,04	23.121,91	450.000,00	1.252.000,00	
Quantidade de eqpts (un)	20	40	20	80	28	4	4	4	4	4	-	4	4	12	1	-	-
Custo Fixo (R\$/ano)	8.933.349,06	8.698.187,36	5.100.401,64	2.774.629,16	1.616.533,68	408.670,30	77.073,03	507.760,80	388.670,01	0,00	0,00	642.612,60	859.096,16	277.462,92	450.000,00	0,00	
Custo Fixo Total (R\$/ano)	30.600.827,33																
B - CUSTO VARIÁVEL																	
	Colhedora	Trator transbord	Cavalo Mecânico	Conj Transbordos	Conj Rodotrem	Trator Enleiradora	Enleiradora	Trator Enfardadora	Enfardadora	Trator Coletor	Coletor	Carregadora	Caminhão Palhiço	Reb/Semireb Palhiço	Trituração Fardos	Estação Limpeza	
Consumo combustível	1,0 l/t	0,2 l/t	1,2 l/t	1,97 l/ha	1,97 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha	6,82 l/ha
Cons lubrif (% custo diesel)	10%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Índice manut anual (perc eqp novo)	15%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	10%	5%	3%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
B1 - COMBUSTIVEL	2,0 R\$/l	0,4 R\$/l	1,7 R\$/km	3,9 R\$/ha	3,9 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha	13,2 R\$/ha
B2 - LUBRIFICANTE	0,20 R\$/l	0,02 R\$/l	0,08 R\$/km	0,20 R\$/ha	0,20 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha	0,66 R\$/ha
B3 - MANUTENCAO	1,25 R\$/l	0,20 R\$/l	0,90 R\$/km	0,18 R\$/ha	0,30 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha	1,25 R\$/ha
Custo Variável (R\$/produção)	3,55 R\$/t	0,62 R\$/t	2,15 R\$/km	0,18 R\$/ha	0,30 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha	1,67 R\$/ha
Quantidade produzida	2.096.618 t	2.096.618 t	1.148.010 km	2.096.618 ha	1.148.010 ha	16.940 ha	16.940 ha	16.940 ha	16.940 ha	0 ha	0 ha	125.941 ha	258.620 ha	258.620 ha	129.941 ha	0 ha	0 ha
Custo Variável (R\$/ano)	7.442.922,46	1.291.902,91	2.468.221,50	377.351,17	344.403,00	28.233,29	28.233,29	28.233,29	28.233,29	0,00	0,00	209.889,89	387.930,00	387.930,00	217.462,92	0,00	0,00
Custo Variável Total (R\$/ano)	3.995.645,51																
C - RESUMO																	
Custo Fixo Total	8.933.349,06	8.698.187,36	5.100.401,64	2.774.629,16	1.616.533,68	408.670,30	77.073,03	507.760,80	388.670,01	0,00	0,00	642.612,60	859.096,16	277.462,92	450.000,00	0,00	0,00
Custo Variável Total	7.442.922,46	1.291.902,91	2.468.221,50	377.351,17	344.403,00	28.233,29	28.233,29	28.233,29	28.233,29	0,00	0,00	209.889,89	387.930,00	387.930,00	217.462,92	0,00	0,00
Custo Total (CANA e PALHIÇO)	16.376.341,54	9.989.090,27	7.568.623,14	3.152.020,33	1.962.936,68	498.825,95	105.306,33	806.414,10	678.131,28	0,00	0,00	852.502,49	1.247.026,16	664.925,84	909.587,05	0,00	0,00
Participação (%)	36,7%	22,1%	17,0%	7,1%	4,4%	1,1%	0,2%	1,8%	1,3%	0,0%	0,0%	1,7%	2,8%	0,7%	3,0%	0,0%	0,0%
CUSTO TOTAL (CANA e PALHIÇO)	44.595.971,84 R\$			38.927.992,57 R\$				5.667.978,27 R\$									
CANA PRODUZIDA	2.096.617,80 t			16,57 R\$/t cana				41,01 R\$/t palhiço (bu)									
PALHIÇO PRODUZIDO EM BU	138.217,51 t			38.927.992,57 R\$				44,38 R\$/t palhiço (ts)									
PALHIÇO PRODUZIDO EM BS	127.712,97 t																
UMIDADE PALHIÇO	7,80 %																

IMPORTANTE: O CUSTO ATRIBUÍDO AO PALHIÇO SE REFERE À DIFERENÇA DE CUSTO ENTRE O CENÁRIO EM AVALIAÇÃO E O CENÁRIO CONVENCIONAL, SEM RECOLHIMENTO DE PALHIÇO

APÊNDICE C – Resultados operacionais do cenário A2

Sistema Integrado de Colheita de Cana e Aproveitamento de Palhico							
Saída de dados							
Produção de cana e palhico							
Sistema	2	1	p/ Enfardamento com carregamento direto				
% palha na carga	5,4%	2	p/ Enfardamento com coletor de fardos				
		3	p/ Colheita Integral				
		4	p/ Colheita Parcial				
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Distâncias (km)	15	20	20	25	0	0	20,3
Prod cana (t/dia)	2.777,7	3.176,6	3.141,3	3.430,4	0,0	0,0	12.625,9
Prod palhico (t/dia)	187,5	187,1	187,7	186,2	0,0	0,0	748,4
Prod fardos (fardos/dia)	483	482	484	480	0	0	1.929
Máquinas - cana							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde colhedoras	5	5	5	5	0	0	20
Cap prod oper (t/dia)	555,5	635,3	628,3	686,1	-	-	626,3
%ocupação	33,9%	38,8%	38,4%	41,9%	-	-	38,2%
%manutenção	30,4%	26,2%	32,6%	27,7%	-	-	29,2%
%ociosidade	35,8%	35,0%	29,0%	30,5%	-	-	32,6%
Qtde transbordos	10	10	10	10	0	0	40
Cap prod oper (t/dia)	277,8	317,7	314,1	343,0	-	-	313,1
%ocupação	35,1%	40,2%	39,7%	43,5%	-	-	39,6%
%manutenção	10,9%	11,8%	11,4%	12,9%	-	-	11,8%
%ociosidade	53,9%	48,0%	48,8%	43,7%	-	-	48,6%
Transporte - cana							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens	4	5	5	6	0	0	20
Qtde Ser res campo	1	1	1	1	0	0	4
Cap prod oper (t/dia)	694,4	635,3	628,3	571,7	-	-	632,4
Qtde Treminhões	0	0	0	0	0	0	0
Qtde Conj res campo	0	0	0	0	0	0	0
Cap prod oper (t/dia)	-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)	18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)	30,5	29,1	30,7	32,3	-	-	-
Deslocto carregado (min)	22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)	49,5	49,5	49,5	49,5	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)	120,5	132,5	134,1	149,2	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	sim	Quant conj ser usina	4	Quant trator usina	4		
Usa bv campo?	sim	Quant conj jul usina	0	%Manut. Veiculos	9,2%		
Máquinas - palhico							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Enleiradoras	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (ha/dia)	37,5	42,4	42,0	45,0	-	-	41,7
%ocupação	53,0%	59,9%	59,4%	63,6%	-	-	59,0%
%manutenção	10,5%	12,4%	10,0%	12,8%	-	-	11,4%
Qtde Enfardadoras	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (ha/dia)	30,8	30,8	30,8	30,7	-	-	30,8
%ocupação	69,4%	69,3%	69,5%	69,1%	-	-	69,3%
%manutenção	11,7%	12,4%	11,9%	12,2%	-	-	12,1%
Qtde Coletor fardos	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (t/dia)	187,5	187,0	187,8	186,4	-	-	187,2
%ocupação	76,0%	75,9%	76,0%	75,6%	-	-	75,9%
%manutenção	7,5%	8,1%	7,3%	8,4%	-	-	7,6%
Qtde Carregadoras	1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (t/dia)	187,5	187,1	187,7	186,2	-	-	187,1
%ocupação	22,5%	22,4%	22,5%	22,3%	-	-	22,4%
%manutenção	6,8%	7,3%	6,4%	7,1%	-	-	6,9%
Transporte - palhico							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens	0	0	0	0	0	0	0
Qtde Pranchas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Treminhões	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Tetraminhões	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Pentaminhes	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	4,0
Cap prod oper (t/dia)	187,5	187,1	187,7	186,2	-	-	187,1
Deslocto vazio (min)	18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)	74,3	61,1	59,6	42,9	-	-	-
Deslocto carregado (min)	22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)	59,0	59,0	59,0	59,0	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)	173,8	174,1	172,6	169,4	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	sim	Qtde conj res usina	4	Quant trator usina	4		
Usa bv campo?	sim	Qtde conj res frentes	4	%Manut. Veiculos	3,9%		

APÊNDICE E – Resultados operacionais do cenário B1

Sistema Integrado de Colheita de Cana e Aproveitamento de Palhico								
Saída de dados								
Produção de cana e palhico								
Sistema	<input type="text" value="1"/>	1 p/ Enfardamento com carregamento direto 2 p/ Enfardamento com coletor de fardos 3 p/ Colheita Integral 4 p/ Colheita Parcial						
% palha na carga	<input type="text" value="5,4%"/>							
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Distâncias (km)		15	20	20	25	0	0	20,2
Prod cana (t/dia)		2.865,0	3.186,3	3.215,0	3.273,3	0,0	0,0	12.539,6
Prod palhico (t/dia)		236,7	261,4	263,5	265,9	0,0	0,0	1.027,4
Prod fardos (fardos/dia)		610	674	679	685	0	0	2.648
Máquinas - cana								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde colhedoras		5	5	5	5	0	0	20
Cap prod oper (t/dia)		573,0	637,3	643,0	654,7	-	-	627,0
%ocupação		35,0%	38,9%	39,3%	40,0%	-	-	38,3%
%manutenção		28,6%	21,9%	24,8%	29,6%	-	-	26%
%ociosidade		36,5%	39,2%	35,9%	30,4%	-	-	36%
Qtde transbordos		10	10	10	10	0	0	40
Cap prod oper (t/dia)		286,5	318,6	321,5	327,3	-	-	313,5
%ocupação		36,3%	40,3%	40,6%	41,4%	-	-	39,7%
%manutenção		12,5%	13,0%	11,9%	11,3%	-	-	12%
%ociosidade		51,2%	46,7%	47,4%	47,2%	-	-	48%
Transporte - cana								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens		4	5	5	6	0	0	20
Qtde Ser res campo		1	1	1	1	0	0	4
Cap prod oper (t/dia)		716,3	637,3	643,0	545,5	-	-	635,5
Qtde Treminhões		0	0	0	0	0	0	0
Qtde Conj res campo		0	0	0	0	0	0	0
Cap prod oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)		18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)		24,3	25,4	24,7	34,2	-	-	-
Deslocto carregado (min)		22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)		52,5	52,5	52,5	52,5	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)		117,3	132,0	131,3	154,2	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	<input type="text" value="sim"/>	Quant conj ser usina	<input type="text" value="4"/>	Quant trator usina	<input type="text" value="4"/>			
Usa bv campo?	<input type="text" value="sim"/>	Quant conj jul usina	<input type="text" value="0"/>	%Manut. Veiculos	<input type="text" value="9,3%"/>			
Máquinas - palhico								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Enleiradoras		1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (ha/dia)		33,5	36,8	37,1	37,6	-	-	36,2
%ocupação		47,3%	51,9%	52,5%	53,1%	-	-	51,2%
%manutenção		11,2%	13,5%	10,3%	13,0%	-	-	12,0%
Qtde Enfardadoras		2	2	2	2	0	0	8
Cap campo oper (ha/dia)		16,7	18,4	18,6	18,8	-	-	18,1
%ocupação		37,7%	41,4%	41,8%	42,3%	-	-	40,8%
%manutenção		10,3%	11,1%	10,1%	10,7%	-	-	10,5%
Qtde Coletor fardos		0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
%ocupação		-	-	-	-	-	-	-
%manutenção		-	-	-	-	-	-	-
Qtde Carregadoras		1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (t/dia)		236,7	261,4	263,5	265,9	-	-	256,9
%ocupação		41,5%	45,9%	46,2%	46,6%	-	-	45,0%
%manutenção		5,6%	6,9%	6,6%	7,0%	-	-	6,5%
Transporte - palhico								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens		1	1	1	1	0	0	4
Qtde Pranchas		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Treminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Tetraminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Pentaminhes		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cap prod oper (t/dia)		236,7	261,4	263,5	265,9	-	-	256,9
Deslocto vazio (min)		18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)		37,7	24,3	22,5	18,0	-	-	-
Deslocto carregado (min)		22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)		26,5	26,5	26,5	26,5	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)		104,6	104,7	103,0	112,0	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	<input type="text" value="sim"/>	Qtde conj ser usina	<input type="text" value="4"/>	Quant trator usina	<input type="text" value="4"/>			
Usa bv campo?	<input type="text" value="sim"/>	Qtde conj res frentes	<input type="text" value="4"/>	%Manut. Veiculos	<input type="text" value="3,9%"/>			

APÊNDICE F – Resultados operacionais do cenário B2

Sistema Integrado de Colheita de Cana e Aproveitamento de Palhico								
Saída de dados								
Produção de cana e palhico								
Sistema	2	1		p/ Enfardamento com carregamento direto				
% palha na carga	5,4%	2		p/ Enfardamento com coletor de fardos				
		3		p/ Colheita Integral				
		4		p/ Colheita Parcial				
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Distâncias (km)		15	20	20	25	0	0	20,2
Prod cana (t/dia)		2.818,3	3.172,2	3.096,3	3.433,9	0,0	0,0	12.520,6
Prod palhico (t/dia)		232,7	260,1	254,7	279,5	0,0	0,0	1.027,0
Prod fardos (fardos/dia)		600	670	657	720	0	0	2.647
Máquinas - cana								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde colhedoras		5	5	5	5	0	0	20
Cap prod oper (t/dia)		563,7	634,4	619,3	686,8	-	-	626,0
%ocupação		34,4%	38,8%	37,8%	42,0%	-	-	38,3%
%manutenção		29,8%	28,6%	33,1%	21,4%	-	-	28%
%ociosidade		35,8%	32,6%	29,1%	36,7%	-	-	34%
Qtde transbordos		10	10	10	10	0	0	40
Cap prod oper (t/dia)		281,8	317,2	309,6	343,4	-	-	313,0
%ocupação		35,6%	40,1%	39,1%	43,4%	-	-	39,6%
%manutenção		11,9%	12,4%	11,2%	11,7%	-	-	12%
%ociosidade		52,5%	47,4%	49,7%	44,9%	-	-	49%
Transporte - cana								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens		4	5	5	6	0	0	20
Qtde Ser res campo		1	1	1	1	0	0	4
Cap prod oper (t/dia)		704,6	634,4	619,3	572,3	-	-	632,6
Qtde Treminhões		0	0	0	0	0	0	0
Qtde Conj res campo		0	0	0	0	0	0	0
Cap prod oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)		18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)		27,8	27,6	30,0	27,7	-	-	-
Deslocto carregado (min)		22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)		51,6	51,6	51,6	51,6	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)		119,9	133,2	135,6	146,7	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	sim	Quant conj ser usina		4	Quant trator usina		4	
Usa bv campo?	sim	Quant conj jul usina		0	%Manut. Veiculos		9,3%	
Máquinas - palhico								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Enleiradoras		1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (ha/dia)		32,8	36,6	36,0	39,5	-	-	36,2
%ocupação		46,3%	51,7%	50,8%	55,7%	-	-	51,1%
%manutenção		12,2%	13,2%	11,4%	12,8%	-	-	12,4%
Qtde Enfardadoras		2	2	2	2	0	0	8
Cap campo oper (ha/dia)		16,4	18,3	18,0	19,7	-	-	18,1
%ocupação		36,9%	41,2%	40,5%	44,4%	-	-	40,8%
%manutenção		9,6%	10,0%	10,3%	10,6%	-	-	10,1%
Qtde Coletor fardos		2	2	2	2	0	0	8
Cap campo oper (t/dia)		116,5	130,2	127,7	139,9	-	-	128,6
%ocupação		47,3%	52,8%	51,9%	56,7%	-	-	52,2%
%manutenção		6,8%	6,5%	6,5%	6,7%	-	-	7%
Qtde Carregadoras		1	1	1	1	0	0	4
Cap campo oper (t/dia)		232,7	260,1	254,7	279,5	-	-	256,7
%ocupação		27,9%	31,2%	30,5%	33,5%	-	-	30,8%
%manutenção		6,7%	7,3%	6,6%	7,2%	-	-	7,0%
Transporte - palhico								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens		1	1	1	1	0	0	4
Qtde Pranchas		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Treminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Tetraminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Pentaminhes		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cap prod oper (t/dia)		232,7	260,1	254,7	279,5	-	-	256,7
Deslocto vazio (min)		18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)		31,3	23,5	23,2	15,9	-	-	-
Deslocto carregado (min)		22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)		26,5	26,5	26,5	26,5	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)		98,2	103,9	103,7	109,8	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	sim	Qtde conj res usina		4	Quant trator usina		4	
Usa bv campo?	sim	Qtde conj res frentes		4	%Manut. Veiculos		4,0%	

APÊNDICE J – Resultados operacionais do cenário B3_3

Sistema Integrado de Colheita de Cana e Aproveitamento de Palhico							
Saída de dados							
Produção de cana e palhico							
Sistema	4		1		p/ Enfardamento com carregamento direto		
% palha na carga	12,7%		2		p/ Enfardamento com coletor de fardos		
			3		p/ Colheita Integral		
			4		p/ Colheita Parcial		
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Distâncias (km)	15	20	20	25	0	0	20,0
Prod cana (t/dia)	3.055,5	3.150,3	3.115,1	3.160,0	0,0	0,0	12.480,9
Prod palhico (t/dia)	194,0	200,0	197,8	200,7	0,0	0,0	792,5
Prod fardos (fardos/dia)	-	-	-	-	-	-	-
Máquinas - cana							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde colhedoras	5	5	5	5	0	0	20
Cap prod oper (t/dia)	611,1	630,1	623,0	632,0	-	-	624,0
%ocupação	35,6%	36,6%	36,2%	36,7%	-	-	36%
%manutenção	27,6%	28,0%	23,7%	26,8%	-	-	27%
%ociosidade	36,8%	35,4%	40,1%	36,4%	-	-	37%
Qtde transbordos	10	10	10	10	0	0	40
Cap prod oper (t/dia)	305,5	315,0	311,5	316,0	-	-	312,0
%ocupação	46,0%	47,5%	46,9%	47,6%	-	-	47%
%manutenção	11,6%	12,3%	12,1%	11,7%	-	-	12%
%ociosidade	42,4%	40,2%	41,0%	40,7%	-	-	41%
Transporte - cana							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens	6	7	7	8	0	0	28
Qtde Ser res campo	2	2	2	2	0	0	8
Cap prod oper (t/dia)	509,2	450,0	445,0	395,0	-	-	449,8
Qtde Treminhões	0	0	0	0	0	0	0
Qtde Conj res campo	0	0	0	0	0	0	0
Cap prod oper (t/dia)	-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)	18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)	27,6	29,5	30,4	34,7	-	-	-
Deslocto carregado (min)	22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)	48,7	48,7	48,7	48,7	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)	116,7	132,2	133,1	150,9	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	sim		Quant conj ser usina	4	Quant trator usina	4	
Usa bv campo?	sim		Quant conj jul usina	0	%Manut. Veiculos	9,3%	
Máquinas - palhico							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Enleiradoras	0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (ha/dia)	-	-	-	-	-	-	-
%ocupação	-	-	-	-	-	-	-
%manutenção	-	-	-	-	-	-	-
Qtde Enfardadoras	0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (ha/dia)	-	-	-	-	-	-	-
%ocupação	-	-	-	-	-	-	-
%manutenção	-	-	-	-	-	-	-
Qtde Coletor fardos	0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (t/dia)	-	-	-	-	-	-	-
%ocupação	-	-	-	-	-	-	-
%manutenção	-	-	-	-	-	-	-
Qtde Carregadoras	0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (t/dia)	-	-	-	-	-	-	-
%ocupação	-	-	-	-	-	-	-
%manutenção	-	-	-	-	-	-	-
Transporte - palhico							
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens	0	0	0	0	0	0	0
Qtde Pranchas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Treminhões	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Tetraminhões	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Pentaminhes	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cap prod oper (t/dia)	-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)	-	-	-	-	-	-	-
Tempo no Campo (min)	-	-	-	-	-	-	-
Deslocto carregado (min)	-	-	-	-	-	-	-
Tempo na Usina (min)	-	-	-	-	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	sim		Qtde conj ser usina	0	Quant trator usina	4	
Usa bv campo?	sim		Qtde conj res frentes	4	%Manut. Veiculos	-	

APÊNDICE K – Resultados operacionais do cenário B3_4

Sistema Integrado de Colheita de Cana e Aproveitamento de Palhico								
Saída de dados								
Produção de cana e palhico								
Sistema	<input type="text" value="4"/>			1	p/ Enfardamento com carregamento direto			
% palha na carga	<input type="text" value="12,7%"/>			2	p/ Enfardamento com coletor de fardos			
				3	p/ Colheita Integral			
				4	p/ Colheita Parcial			
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Distâncias (km)		15	20	20	25	0	0	20,1
Prod cana (t/dia)		2.729,8	2.827,1	2.871,5	2.987,2	0,0	0,0	11.415,7
Prod palhico (t/dia)		173,3	179,5	182,3	189,7	0,0	0,0	724,9
Prod fardos (fardos/dia)		-	-	-	-	-	-	-
Máquinas - cana								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde colhedoras		5	5	5	5	0	0	20
Cap prod oper (t/dia)		546,0	565,4	574,3	597,4	-	-	570,8
%ocupação		31,7%	32,8%	33,3%	34,7%	-	-	33%
%manutenção		26,4%	28,4%	31,7%	24,8%	-	-	28%
%ociosidade		41,9%	38,8%	35,0%	40,5%	-	-	39%
Qtde transbordos		10	10	10	10	0	0	40
Cap prod oper (t/dia)		273,0	282,7	287,2	298,7	-	-	285,4
%ocupação		41,2%	42,6%	43,3%	45,0%	-	-	43%
%manutenção		12,2%	12,0%	11,7%	11,8%	-	-	12%
%ociosidade		46,6%	45,4%	45,0%	43,2%	-	-	45%
Transporte - cana								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens		4	5	5	6	0	0	20
Qtde Ser res campo		1	1	1	1	0	0	4
Cap prod oper (t/dia)		682,4	565,4	574,3	497,9	-	-	580,0
Qtde Treminhões		0	0	0	0	0	0	0
Qtde Conj res campo		0	0	0	0	0	0	0
Cap prod oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)		18,0	24,0	24,0	30,1	-	-	-
Tempo no Campo (min)		21,5	25,6	24,0	27,7	-	-	-
Deslocto carregado (min)		22,4	29,9	29,9	37,4	-	-	-
Tempo na Usina (min)		23,7	23,7	23,7	23,7	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)		85,7	103,3	101,7	118,9	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	<input type="text" value="sim"/>	Quant conj ser usina		<input type="text" value="4"/>	Quant trator usina		<input type="text" value="4"/>	
Usa bv campo?	<input type="text" value="sim"/>	Quant conj jul usina		<input type="text" value="0"/>	%Manut. Veiculos		<input type="text" value="10,6%"/>	
Máquinas - palhico								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Enleiradoras		0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (ha/dia)		-	-	-	-	-	-	-
%ocupação		-	-	-	-	-	-	-
%manutenção		-	-	-	-	-	-	-
Qtde Enfardadoras		0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (ha/dia)		-	-	-	-	-	-	-
%ocupação		-	-	-	-	-	-	-
%manutenção		-	-	-	-	-	-	-
Qtde Coletor fardos		0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
%ocupação		-	-	-	-	-	-	-
%manutenção		-	-	-	-	-	-	-
Qtde Carregadoras		0	0	0	0	0	0	0
Cap campo oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
%ocupação		-	-	-	-	-	-	-
%manutenção		-	-	-	-	-	-	-
Transporte - palhico								
		Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	TOTAL
Qtde Rodotrens		0	0	0	0	0	0	0
Qtde Pranchas		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Treminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Tetraminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Qtde Pentaminhões		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cap prod oper (t/dia)		-	-	-	-	-	-	-
Deslocto vazio (min)		-	-	-	-	-	-	-
Tempo no Campo (min)		-	-	-	-	-	-	-
Deslocto carregado (min)		-	-	-	-	-	-	-
Tempo na Usina (min)		-	-	-	-	-	-	-
TEMPO DE CICLO (min)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Usa bv usina?	<input type="text" value="sim"/>	Qtde conj res usina		<input type="text" value="0"/>	Quant trator usina		<input type="text" value="4"/>	
Usa bv campo?	<input type="text" value="sim"/>	Qtde conj res frentes		<input type="text" value="4"/>	%Manut. Veiculos		<input type="text" value="-"/>	

ANEXOS

ANEXO A – ÁLCOOL COMBUSTÍVEL



Álcool combustível

1) Participação do MDIC

O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior é membro do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA) que foi criado com o objetivo de deliberar sobre as políticas públicas para o setor sucroalcooleiro, conforme o [Decreto nº 3.541 \[http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D3546.htm\]](#), de 17 de julho de 2000. O CIMA é presidido pelo titular do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), acompanhado pelos ministros deste MDIC, do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Ministério da Fazenda (MF). O MDIC mantém interlocução com os fabricantes de máquinas e equipamentos empregados na produção de biocombustíveis, fases agrícola e industrial, com os fabricantes de veículos automotores que utilizam biocombustíveis, como automóveis, ônibus, aviões e motocicletas, com os fabricantes que produzem componentes para veículos movidos a biocombustíveis, com produtores de biocombustíveis e investidores interessados em implementar projeto nesta área, bem como com as empresas que desenvolvem projetos na área de alcoolquímica. O MDIC, em sinergia com diversos órgãos governamentais e do setor privado, participa de iniciativas bilaterais e multilaterais para estimular a produção e o uso dos biocombustíveis em terceiros países e desenvolver o mercado internacional destes energéticos. Neste contexto, o MDIC participa, por exemplo, de grupos de trabalho com vistas à implementação de Memorando de Entendimento firmados entre o governo brasileiro e os governos de diversos países em matéria de cooperação na área de biocombustíveis. Ainda na esfera internacional, destacam-se os acordos comerciais do setor automotivo firmados pelo governo brasileiro, sob a coordenação do MDIC e do MRE, com o governo de diversos países que permitem o intercâmbio comercial, com preferência tarifária, de veículos, inclusive os *Flex Fuel* e autopeças (sistema *Flex Fuel* de gerenciamento eletrônico de motores), dentre outros itens.

2) Uso veicular do álcool combustível

- O álcool etílico, ou etanol, é usado no Brasil, em larga escala, como combustível, por meio de dois programas distintos: como álcool hidratado comercializado via bombas específicas nos postos de abastecimento, em veículos movidos exclusivamente a álcool e em veículos *Flex Fuel*, ou como álcool anidro em mistura obrigatória à gasolina. A [Lei nº 8.723 \[http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8723.htm\]](#), de 28 de outubro de 1993, dispõe que o Poder Executivo fixará o percentual da mistura de álcool anidro na gasolina no intervalo de 18% a 25%.

- A competência legal para definir o percentual de álcool anidro na gasolina é do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA). Atualmente vigora a mistura de 25% de álcool anidro na gasolina.

- Os veículos *Flex Fuel* foram lançados comercialmente no mercado brasileiro em 2003. Atualmente dez montadoras (Peugeot-Citroen, Fiat, Ford, General Motors, Volkswagen, Renault, Mitsubishi, Toyota, Honda e Nissan) estão fabricando e comercializando 114 modelos de veículos *Flex Fuel* no Brasil. A Kia Motors também comercializa no Brasil veículos *Flex Fuel* produzidos na Coreia do Sul. Os proprietários destes veículos podem escolher o combustível (qualquer proporção ou mistura de gasolina ou álcool hidratado) a cada abastecimento conforme preço e disponibilidade dos combustíveis, desempenho e consumo. Desde o lançamento já foram comercializados 13,8 milhões de veículos *Flex Fuel*. Em 2011 (até junho) a participação destes veículos no mercado brasileiro de veículos leves foi de 83,8 % (dados mais detalhados podem ser obtidos no item "Estatísticas e anexos").

- O advento dos veículos *Flex Fuel* gerou um aumento significativo no consumo de álcool hidratado no Brasil: 4,3 bilhões de litros em 2003 para 15 bilhões de litros em 2010. Cabe destacar que nos EUA a frota deste tipo de veículo é superior a 7 milhões de unidades que podem ser abastecidas com qualquer mistura de E-85 (85% de etanol e 15% de gasolina) e gasolina. Outros países como Suécia, Espanha, Alemanha, França, Holanda, Inglaterra e Canadá estão incentivando o uso de veículos *Flex Fuel*.

- Os veículos *Flex Fuel* e os movidos exclusivamente a álcool hidratado têm alíquotas do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) menores em relação aos veículos a gasolina. O [Decreto nº 4.317 \[http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4317.htm\]](#), de 31 de julho de 2002 fixou as alíquotas do IPI de veículos *Flex Fuel* (início do tratamento tributário destes veículos) e induziu o lançamento dos mesmos no ano seguinte. As atuais alíquotas do IPI para automóveis (Decreto nº 7.017, de 26 de novembro de 2009), de acordo com a cilindrada e o combustível, constam no item "Estatísticas e anexos".

- Fabricantes brasileiros têm trabalhado no desenvolvimento de motocicletas *Flex Fuel* cujo primeiro modelo (Honda CG 150 Titan MIX) foi lançado comercialmente em março de 2009.

- Desde 2005 a indústria aeronáutica Neiva, subsidiária da Empresa Brasileira de Aeronáutica (Embraer), comercializa aviões agrícolas movidos a álcool hidratado usados para pulverização de lavouras. O modelo Ipanema foi a primeira aeronave de série no mundo a obter autorização para voar com álcool combustível. Para os proprietários de modelos Ipanema movidos a gasolina, existe a opção de realizar a conversão do motor para utilizar álcool por meio de kits. Mais informações em <http://www.aeroneiva.com.br/site/content/home/default.asp>.

- Em outubro de 2007 ocorreu o lançamento do primeiro ônibus brasileiro movido a álcool, no âmbito do Projeto BEST - *BioEthanol for Sustainable Transport*. Trata-se de uma iniciativa da União Européia que tem como objetivo divulgar mundialmente o uso do álcool combustível com o apelo à redução do uso de combustíveis fósseis e de emissões de gases geradores de efeito estufa. O Projeto está sendo coordenado pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO) da Universidade de São Paulo (USP). Os ônibus (chassis e motores) com motorização do ciclo diesel, movidos a álcool, serão importados da Suécia e circularão no corredor Jabaquara – São Matheus (Região Metropolitana de São Paulo) para a realização de estudos de viabilidade comercial e avaliação do desempenho deste tipo de ônibus em relação aos ônibus convencionais. Os referidos ônibus a álcool são equipados com motores que atendem a norma de emissões PROCONVE (<http://www.ibama.gov.br/proconve/login.php>).

3) Produção e exportação

O Brasil tem trabalhado não só no sentido de aumentar sua produção de álcool etílico para fins carburantes, a partir da cana-de-açúcar, como também de transferir sua experiência e tecnologia para que outros países tropicais, que dispõem de terras, mão-de-obra e radiação solar

intensa, possam ser produtores e exportadores de álcool, ampliando e diversificando sua oferta no mercado mundial. A intenção é torna o álcool uma commodity internacional.

Na safra 2010/2011 foram produzidos no Brasil 27,6 bilhões de litros de álcool (8 bilhões de litros de anidro e 19,6 de hidratado), aumente de 7% em relação a safra 2009/2010 na qual foram produzidos 25,8 bilhões de litros. Na safra 2010/2011 foram produzidas no Brasil 62 milhões de toneladas de cana-de-açúcar.

O setor sucroalcooleiro tem 437 unidades produtoras, sendo 168 produtoras de álcool, 16 de açúcar e 253 de açúcar e álcool.

O Brasil dispõe de um parque industrial de produção de bens de capital para a agroindústria sucroalcooleira que lhe permitiu fazer toda expansão e aprimoramento na sua produção de álcool (<http://www.abimaq.org.br/> [<http://www.abimaq.org.br/>]; <http://www.ceiseciesp.org.br/> [<http://www.ceiseciesp.org.br/>]). Também agora, não só a ampliação e aperfeiçoamento de sua capacidade instalada está baseada no setor brasileiro de bens de capital como tem ocorrido exportações para ampliação da indústria sucroalcooleira de outros países.

Alcoolquímica

No Brasil a alcoolquímica é anterior à petroquímica. Só algumas décadas depois de a indústria alcoolquímica ter sido implantada é que chegou a petroquímica. Com a elevação dos preços do petróleo, a indústria química procura sucedâneos e já duas novas indústrias foram anunciadas para produzir eteno a partir de etanol (<http://www.braskem.com.br/> [<http://www.braskem.com.br/>]; <http://www.dow.com/> [<http://www.dow.com/>]; <http://www.crystalsev.com.br/internas/empresa.php> [<http://www.crystalsev.com.br/internas/empresa.php>]). O retorno da alcoolquímica abre grandes perspectivas para ampliação de mercado para a agroindústria sucroalcooleira.

Financiamento – atuação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES)

- O BNDES possui programas para o financiamento de diversos elos da cadeia produtora de biocombustíveis, tais como: plantio da cana-de-açúcar e de oleaginosas; aquisição de máquinas e equipamentos; desenvolvimento tecnológico; infra-estrutura para armazenagem, cogeração de energia.

- O BNDES desembolsou em 2010 cerca de R\$ 7,6 bilhões para o setor sucroalcooleiro. Em 2009, o banco liberou R\$ 6,5 bilhões para o setor.

- Pode-se citar os seguintes programas de financiamento do BNDES para a cadeia sucroalcooleira: FINAME agrícola (financiamento para aquisição de máquinas e equipamentos novos, de fabricação nacional), FINEM (financiamento para a realização de projetos de implantação expansão e modernização), MODERFROTA (financiamento para a aquisição de tratores agrícolas e implementos associados e colheitadeiras) MODERMAQ (financiamento à aquisição de bens de capital), FUNTEC (apoiar financeiramente projetos que objetivam estimular o desenvolvimento tecnológico e a inovação de interesse estratégico para o país), PROINFA (investimentos em projetos de geração de energia a partir de fontes alternativas).

- Destaca-se o FUNTEC (fundo tecnológico), por ser um programa destinado a investir em áreas consideradas de fronteira tecnológica, incluindo os desenvolvimentos tecnológicos ligados às energias renováveis provenientes da biomassa, capazes de assegurar, no longo prazo, a competitividade do Brasil nesta área.

Exportação

- Em 2011 (até junho) o Brasil exportou 545 milhões de litros de álcool, volume 18,1% inferior ao mesmo período de 2010. Em 2010 o Brasil exportou 1,9 bilhão de litros de álcool, volume 42,4% inferior ao de 2009. As receitas obtidas com as exportações de álcool em 2010 foram de US\$ 1 bilhão (redução de 24% em relação a 2009). Dados mais detalhados podem ser obtidos no item "Estatísticas e anexos".

- O Brasil exporta para países como EUA, Japão, Jamaica, Nigéria, Coreia do Sul, Suécia, Países Baixos (Porto de Rotterdam, Holanda), Costa Rica, El Salvador e México.

- Os EUA são grandes importadores de álcool brasileiro (313 milhões de litros importados diretamente em 2010), apesar do seu nível elevado de imposto de importação (o álcool importado pelos EUA é tributado com a alíquota específica de US\$ 0,14 por litro e a alíquota *ad valorem* de 2,5%). Empresas brasileiras também exportam para países da América Central e do Caribe etanol hidratado que é reindustrializado (desidratado e transformado em anidro) e reexportado para os EUA. Em 2009 o Brasil exportou para os referidos países cerca de 777 milhões de litros. Os países da União Européia também importam volumes significativos do Brasil. Em 2009 importaram cerca de 876 milhões de litros de álcool do Brasil. Na União Européia, o imposto que incide sobre o álcool brasileiro tem dois valores: US\$ 0,24 por litro para o álcool etílico não desnaturado e US\$ 0,13 por litro para o álcool etílico e aguardentes, desnaturados.

4) Cooperação Internacional

Fórum Internacional de Biocombustíveis:

O Fórum foi lançado em 2007 e trata-se de uma iniciativa brasileira para o desenvolvimento do uso de biocombustíveis.

Integrado pelos governos do Brasil, EUA, China, Índia, União Européia e África do Sul (grandes produtores e/ou consumidores de biocombustíveis) com o objetivo principal de promover a consolidação de um mercado internacional para os biocombustíveis e, em particular, com vistas a transformação do álcool combustível em produto comercializado internacionalmente.

[Memorando de Entendimento sobre Biocombustíveis firmado entre os governos do Brasil e dos Estados Unidos da América](http://www2.mre.gov.br/dai/b_eua_332_5915.htm)
[http://www2.mre.gov.br/dai/b_eua_332_5915.htm]

Este Memorando firmado durante a visita do Presidente George W. Bush ao Brasil em de 2007. Aborda os seguintes aspectos:

Foco Bilateral – Pesquisa e Desenvolvimento para biocombustíveis de próximas gerações, com ênfase no álcool celulósico.

Foco Terceiros Países - Fomento para a produção e o uso de biocombustíveis em terceiros países, priorizando inicialmente os países da América Central e do Caribe.

Foco Multilateral - Desenvolvimento do mercado mundial de biocombustíveis com base no estabelecimento de padrões (materiais de referência que permitirão a elaboração de especificações para os biocombustíveis - trabalho que o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) está desenvolvendo com o National Institute of Standards and Technology (NIST) do EUA no âmbito do "Mecanismo de Consultas Informais" instalado em 2006 entre o MDIC e o Departamento de Comércio (DOC) dos Estados Unidos. O INMETRO já desenvolveu materiais de referência para as seguintes características do álcool combustível: PH, condutividade, massa específica, teor de água e teor de álcool. Este Memorando de Entendimento propõe que os resultados da parceria INMETRO-NIST sejam aproveitados pelos demais países produtores e consumidores de álcool combustível.

[Memorando sobre Biocombustíveis firmado entre os países do Mercosul \[http://www.mercosur.int/msweb/SM/Actas?20TEMPORARIAS/CMC/XXI%20CMC%20FINAL/ANEXOS/CMC_2006_ACTA02_ANE06_PT_MemoBiocombustibles.pdf\]](http://www.mercosur.int/msweb/SM/Actas?20TEMPORARIAS/CMC/XXI%20CMC%20FINAL/ANEXOS/CMC_2006_ACTA02_ANE06_PT_MemoBiocombustibles.pdf)

Firmado em 2006 na reunião do Conselho Mercado Comum (CMC) o Memorando de Entendimento entre os países do Mercosul com vistas à obtenção e à elaboração de um programa de cooperação na área de biocombustíveis e suas tecnologias. O Grupo de Trabalho previsto no Memorando tem trabalhado no plano de ações para orientar a implementação do mesmo.

[Memorando de Entendimento entre o governo do Brasil e a União Econômica e Monetária do Oeste Africano \(UEMOA\) na área de biocombustíveis \[http://www.mre.gov.br/portugues/imprensa/nota_detalhe3.asp?ID_RELEASE=4804\]](http://www.mre.gov.br/portugues/imprensa/nota_detalhe3.asp?ID_RELEASE=4804)

[Memorando de Entendimento firmado entre os governos do Brasil e do Panamá para estabelecer Força-Tarefa na área de biocombustíveis \[http://www2.mre.gov.br/dai/b_pana_37_6059.htm\]](http://www2.mre.gov.br/dai/b_pana_37_6059.htm)

[Memorando de Entendimento firmado entre os governos do Brasil e do Chile na área de biocombustíveis \[http://www2.mre.gov.br/dai/b_chil_132_5959.htm\]](http://www2.mre.gov.br/dai/b_chil_132_5959.htm)

[Memorando de Entendimento em matéria de cooperação energética entre Brasil e México \[././arquivos/dwnl_1210166326.doc\]](#)

[Memorando de Entendimento firmado entre os governos do Brasil e dos Países Baixos na área de Bioenergia, incluindo Biocombustíveis \[././arquivos/dwnl_1210166215.doc\]](#)

[Memorando de Entendimento firmado entre os governos do Brasil e da Suécia na área de Bioenergia, incluindo Biocombustíveis \[././arquivos/dwnl_1210272881.doc\]](#)

[Memorando de Entendimento entre os governos do Brasil, da África do Sul e da Índia para estabelecer força-tarefa trilateral sobre biocombustíveis \[http://www2.mre.gov.br/dai/b_ibas_3881_2006.htm\]](http://www2.mre.gov.br/dai/b_ibas_3881_2006.htm)

[Memorando de Entendimento entre os governos do Brasil e da Dinamarca sobre Cooperação nas Áreas de Energias Renováveis e Eficiência Energética \[http://www.mre.gov.br/portugues/imprensa/nota_detalhe3.asp?ID_RELEASE=4707\]](http://www.mre.gov.br/portugues/imprensa/nota_detalhe3.asp?ID_RELEASE=4707)

[Memorando de Entendimento entre os governos do Brasil e de Moçambique na Área de Biocombustíveis \[././arquivos/dwnl_1220622301.doc\]](#)

5) Estatísticas e anexos

- 1) Participação dos veículos Flex Fuel e demais no mercado de veículos leves [\[././arquivos/dwnl_1310654409.xls\]](#) 2) Atuais alíquotas do IPI para automóveis [\[././arquivos/dwnl_1272640809.xls\]](#)
- 3) Exportação e importação de álcool etílico [\[././arquivos/dwnl_1310651897.xls\]](#)
- 4) Destino das exportações brasileiras de álcool etílico [\[././arquivos/dwnl_1310651980.xls\]](#)
- 5) Exportação de álcool etílico por unidade da federação [\[././arquivos/dwnl_1310652067.xls\]](#)
- 6) Exportação de álcool etílico por portos [\[././arquivos/dwnl_1310652119.xls\]](#)

6) Links importantes:

Entidades de classe:

[União da Indústria da Cana-de-açúcar \[http://www.unica.com.br\]](http://www.unica.com.br)

[União dos Produtores de Bioenergia](#)

[\[http://www.udop.com.br\]](http://www.udop.com.br) Associação dos Produtores de Álcool e Açúcar do Estado do Paraná/SIALPAR/SIAPAR [\[http://www.alcopol.org.br\]](http://www.alcopol.org.br)

[Cooperativa dos Plantadores de Cana do Estado de São Paulo \[http://www.canaoeste.com.br\]](http://www.canaoeste.com.br)

[Sindicato da Fabricação do Álcool no Estado de Minas Gerais](#)

[\[http://www.siamiq.com.br\]](http://www.siamiq.com.br) Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo [\[http://www.copersucar.com.br\]](http://www.copersucar.com.br)

[Sindicato da Indústria de Fabricação do Álcool no Estado de Goiás \[http://www.sifaeg.com.br\]](http://www.sifaeg.com.br)

[Organização de Plantadores de Cana do Estado de São Paulo \[http://www.orplana.com.br\]](http://www.orplana.com.br)

[Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Agrícola \[http://www.sindag.com.br\]](http://www.sindag.com.br)

[Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Pernambuco \[http://www.sindacucar.com.br\]](http://www.sindacucar.com.br)

[Sociedade dos Técnicos de Açucareiros e Alcooleiros do Brasil \[http://www.stab.org.br\]](http://www.stab.org.br)

[Associação do Comércio Exterior do Brasil \[http://www.aeb.org.br\]](http://www.aeb.org.br)

Internacionais:

[NIST - National Institute of Standards and Technology \[http://www.nist.gov/\]](http://www.nist.gov/)

[ASA - Sugar Sites \[http://www.sugaralliance.org/\]](http://www.sugaralliance.org/)
[ASOCAÑA \[http://www.asocana.com.co/\]](http://www.asocana.com.co/)
[CANEGROWERS \[http://www.canegrowers.com.au/\]](http://www.canegrowers.com.au/)
[CENICANA \[http://www.cenicana.org/\]](http://www.cenicana.org/)
[SASA \[http://www.sugar.org.za/\]](http://www.sugar.org.za/)
[Sugar Cane Growers Cooperative of Florida \[http://www.scgc.org/\]](http://www.scgc.org/)
[Sugar online.com \[http://sugaronline.com/\]](http://www.sugaronline.com/)
[Tongaat-Hulett Sugar Limited \[http://www.hulets.co.za/\]](http://www.hulets.co.za/)
[USDA -United States Department of Agriculture \[http://www.canaipoint.sugarcane.usda.gov/\]](http://www.canaipoint.sugarcane.usda.gov/)

WABCG

<http://www.ifap.org/wabcg/index1.html> [http://www.ifap.org/wabcg/index1.html]

<http://www.ethanolrfa.org/> [http://www.ethanolrfa.org/]

Governo:

[AgênciaCT - Ministério da Ciência e Tecnologia \[http://www.agenciact.mct.gov.br/\]](http://www.agenciact.mct.gov.br/)
[ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis \[http://www.anp.gov.br/\]](http://www.anp.gov.br/)
[BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social \[http://www.bndes.gov.br/\]](http://www.bndes.gov.br/)
[CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental \[http://www.cetesb.sp.gov.br/\]](http://www.cetesb.sp.gov.br/)
[FUNBIO - Fundo Brasileiro para a Biodiversidade \[http://www.funbio.org.br/\]](http://www.funbio.org.br/)
[IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis \[http://www.ibama.gov.br/\]](http://www.ibama.gov.br/)
[IEA - Instituto de Economia Agrícola \[http://www.iea.sp.gov.br/\]](http://www.iea.sp.gov.br/)
[MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento \[http://www.agricultura.gov.br/\]](http://www.agricultura.gov.br/)
[MME - Ministério de Minas e Energia \[http://www.mme.gov.br/\]](http://www.mme.gov.br/)
[SNA - Sociedade Nacional da Agricultura \[http://www.sna.agr.br/\]](http://www.sna.agr.br/)
[CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa \[http://www.cenbio.org.br/\]](http://www.cenbio.org.br/)
[CNDa - Conselho Nacional de Defesa Ambiental \[http://www.cnda.org.br/\]](http://www.cnda.org.br/)
[Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária \[http://www.embrapa.br/\]](http://www.embrapa.br/)
[IAC - Instituto Agronômico \[http://www.iac.sp.gov.br/\]](http://www.iac.sp.gov.br/)
[IB - Instituto Biológico \[http://www.biologico.sp.gov.br/\]](http://www.biologico.sp.gov.br/)
[IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística \[http://www.ibge.gov.br/\]](http://www.ibge.gov.br/)
[INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia \[http://www.inpa.gov.br/\]](http://www.inpa.gov.br/)
[MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia \[http://www.mct.gov.br/\]](http://www.mct.gov.br/)
[MMA - Ministério do Meio Ambiente \[http://www.mma.gov.br/\]](http://www.mma.gov.br/)
[Portal do Exportador \[http://www.portaldoexportador.gov.br/\]](http://www.portaldoexportador.gov.br/)
[Conab - Companhia Nacional de Abastecimento \[http://www.conab.gov.br/\]](http://www.conab.gov.br/)
[CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada \[http://www.cepea.esalq.usp.br/\]](http://www.cepea.esalq.usp.br/)

ANEXO B – PRODUÇÃO BRASILEIRA DE CANA, AÇÚCAR E ETANOL

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO
SECRETARIA DE PRODUÇÃO E AGROENERGIA
Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia

Produção Brasileira de Cana, Açúcar e Etanol
Brazilian Sugarcane, Sugar and Ethanol Production

Safras Crops	Etanol Anidro Anhydrous (m ³)	Etanol Hidratado Hydrous (m ³)	Etanol Ethanol Total (m ³)	Açúcar Sugar (ton)	Cana-de-açúcar Sugarcane (ton)
00/01	5.584.730	4.932.805	10.517.535	16.020.340	254.921.721
01/02	6.479.187	4.988.608	11.467.795	18.994.363	292.329.141
02/03	7.009.063	5.478.363	12.485.426	22.381.336	316.121.750
03/04	8.767.898	5.872.025	14.639.923	24.944.434	357.110.883
04/05	8.172.488	7.035.421	15.207.909	26.632.074	381.447.102
05/06	7.663.245	8.144.939	15.808.184	26.214.391	382.482.002
06/07	8.078.306	9.861.122	17.939.428	30.735.077	428.816.921
07/08	8.464.520	13.981.459	22.445.979	31.297.619	495.843.192
08/09	9.630.481	18.050.758	27.681.239	31.506.859	572.738.489
09/10	6.937.770	18.800.905	25.738.675	33.033.479	603.056.367
10/11	8.027.283	19.576.837	27.604.120	38.069.510	624.501.165
11/12(*)	6.703.758	10.923.338	17.627.096	26.839.066	429.500.465

Fonte: DCAAS/PAEMAPA

(*) Posição em 01/10/2011 - Position at October 1st, 2011

Safras 11/12 - Produção Acumulada - Crop 11/12 - Cumulative Production					
1/4/2011	59.769	190.886	250.655	194.056	6.588.283
1/5/2011	304.474	540.322	844.796	783.261	22.410.299
1/6/2011	1.392.176	2.373.601	3.765.777	4.593.207	96.500.051
1/7/2011	2.458.783	4.549.742	7.008.525	9.204.822	174.787.416
1/8/2011	3.779.920	6.655.057	10.434.977	14.553.009	258.425.971
1/9/2011	5.181.574	8.748.996	13.930.570	20.158.087	339.361.818
1/10/2011	6.703.758	10.923.338	17.627.096	26.839.066	429.500.465

FONTE: DCAAS/PAEMAPA

Obs: A Safra 2010/2011 foi encerrada em 31/03/2011 nas regiões Centro-Sul e Norte do país e encerrar-se-á em 31/07/2011 no Nordeste.

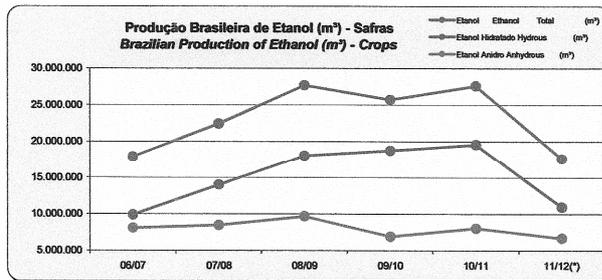
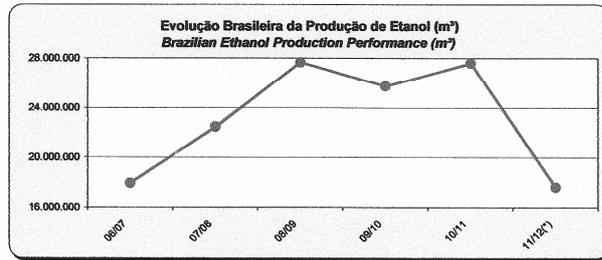
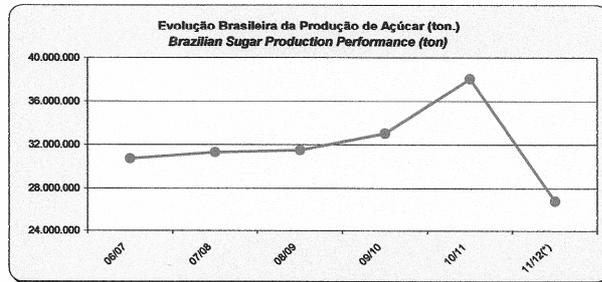
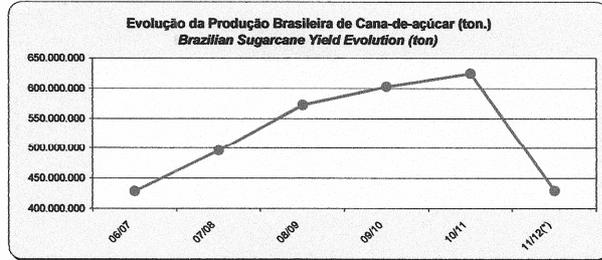
A Safra 2011/2012 começará em 01/04/2011 e terminará em 31/03/2012 nas regiões Centro-Sul e Norte,

e em 01/08/2011 até 31/07/2012 na região Nordeste.

Note: The Crop 2010/2011 was completed on March 31, 2011 at the Center-South and North of Brazil and will terminate on July 31, 2011 in the Northeast region.

The Crop 2011/2012 will begin at Apr. 01, 2011 to March 31, 2012 in the Center-South and North, and it will begin at Aug. 01, 2011 to July 31, 2012 in the Northeast region.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO
SECRETARIA DE PRODUÇÃO E AGROENERGIA
 Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia



ANEXO C – BRAZIL’S ETHANOL INDUSTRY

IOWA STATE UNIVERSITY
University Extension

Ag Decision Maker

Home Page
Recent Updates
Information Files
Decision Tools
Teaching Activities
Voiced Media

Crops
Cost & Return
Markets
Outlook & Prices
Machinery
Other

Livestock
Cost & Return
Markets
Outlook & Prices
Other

Whole Farm
Cost & Return
Leasing
Land Values
Financial
Legal & Taxes
Succession
Strategic Planning
Weight and Measurements
Other

New Business Dev.
Business Start-up
Marketing
Operations
Analysis

Renewable Energy
Ethanol
Outlook & Prices
Other

AgDM Newsletter January, 2009



Brazil's ethanol industry *

Don Hofstrand, co-director AgMRC, Iowa State University Extension, 641-423-0844, dhof@iastate.edu

The energy crisis of the 1970s brought about high gas prices and limited supplies that generated an intense interest in renewable fuels and weaning ourselves from foreign sources of oil. However, when gas prices plummeted in the 1980s, renewable fuels and energy independence were quickly forgotten.

The story evolved differently in Brazil. After investing heavily in renewable fuels in the 1970s, Brazil kept the program alive during the 1980s. This has given Brazil a head start in the current situation. With its robust ethanol program, Brazil has developed an extensive ethanol industry. In this article we will discuss the structure and growth potential of Brazil's ethanol industry. In future articles we will discuss Brazil's domestic usage and exports.

Brazilian Ethanol Production

Brazil is the world's number two ethanol producer and the leading ethanol exporter, using sugarcane as its feedstock. Ethanol production has expanded in recent years as shown in Table 1.

Three types of production facilities exist in Brazil:

- Sugar mills (producing only sugar) - The sugarcane is washed, chopped, shredded and crushed between rollers. The juice (grapa) contains 10 - 15% sucrose. The remaining material (by-product) is called bagasse.
- Mills with distillery plants (sugar and ethanol production), and
- Independent distilleries (only ethanol production).

U.S. and Brazilian Ethanol Comparison

The United States and Brazil are the two largest ethanol producers in the world as shown in Table 2. Together they account for almost 90 percent of world production.

The feedstock for Brazilian ethanol is sugarcane. In the U.S. the feedstock is corn. Below is a comparison of Brazil's sugarcane-ethanol industry and the U.S. corn-ethanol industry.

Labor and Environmental Impact

Traditionally, sugarcane fields have been burned just before harvest to remove leaves and fertilize the fields with ash. The smoke, which is blown into nearby towns, turns the sky gray and makes the air hazardous. However, a recent law bans the burning of sugarcane fields.

Table 1. Brazilian Ethanol Production

Year *	Million Gallons
2003:04	3,910
2004:05	4,068
2005:06	4,174
2006:07	4,719
2007:08	5,916
2008:09**	7,034

* marketing year = May - April

** forecast

Source: GAIN report BR8013, USDA Foreign Agricultural Service, 2008.

Sugarcane production requires hand labor at harvest. This creates a large group of migrant workers who can only find work a couple of months a year during sugarcane harvest. A skilled harvester can cut 1,000 pounds of sugarcane in an hour. Machines are replacing human labor for harvesting cane.

Energy Balance

The energy content of sugarcane is divided into three equal parts. One-third of the energy is in the sucrose and is converted to ethanol. One-third of the energy is in the sugarcane tops and leaves which are left in the field. The remaining third is bagasse which is fibrous material that is left over after pressing the sugarcane.

Bagasse is burned to provide an energy source for the ethanol facility. Bagasse burning co-generates electricity which is used in the plant and also sold to the energy grid. However, only 12 percent of sugar-ethanol mills currently sell electricity to the grid. The cost to connect to the grid is very expensive. In addition, many mills are not located close to the grid.

Since sugarcane is replanted only once every six years and harvested with hand labor, it requires less energy for production than corn.

Table 3. Comparison of Brazil and the U. S. Ethanol Industries

Brazil - Sugarcane	United States - Corn
The sugar (sucrose) in sugarcane can be converted directly into ethanol.	The starch in corn is first converted into sugar. Then the sugar is converted into ethanol.
Sugarcane is planted every six years using cuttings.	Corn is planted every year using seeds.
Sugarcane provides five cuttings over six years and then is replanted.	Corn is harvested once each year.
Sugarcane yields about 35 tons per acre (entire plant) per harvested acre.	Corn yields about 3.4 tons per acre (entire plant) per harvested acre.
Sugarcane yields about 4.2 tons of sucrose per acre (10 to 15 percent of sugarcane yield).	Corn yields 4.2 tons of corn grain per acre (150 bushels) or 2.4 tons of starch.
An acre of sugarcane produces about 560 gallons of ethanol (35 ton yield).	An acre of corn produces about 420 gallons of ethanol (150 bushel yield).
Sugarcane feedstock is cheaper to grower than corn per gallon of ethanol.	Corn feedstock is more expensive to grow than sugarcane per gallon of ethanol.
Sugarcane-ethanol can be produced cheaper than corn-ethanol.	Corn-ethanol is more expensive to produce than sugarcane-ethanol.
The by-product of ethanol production is bagasse.	The by-product of ethanol production is distillers grains with soluble that is used as livestock feed.
The energy source for ethanol production is bagasse.	The energy source for ethanol production is natural gas, coal and diesel.
Currently about 9 million acres are used for ethanol production.	Currently about 28 million acres are used for ethanol production.
Brazil has great potential for expanding sugarcane acreage without limiting the acreage of other crops.	U.S. expansion of corn acreage will come at the expense of reduced soybean and other crop acres.
No subsidies for ethanol	Subsidy reduced from \$0.51 per gallon to \$0.45.
No import tariffs on ethanol	A \$0.54 per gallon import tariff.

Future Expansion

Brazil has a natural advantage in ethanol production. It has a vast unused or little-used land area that can be converted to agricultural production. In addition, its tropical climate is well suited for sugarcane production.

The Sugarcane Technological Center (CTC) is the leading research center for sugarcane and ethanol in Brazil. It is responsible for over 80 percent of the research and development activities in this area. Brazil has made substantial investments in research to improve sugarcane varieties in recent decades. The research has produced varieties more resistant to drought and pests, along with higher yields and higher sugar content. During the last 30 years, sugarcane yields have increased three-fold.

Dedini Corporation is Brazil's largest builder of ethanol plants. They are developing a process that can convert the cellulose from bagasse, tops and leaves into sucrose for ethanol production. This technology has the potential to almost double the ethanol production from an acre of sugarcane.

According to Brazilian sources, sugarcane planted acreage (all uses) is expected to increase to over 25 million acres by 2012/13. The number of sugar ethanol plants are expected to increase from 325 (2006/07) to 410 (2012/13). Ethanol production is expected to reach ten billion gallons. This compares to the current production of 7 billion gallons (Table 1).

References

- Sugar and Sweeteners Outlook/SSS-249/June 4, 2007, Economic Research Service, USDA
Ethanol Demand Driving the Expansion of Brazil's Sugar Industry
GAIN report BR8013, USDA Foreign Agricultural Service, 2008.
GAIN Report Number: BR7011, USDA Foreign Ag Service, 2007.
"Brazil Exploits Ethanol as a Substitute for Petroleum." *UniversiaKnowledge@Wharton*. 18 May 2007.
"Ethanol fuel in Brazil." *Wikipedia*. 18 May 2007.
"Is Brazil's Ethanol Bubble Set to Cool." *Cattlenetwork.com*. 7 May 2007.
Logan, S. "The Win-Win Brazil and USA Ethanol Alliance," *ISN Security Watch*. 24 Apr. 2007.
Luhnow, D., Samor, G. 2006. "As Brazil Fills up on Ethanol, It Weans Off Energy Imports." *The Wall Street Journal*. 16 Jan. 2006.
Rideg, T., Smith, M. "Brazil's Ethanol: Big Potential." *Latin Business Chronicle*. 14 May 2007.
U. S. Government Accounting Office Report. Six Country Comparison of Renewable Fuels Programs.

* Reprinted with permission from the Ag Marketing Resource Center

Ag Decision Maker | About AgDM

Table 2. World Fuel Ethanol Production (2007)

Country	Million Gallons
USA	6,499
Brazil	3,019
European Union	570
China	486
Canada	211
Other	316
Total	13,102

Source: Renewable Fuels Association.

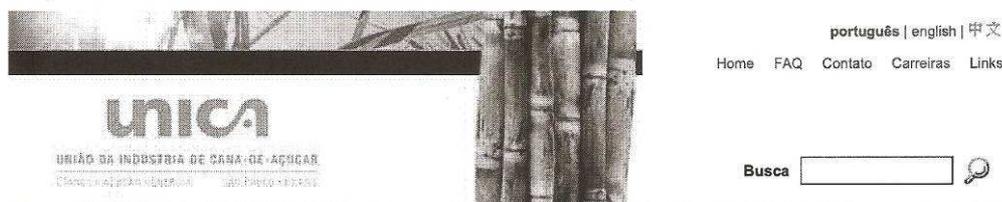
Table 4. Agricultural Land in Brazil (2007) *

	Million Acres	Percent of Total Ag. Land
Cultivated Land (all crops)	190	21.6%
Soybeans	51	5.8%
Corn	35	3.9%
Sugarcane (all uses)	19	2.2%
Sugarcane for ethanol	8.4	1.0%
Pastures	426	48.6%
Available Land	261	29.8%
Total & Potential Agricultural Land	877	100%
Total All Land	2,103	

* Total arable land excludes the Amazon Forest, the wetlands of the Pantanal, and other preservation areas, in addition to areas not traditionally suitable for agriculture due to topography, soil restrictions, etc.

Source: GAIN report BR8013, USDA Foreign Agricultural Service, 2008

ANEXO D – SUSTENTABILIDADE – PROTOCOLO AGROAMBIENTAL



português | english | 中文

Home FAQ Contato Carreiras Links

UNICA

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR
 Conselho para a Sustentabilidade Social, Ambiental e Econômica

Busca

Quem Somos

Associadas

Sector Sucroenergético

Sustentabilidade

Histórico
 Projetos de Associadas
 Projeto renovAção
 Protocolo Agroambiental
 Meio Ambiente

Usina Virtual

Notícias

Opinião

Multimídia

Dados e Cotações

Agenda

Imprensa

Parceiros

Cadastre-se para receber
 a nossa Newsletter

ISS o que é isto?

sou agro
 Um Brasil
 que cresce
 forte e
 saudável.
www.souagro.com.br

bioeletricidade
 A ENERGIA VENDE E INTILIGENTE DO BRASIL

**BIOMASS
 INVESTING**
 BRASILEIRIA 2011

**biofuels
 international**
 expo & conference

Sustentabilidade - Protocolo Agroambiental

Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro

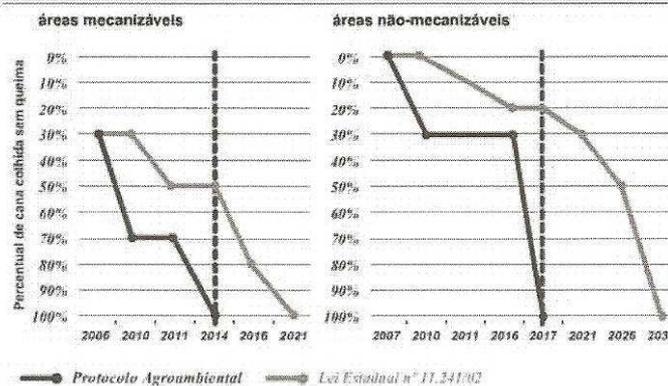
Compromisso com a Sociedade

A UNICA, representando a indústria paulista produtora de açúcar, etanol e bioeletricidade e o Governo do Estado de São Paulo, assinaram, no dia 4 de junho de 2007, o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro. Esse Protocolo, de adesão voluntária, estabeleceu uma série de princípios e diretrizes técnicas, de natureza ambiental, a serem observadas pelas indústrias da cana-de-açúcar.

Entre as diversas diretrizes, se destaca aquela que antecipa os prazos legais para o fim da colheita da cana-de-açúcar com o uso prévio do fogo nas áreas cultivadas pelas usinas. Essa prática agrícola, denominada "queima controlada da palha da cana" é necessária para a sua colheita manual, sem o emprego de máquinas.

Assim, o setor paulista se comprometeu a antecipar, em até 14 anos, os referidos prazos, conforme se verifica pela tabela abaixo:

Prazo para a eliminação da queima da palha da cana no estado de São Paulo



Nota: os pontos destacados nas linhas do gráfico mostram os anos específicos citados na Lei ou no Protocolo. Elaborado pela Unica.

Em fevereiro de 2008, a Secretaria Estadual do Meio Ambiente informava que 141 indústrias de açúcar e etanol já haviam aderido ao Protocolo, recebendo o respectivo "Certificado de Conformidade Agroambiental". Essas adesões correspondem a mais de 90% do total de cana produzida no Território Paulista. Qualquer pessoa pode acompanhar o andamento do protocolo e a relação das indústrias que aderiram ao mesmo por meio da seguinte página na Internet:

Página do "Programa Etanol Verde": www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde.

Além da queima controlada da palha de cana, o Protocolo dispõe sobre outros temas de enorme relevância, como: conservação do solo e dos recursos hídricos, proteção de matas ciliares, recuperação de nascentes, redução de emissões atmosféricas e cuidados no uso de defensivos agrícolas.

A indústria sucroenergética paulista reforça, com esse Protocolo, a sua posição em defesa da sustentabilidade, nas suas dimensões ambiental, social e econômica.

ANEXO E – RENOVAÇÃO



UNICA
UNIAO DA INDUSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR
FABRIL - AÇÚCAR - ETILÓL - SAC - ALCOOL - BIODIESEL

português | english | 中文

Home FAQ Contato Carreiras Links

Busca

Quem Somos

Associadas

Sector Sucreenergético

Sustentabilidade

Usina Virtual

Notícias

Opinião

Multimídia

Dados e Cotações

Agenda

Imprensa

Parceiros

Renovação

O maior projeto de capacitação e requalificação de cortadores de cana já realizado pelo setor sucroenergético



Desde sua introdução no Brasil, no início do Século XVI, a indústria da cana-de-açúcar se caracterizou por uma forte dependência de mão-de-obra, voltada principalmente ao corte de cana. Em 2010, estima-se que o setor ainda empregue 500 mil pessoas nessa atividade, sendo 140 mil no Estado de São Paulo.

Avanços tecnológicos e preocupações ambientais levaram a um processo acelerado de mecanização agrícola, com impactos importantes para a manutenção dessa força de trabalho no século XXI. Por lei, a queima da cana em São Paulo - essencial para viabilizar o corte manual - deve ser praticamente eliminada até 2021. Mas pressões locais nas regiões produtoras levaram a uma antecipação desse prazo, com a assinatura do Protocolo Agroambiental entre o setor sucroenergético e a Secretaria do Meio-Ambiente do Estado, que determina o fim da queima para 2014 na maioria das áreas cultivadas paulistas. Ganhos de eficiência e produtividade através de novas técnicas e equipamentos mais avançados têm pressionado ainda mais o trabalho manual.



Para enfrentar este cenário, as empresas associadas à UNICA vêm desenvolvendo dezenas de iniciativas de capacitação profissional, para viabilizar tanto a transferência dos atuais cortadores de cana para funções mais complexas ligadas a mecanização quanto a migração de trabalhadores para outros setores da economia.

No entanto, as mais de 150 iniciativas locais e regionais desenvolvidas pelas empresas têm se mostrado insuficientes para o processo de substituição de mão-de-obra em andamento. Nesse contexto surgiu o **projeto renovação**, fruto de entendimentos da UNICA com suas associadas e trabalhadores, desenvolvido com patrocínio das empresas John Deere, Grupo Case e Syngenta e apoio do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), numa demonstração de grande coordenação e comprometimento da cadeia produtiva do setor sucroenergético com ações de responsabilidade social e melhoria contínua das condições de trabalho.



 Cadastre-se para receber a nossa Newsletter

 o que é isto?

 Um Brasil que cresce forte e saudável.
www.souagro.com.br

 bioeletricidade
A ENERGIA VERDE E INTELIGENTE DO BRASIL

 BIOMASS INVESTING
BY ALLISON MUIRSON

 biofuels international
expo & conference

 AGORA
organização para a agricultura sustentável



Parceiros



O PROJETO

Patrocinadores

Desenvolvido com patrocínio das empresas John Deere, CASE IH, Syngenta, Fundação Solidaridad e apoio do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID)

Objetivo

Requalificar cerca de 3.500 trabalhadores por ano, funcionários e ex-funcionários do corte de cana.

Distribuição

Cursos profissionalizantes específicos para o setor sucroenergético: 2 mil trabalhadores/ano (motoristas canavieiros, operadores de colhedora, eletricitistas, mecânicos, soldadores, etc.).

Cursos de qualificação para outros setores da economia: 1500 trabalhadores/ano (produção de mudas, fabricação de calçados, construção civil, horticultura, costura, etc.).

Crítérios

Definição de cursos conforme oportunidades identificadas em cada região.

Beneficiários

Cortadores de cana do Estado de São Paulo das cerca de 120 usinas associadas à UNICA.

Regiões

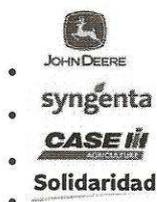
Seis macro-regiões no Estado de São Paulo, centradas em: Araçatuba, Bauru, Piracicaba, Presidente Prudente, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto.

Para baixar o folder sobre o Projeto RenovAção, [clique aqui](#).

Para assistir o vídeo do Projeto RenovAção, [clique aqui](#).

Para ampliar seus objetivos e resultados, o projeto renovAção está aberto a novas adesões de empresas patrocinadoras. [Clique aqui](#) para falar conosco.

Patrocínio



Apoio



ANEXO F – CONCEITUANDO BIOMASSA



Centro Nacional de Referência em Biomassa | fale conosco |

► Quem somos

► Instituições

► Documentos

► Publicações

► Projetos

► Prêmios

► Atlas de Biomassa

► Links interessantes

► Saiba mais



Curso em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético

CONCEITUANDO BIOMASSA..... voltar para os tópicos

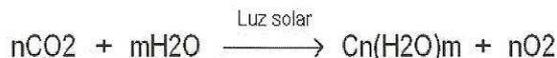
A biomassa - termo introduzido inicialmente por Eugene Adam - é constituída pelo material produzido por todos os seres vivos (animais, vegetais, fungos e protistas) em seus diferentes processos, isto é, a matéria orgânica viva, desde quando fixa energia solar nas moléculas constituintes de suas células, passando por todas as etapas da cadeia alimentar, ou trófica (BRISTOTI E SILVA, 1993; JOHANSSON et al., 1993; WEREKO-BROBBY e HAGEN, 1996; e outros).

Alguns autores definem biomassa como qualquer material derivado da vida vegetal e que seja renovável em um período de tempo inferior a 100 anos (PROBSTEIN E HICKS, 1982; KLASS, 1998), e sendo assim, a maioria dos recursos energéticos como o petróleo, carvão mineral e xistos betuminosos não são considerados renováveis, apesar de serem derivados da vida vegetal.

Higman e Van der Burgt (2003) *apud* Fonseca (2009) definem, de forma abrangente, a biomassa como sendo qualquer combustível ou matéria bruta derivados de organismos que estiveram vivos recentemente. Tal definição claramente exclui os tradicionais combustíveis fósseis que, mesmo tendo sido derivados de matéria orgânica vegetal e animal, necessitaram de milhões de anos para sua conversão na forma que são encontrados atualmente. Com exceção de algumas microalgas e matérias com altos índices de umidade, a biomassa se caracteriza, essencialmente, por ser uma matéria carbonada em estado sólido.

Assim, do ponto de vista energético, o conceito geral abordado pelo CENBIO é que biomassa seria todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia.

Como nos combustíveis convencionais, a energia contida na biomassa é energia química associada com os átomos de carbono e hidrogênio contidos nas moléculas orgânicas oxidáveis. Para organização e assimilação dessas moléculas orgânicas e consequente produção de biomassa vegetal, ocorre na natureza a conversão do dióxido de carbono e da água para uma forma de combustível orgânico. Este processo é chamado de fotossíntese, sendo indispensável para tal, a exposição de tecidos fotossintetizantes à energia solar. O processo de fotossíntese pode ser resumido na equação abaixo:



Na reação de fotossíntese, o termo $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ é usado para representar uma classe de compostos orgânicos conhecidos como carboidratos, os quais têm origem no decorrer da reação. De uma forma geral, os organismos fotossintetizantes assimilam cerca de 0,1% a 3,0% da energia solar incidente original, a qual é uma medida da energia máxima recuperável pelo organismo, se convertida em um combustível sintético. Parte dessa energia pode, contudo, ser degradada pela formação de produtos intermediários e haverá, de fato, perdas associadas à conversão da biomassa em um combustível tradicional (FONSECA, 2009).

Ushima (2006) reafirma que a biomassa pode ser tida como uma fonte natural de energia, pois armazena a energia solar através da reação de fotossíntese, tendo como principais componentes a hemicelulose, a lignina e a celulose (composição média: $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$), variando pouco, dependendo de sua natureza. É válido destacar ainda que, segundo Karayildirim; Sinag e Kruse (2008) a biomassa apresenta em sua composição diversos sais e outros constituintes minerais que podem influenciar em suas reações de conversão térmica para aproveitamento de sua energia. Como exemplo, Andrade et al. (2007) explicam que os sais de dióxido de silício e o óxido de potássio, presentes na casca do arroz, quando em temperaturas superiores a 850 °C se fundem formando pequenas barras de material vítreo (sinterização).

Outra definição, semelhante às supracitadas, é apresentada por Nogueira e Lora (2005), no qual se pode considerar a biomassa, de forma mais abrangente, como sendo todo material de origem orgânica, como por exemplo, a madeira, detritos animais e resíduos orgânicos, sendo de grande interesse os resíduos agrícolas como a casca de arroz, a serragem e o bagaço da cana-de-açúcar.

Desde tempos imemoriais a biomassa tem sido importante como fonte energética. Os historiadores estimam que a descoberta do fogo data de 500.000 a.C., o que certamente corresponde às primeiras utilizações da biomassa (principalmente madeira de árvores) para geração de calor para cozimento de alimentos e proteção contra o frio (GUARDABASSI, 2006).

Na história da humanidade, o uso de madeira proveniente de florestas foi o grande responsável pelo desmatamento das áreas vegetais do planeta, incluindo-se aí a Europa e os Estados Unidos. Mesmo no Brasil, a destruição da Mata Atlântica e de grande parte da Floresta Amazônica é consequência do desmatamento indiscriminado, em grande parte para utilização da madeira como fonte de energia de forma não sustentável.

Por este motivo, durante muito tempo, a biomassa foi vista de forma pejorativa, como sendo um combustível para ser usado apenas por países subdesenvolvidos. Entretanto, as crises do petróleo da década de 1970 tiveram papel significativo para alterar esta visão, pois o uso da biomassa como

fonte de energia passou a ser encarado como uma opção alternativa em substituição aos derivados de petróleo.

[voltar para os tópicos](#)



ANEXO G – BAGAÇO



Login

HOME O QUE É O CTC? PROJETOS E PESQUISAS PRODUTOS ACESSO RESTRITO REALIZAÇÕES 2005-2010

Bagaço

O bagaço é o resíduo fibroso resultante da moagem de cana e contém ao redor de 48 a 52% de umidade, 2% a 3% de sólidos solúveis (brix) e 46% a 48% de sólidos insolúveis (fibra). Para cada tonelada de cana processada resultam ao redor de 280 kg de bagaço. Esse valor é obtido pelo princípio da tecnologia sucroalcooleira de que toda fibra que entra com a cana na moenda ou difusor é igual à quantidade de fibra que sai com o bagaço.

$$\text{Cana processada} * \frac{\text{Fibra \% cana}}{100} = \text{Total bagaço} * \frac{\text{Fibra \% bagaço}}{100}$$

Em 1 t de cana (1000 kg) o rendimento de bagaço em quilogramas por tonelada de cana será:

$$\text{Rendimento bagaço} = 1000 * \frac{\text{Fibra \% cana}}{\text{Fibra \% bagaço}} \text{ kg/t cana}$$

Por exemplo, sendo a fibra % cana igual a 13,0% e a fibra % bagaço de 46,0%:
 Rendimento de bagaço = 1000 * 13,0 / 46,0
 Rendimento de bagaço = 283 kg/t cana

O excedente de bagaço nas usinas brasileiras teve aumento significativo na década de noventa, com a redução de consumo de vapor, fruto da melhoria de eficiência nos processos produtivos, criando um mercado de comercialização desta biomassa para outras indústrias. A partir de 2001, quando da crise de energia elétrica no Brasil (apagão), e com o setor elétrico num processo de privatização, a remuneração da energia elétrica passou a viabilizar investimentos das usinas em caldeiras de alta pressão e processos produtivos mais eficientes, tornando possível a geração adicional de energia elétrica e sua comercialização com outras empresas consumidoras. Assim, usinas que comercializavam bagaço no mercado, passaram a consumi-lo internamente, visando aumentar a exportação de energia elétrica, de forma significativamente mais rentável que a simples comercialização do bagaço. Desta forma, a biomassa passou a ter um valor significativamente mais alto para estas usinas do que o simples preço de mercado do bagaço.

Para início da safra seguinte ou para ser utilizado na entressafra, o bagaço precisa ser armazenado adequadamente, para que sejam preservadas suas propriedades combustíveis, o que pode ser realizado em áreas abertas ou armazéns cobertos. A possibilidade de enfardamento do bagaço ou de sua compactação aumenta as alternativas logísticas e do mercado consumidor dessa fonte renovável de energia.

NAVEGAÇÃO

Início
 Agradecimentos/ Créditos
 Introdução
 Potencial de produção de bagaço e palha
 Bagaço
 Palha de cana
 Características físico-químicas do bagaço de cana
 Características físico-químicas da palha da cana
 Poder calorífico
 Movimentação e armazenagem de bagaço
 Secagem de bagaço
 Compactação do bagaço de cana
 Bibliografia
 Fale Conosco

ANEXO H – BRASILEIROS ACELERAM PESQUISA SOBRE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Brasileiros aceleram pesquisas sobre etanol de segunda geração (18/02/2010)

A equipe do Labex Estados Unidos, Laboratório Virtual da Embrapa no Exterior, está empenhada em pesquisas com materiais que geram o etanol de segunda geração (ou etanol lignocelulósico), obtido a partir da utilização de toda a planta e não apenas da fermentação de parte dela (etanol de primeira geração), como ocorre com a cana-de-açúcar no Brasil. Resultados preliminares têm animado o pesquisador Cesar Miranda, responsável pelas investigações sobre agroenergia no naquele Labex.

Rafael Miusa de Moraes



Um dos resultados apontados por Miranda nas pesquisas com os contra partes do Serviço de Pesquisa do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (ARS-USDA) indica a possibilidade de se obter até 11 mil litros de etanol, por hectare, a partir da biomassa de capim-elefante e outras gramíneas forrageiras. “Estes materiais – comenta César Miranda ao se referir a capins tais como capim-elefante, braquiárias, panicuns e árvores de crescimento rápido - poderiam ser alternativas competitivas e eficientes para locais onde não se pode cultivar cana-de-açúcar, tanto em áreas de cultura, de pastagens ou áreas marginais, seja de forma isolada ou consorciada, em sistema de integração lavoura-pecuária ou agrosilvipastoril.”

Cooperação e novos projetos

De acordo com Cesar Miranda da cooperação técnica entre Labex Estados Unidos e ARS, visando facilitar a integração de cientistas brasileiros e americanos nesse campo, com intercâmbio de pesquisadores e a realização de treinamentos, pelo menos dois projetos estão em desenvolvimento por Unidades da Embrapa.

Um deles trata da produção de biocombustíveis a partir de ilhas flutuantes de biomassa em planícies de inundação do Brasil: estudo de caso no Pantanal.

O objetivo seria o uso do excedente ambiental de biomassa aquática daquela região na geração de energia – seja por meio da produção de etanol, biogás ou gás de síntese. Esse projeto envolve pesquisadores da Embrapa Agroenergia, Embrapa Pantanal, Departamentos de Física e de Tecnologia de Alimentos da Unicamp e Bioware Tecnologias, com a participação do Grain, Forrage and Bioenergy Research Unit (GFBRU), em Lincoln, Nebraska.

O outro projeto se refere a fontes alternativas de biomassa para produção sustentável de etanol a partir de materiais lignocelulósicos. A idéia é aproveitar a experiência americana para o desenvolvimento de tecnologia para avaliação direta do potencial de produção de resíduos de cana-de-açúcar, sorgo, milho e várias gramíneas forrageiras para o etanol de segunda geração, inclusive para uso em seleção de variedades específicas para bioenergia. O estudo envolve vários centros de pesquisa da Embrapa, além de universidades e equipes do DFBRU e do Fermentation Biotechnology Research Unit.

Deva Rodrigues (MTb/RS 5297)
 Telefone (61) 3448-4015
 E-mail: deva.rodrigues@embrapa.br

ANEXO I – O ALVO É O BAGAÇO



Pesquisa FAPESP

Edição 163 - Setembro 2009

Política de C & T > Capa

O alvo é o bagaço

Subproduto abundante da indústria da cana dá vantagem competitiva ao Brasil na busca do etanol de segunda geração

Fabício Marques

A pesquisa brasileira do etanol de segunda geração conquistou uma articulação inédita. Restrita até pouco tempo atrás a experiências isoladas de empresas e de grupos de pesquisa, a busca do álcool extraído de celulose está mobilizando um número crescente de pesquisadores, estimulados por políticas de pesquisa voltadas para ampliar a produtividade do etanol de cana brasileiro. O alvo é aproveitar o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, fontes de celulose que respondem por dois terços da energia da planta, mas não são convertidos em biocombustíveis. “Há uma corrida mundial pelo desenvolvimento do etanol de segunda geração”, diz Rubens Maciel Filho, professor da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e um dos coordenadores do Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (Bioen), dínamo da articulação da comunidade científica em São Paulo. “O Brasil, embora tenha uma pesquisa jovem neste campo, possui vantagens comparativas na corrida, como a disponibilidade de uma enorme quantidade de matéria-prima barata, que é o bagaço pré-colhido, e uma infraestrutura já instalada de produção de etanol”, afirma.

Resíduos como aparas de madeira, bagaço de cana ou sabugo de milho são formados por celulose e podem transformar-se em biocombustível quando submetidos a reações de hidrólise, um processo químico de quebra de moléculas. Uma grande vantagem dessa abordagem seria reduzir a competição entre biocombustíveis e alimentos, produzindo, no caso do aproveitamento do bagaço, mais etanol por área plantada. Outra quimera é o barateamento da produção do etanol – nos Estados Unidos, o álcool extraído do milho é fortemente subsidiado, ao contrário do etanol de cana brasileiro. Do ponto de vista tecnológico, há várias rotas de hidrólise testadas, mas com rendimentos e investimentos que não viabilizam economicamente a operação.

A articulação envolve iniciativas como a construção de várias plantas-piloto para desenvolver rotas tecnológicas do etanol celulósico. A Dedini Indústrias de Base prepara uma nova planta de hidrólise ácida, processo em que a quebra de moléculas de celulose usa um ácido como catalisador. A planta vai incorporar inovações relacionadas a materiais e processos com base no conhecimento acumulado entre 2003 e 2007, período em que funcionou uma outra planta da empresa na Usina São Luiz, em Pirassununga (SP). “A experiência mostrou que precisamos atenuar algumas das condições severas em que a unidade funcionava”, diz o vice-presidente da Dedini, José Luiz Olivério. “Estamos testando materiais mais resistentes, porque as condições abrasivas do processo impunham um desgaste que acabava comprometendo o funcionamento contínuo da unidade”, afirma. Segundo Olivério, a Dedini segue acreditando na viabilidade comercial de sua tecnologia,

estudada desde os anos 1980, que utiliza o processo Dedini Hidrólise Rápida (DHR), pioneiro no país. A empresa mantém um convênio de cooperação científica com a FAPESP envolvendo a pesquisa de processos industriais para fabricação do etanol.

A Oxiten, uma das maiores empresas brasileiras do setor químico, tem interesse em dominar o processo de hidrólise do bagaço e da palha para a fabricação de produtos usados na indústria química e farmacêutica, obtidos atualmente pela rota petroquímica. Também em parceria com a FAPESP, a empresa lançou em novembro de 2006 uma chamada pública de propostas em 16 áreas temáticas de pesquisa que selecionou projetos no campo da tecnologia para a produção de açúcares, álcool e derivados. A maioria das sete propostas contempladas e em andamento, que envolvem parcerias com pesquisadores da Universidade de São Paulo, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, relaciona-se a processos vinculados ao etanol de celulose. As parcerias da Fundação com a Dedini e a Oxiten fazem parte do programa Bioen.

A Petrobras investe em hidrólise enzimática, que utiliza, no lugar de ácidos, enzimas produzidas por microrganismos capazes de quebrar o açúcar da celulose, transformado em álcool combustível após o processo de fermentação. Uma planta-piloto instalada no Cenpes, centro de pesquisa da empresa localizado na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, começou a operar em 2007. A intenção da empresa é alcançar o domínio da tecnologia e exportar etanol de celulose na próxima década.

Em Campinas, no interior paulista, será construído até meados do ano que vem uma planta-piloto que servirá a pesquisadores de todos os estados. Símbolo da articulação de esforços, a planta vai ser instalada no recém-criado Centro de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia, e terá uma estrutura de seis módulos, que vão do tratamento físico do material lignocelulósico à fermentação, passando pela produção de microrganismos e a hidrólise enzimática. A ideia é que pesquisadores possam fazer experiências diversas usando pedaços específicos de uma mesma plataforma. "O objetivo é permitir avanços simultâneos que ajudem a superar os vários gargalos tecnológicos ligados ao etanol de segunda geração", explica Carlos Eduardo Vaz Rossell, coordenador da planta-piloto do CTBE.

A pesquisa básica relacionada ao etanol de segunda geração também vem ganhando impulso. Pesquisadores da Embrapa Agroenergia, por exemplo, desenvolvem estudos para caracterizar a parede celular da cana-de-açúcar. Os trabalhos estão em andamento no Laboratório de Genética Molecular da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, em parceria com o Instituto de Botânica da USP. O objetivo é compreender melhor a composição e a estrutura da parede celular da cana, para manipulá-la de maneira específica visando aumentar a produção de etanol de segunda geração.

Países como os Estados Unidos, o Canadá e a Suécia têm uma produção científica mais destacada que a do Brasil no desenvolvimento do etanol de segunda geração. Os Estados Unidos, que são o principal produtor de etanol do mundo, enfrentam críticas por haver apostado no milho, fonte de alimentação humana, para extrair o biocombustível, que ainda recebe pesados subsídios para ter um preço razoável. A procura do etanol de celulose, explorado a partir de resíduos agrícolas ou de plantas que não servem para comer, pretende garantir o suprimento do combustível renovável sem prejudicar a segurança alimentar do país.

O interesse brasileiro pelo etanol de celulose tem um pano de fundo diferente. Busca tornar ainda mais competitivo o etanol de cana, ampliando sua produção sem precisar aumentar na mesma proporção a área plantada de cana-de-açúcar. Estudos conduzidos

no âmbito do Projeto Bioetanol, uma rede de pesquisa financiada pelo governo federal, apontam que uma destilaria que produz hoje 1 milhão de litros de etanol por dia do caldo da cana poderia inicialmente, com a tecnologia de hidrólise, gerar um adicional de 150 mil litros de etanol do bagaço. Em 2025, com a técnica aperfeiçoada, a mesma produção poderia ter um acréscimo de 400 mil litros provenientes do bagaço recuperado. A palha da cana é outra fonte potencial para a extração de etanol. Com o abandono da prática das queimadas, tende a ser utilizada como fonte de celulose.

No caso brasileiro, a tecnologia precisa reduzir custos a ponto de compensar a mudança do uso, já eficiente, que se faz hoje do bagaço de cana, baseado na queima para gerar eletricidade nas usinas de álcool e açúcar. Rubens Maciel Filho, da Unicamp, lembra que não basta encontrar soluções tecnologicamente viáveis – é essencial que elas tenham um custo baixo. “Não é uma tarefa fácil justificar grandes investimentos para melhorar o álcool de primeira geração, porque o processo já tem uma produtividade bastante elevada, e ainda existe o desafio de produzir álcool de segunda geração a preços competitivos”, diz. No entanto, é importante ressaltar que a tecnologia de primeira geração ainda tem margem de aperfeiçoamento. Ao mesmo tempo que investe no desenvolvimento do processo de hidrólise, a Dedini não parou de apostar em tecnologias incrementais, que vão desde a criação de usinas de etanol autossuficientes em água até a produção de um biofertilizante que incorpora resíduos diversos, como vinhoto e fuligem. “A cana tem uma condição imbatível no armazenamento de energia”, diz Olivério, da Dedini.

É difícil prever em quanto tempo o etanol de celulose terá viabilidade econômica, dadas as dificuldades de conhecer em detalhes os avanços obtidos por empresas, protegidos por sigilo. “Mas se houvesse um processo de fato competitivo para transformar bagaço de cana em etanol, ele já estaria disponibilizado para o mercado e as usinas o estariam utilizando”, afirma Rubens Maciel, da Unicamp. O pesquisador calcula que o Brasil tem cinco anos para vencer os desafios tecnológicos. “Caso contrário, estaríamos dependentes de processos e insumos importados. Mas o esforço vale a pena porque levamos a vantagem de ter a matéria-prima, que é o bagaço, disponível na unidade de produção de etanol”, diz, referindo-se ao preço da tonelada de bagaço de cana seco, de cerca de US\$ 15, comparado ao da mesma quantidade de resíduo disponível nos Estados Unidos, que custa US\$ 35. Até nos custos de transporte há vantagens, pois o bagaço não precisa ser levado até a usina – está disponível lá mesmo.

O bagaço e a palha são constituídos por celulose, um polímero da glicose formado por seis carbonos, as hexoses; por hemicelulose, composta por açúcares de cinco carbonos, chamados de pentoses e não aproveitados ainda para a produção de açúcar; e pela lignina, um material estrutural da planta, associado à parede vegetal celular, responsável pela rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques aos tecidos vegetais. Para que as biomassas possam ser utilizadas como matérias-primas para processos químicos e biológicos, elas precisam ser submetidas a um pré-tratamento capaz de desorganizar o recalcitrante complexo lignocelulósico. A lignina é um grande obstáculo nesse processo. Sua quebra libera substâncias que inibem a fermentação.

Para chegar a um processo economicamente viável, há vários gargalos que necessitam ser superados. O primeiro deles tem a ver com o pré-tratamento do bagaço e da palha. “As matérias-primas têm decomposição lenta. O desafio é fazer um pré-tratamento dessa estrutura que a torne mais lábil. Os primeiros processos eram muito destrutivos e levavam à perda de muito açúcar”, diz Rossell, do CTBE. “Nós não temos domínio completo das propriedades químicas, físicas e mecânicas do bagaço, da palha e de suas frações. É preciso conhecer melhor a matéria-prima e assim desenvolver futuramente processos que sejam eficientes”, afirma.

Um segundo gargalo tem a ver com os catalisadores usados para decompor a celulose. No caso da hidrólise ácida, é preciso melhorar a eficiência do processo, que não permite um controle tão preciso da quebra das ligações químicas. “Enquanto o ácido sulfúrico destrói parte do açúcar formado, o ácido clorídrico, mais eficiente, tem um problema ligado à corrosividade, exigindo ligas de metal de custos elevados”, afirma Rossell. Já no caso do processo de hidrólise enzimática, o entrave é o custo das enzimas, além da quantidade delas exagerada necessária para provocar o desdobramento da celulose em glicose. Um dos desafios da pesquisa é encontrar microrganismos capazes de produzir enzimas mais produtivas.

Os Estados Unidos apostam numa técnica chamada bioprocessamento consolidado, no qual as quatro transformações biológicas envolvidas na produção do bioetanol (produção de enzimas, sacarificação, fermentação de hexoses e fermentação de pentoses) acontecem numa só fase. Microrganismos geneticamente modificados produzem anaerobicamente enzimas com melhor atividade que as utilizadas pelos outros processos (*leia entrevista na página 21*). “Tais microrganismos precisam ser bem testados, pois, mesmo quando funcionam em laboratório, podem ser atacados por outros que sobrevivem melhor no ambiente”, diz Maciel. “Mas não podemos ficar de fora do desenvolvimento de microrganismos sofisticados, pois eles podem nos ajudar a compreender melhor os processos, além de trabalharem a nosso favor.”

Há ainda gargalos como o aproveitamento dos açúcares de cinco carbonos, as chamadas pentoses. “Não há rota eficiente para transformar esses açúcares em etanol. A maior parte das leveduras não possui essa rota ou possui em magnitude tão pequena que não tem impacto”, diz Rossell. “A criação de novas leveduras ou outros microrganismos é crítica para a transformação de pentoses em etanol. Hoje, do ponto de vista comercial, só teríamos o álcool de hexoses.” Restam ainda outras pendências a resolver, como a necessidade ainda elevada de consumo de água no processo de pré-tratamento e a destinação do vinhoto, resíduo da destilação para recuperação do etanol. Ocorre que, quando a produção do etanol é proveniente de hidrólise, o resíduo não contém potássio e fósforo e perde sua vantagem como fertilizante. Poluente, deverá ter uma outra destinação segura.

Rossell vê as perspectivas com otimismo. “O número de pesquisadores e técnicos envolvidos com a pesquisa tende a crescer de forma exponencial”, afirma. Para Maciel, da Unicamp, a articulação de esforços é fundamental para fazer valer as vantagens competitivas do país. “Em toda linha de pesquisa, é bom haver certa dose de redundância para comparação das diferentes formas de abordar o problema. No caso do etanol de celulose, porém, talvez não precisemos de muitas plantas-piloto. Com algumas plantas, e a mobilização integrada de muitos pesquisadores, podemos chegar a melhores resultados”, conclui.

União pela sustentabilidade

Workshop reúne norte-americanos, brasileiros e argentinos para debater impacto dos biocombustíveis sobre o uso da água e da terra

Existe um amplo espaço no qual pesquisadores do Brasil, da Argentina e dos Estados Unidos podem somar esforços para compreender e reduzir impactos das tecnologias de produção de biocombustíveis sobre o uso da água e da terra. Mas, para viabilizar as colaborações, será preciso superar obstáculos como a falta de um padrão de dados que lastreie estudos comparativos, construir modelos capazes de explicar os efeitos de fenômenos complexos ou encontrar formas de analisar cientificamente correlações como as que sugerem a influência do aumento da área plantada com milho nos Estados Unidos

no desmatamento da Amazônia brasileira. Essa conclusão emergiu nas discussões finais de um workshop, realizado em agosto, que mobilizou cientistas de três países com grande interesse em biocombustíveis – enquanto Brasil e Estados Unidos são os principais produtores de bioetanol, um derivado da cana-de-açúcar e o outro do milho, a Argentina tem um enorme potencial para a produção tanto de etanol quanto de biodiesel.

“Juntos, esses países do continente americano querem definir estratégias que permitam usar ciência de alta qualidade a fim de que os recursos naturais sejam utilizados de forma sustentável”, diz Marcos Buckeridge, professor do Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, coordenador do workshop. Realizado no âmbito do Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (Bioen), o evento foi organizado e patrocinado por agências financiadoras como a FAPESP, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a norte-americana National Science Foundation, além de instituições como a Universidade de São Paulo, a Universidade de Buenos Aires e a Universidade do Estado de Iowa. “O uso da água e da terra associado à produção de biocombustíveis tem consequências sociais, econômicas e ambientais importantes, além de questões tecnológicas complexas. Novos modelos, com equipes multidisciplinares e multinacionais, são necessários para investigar esse tema”, disse Robert Anex, professor da Universidade de Iowa.

ANEXO J – LOGÍSTICA E TRANSPORTE

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Destaques do Governo

Agência de Informação Embrapa

Cana-de-açúcar

[Página Inicial](#)
[Fale Conosco](#)
[Ajuda](#)

Pós-produção Logística e transporte

Logística e transporte

Autor(es): [Carlos Eduardo Freitas Vian](#) ; [Fábio Ricardo Marin](#)

O setor agroindustrial canavieiro iniciou, sobretudo nas últimas décadas, um processo de pesquisa e desenvolvimento que garante seu destaque no setor agrícola brasileiro. As usinas de cana-de-açúcar procuram se adequar ao cenário da economia nacional por meio de inovações a fim de integrar as áreas agrícola e industrial.

Para tanto, o empresário deve atentar para uma série de procedimentos, pois a logística de uma empresa do setor sucroalcooleiro deve basear-se em sistemas integrados devido à necessidade de coordenação de todas as atividades que envolvem essa cadeia produtiva.

A necessidade de implantar técnicas, equipamentos e recursos para beneficiar o planejamento e o controle do processo produtivo decorre do aumento da competitividade no setor. O aprimoramento dos sistemas logísticos, por meio de novas estratégias gerenciais para o transporte da cana, é um exemplo entre as diversas inovações que fazem parte do setor sucroalcooleiro. Os sistemas logísticos são fundamentais para melhorar a eficiência operacional das usinas de cana-de-açúcar, pois atuam na integração de operações agrícolas e industriais.

A compreensão da importância da ligação entre as áreas agrícola e industrial da cadeia produtiva sucroalcooleira é relevante para que a empresa tenha vantagem competitiva em relação à qualidade do principal insumo que utiliza - a cana-de-açúcar - e ao investimento em sistema de corte, carregamento e transporte.

Um aspecto importante dos sistemas logísticos é a forma de coordenar os processos de corte, carregamento e transporte de cana do campo até a área industrial, de maneira a suprir adequadamente a demanda necessária na área industrial. Os custos do corte, carregamento e transporte representam 30% do custo total de produção da cana, sendo que somente os gastos com transporte equivalem a 12% desse total.

Da mesma forma, o sistema de recepção, que compreende operações como pesagem, amostragem, armazenagem intermediária e descarga de cana nas moendas, deve operar com um fluxo de cana transportada do campo à usina que permita alimentação uniforme das moendas. Caso contrário, pode haver paradas nas moendas, o que é altamente prejudicial por conta dos altos custos da ociosidade de máquinas. Manter a moenda funcionando com quantidade de cana insuficiente gera desperdícios de energia, desgaste desnecessário dos equipamentos etc.

A quantidade ideal de cana a ser transportada do campo para a usina pode mudar de acordo com variações do ambiente, como clima, localização das frentes de corte (quando a colheita precisa ser feita em áreas muito distantes da usina), tipo de estrada e especificações da frota. Por outro lado, a ociosidade de caminhões no pátio também é motivo de grande preocupação devido ao alto custo de investimentos, mão-de-obra e combustível, além da falta que estes veículos fazem no campo, pois se não houver caminhões disponíveis para receber a cana colhida, não haverá trabalho para operários e máquinas. Outro fator relevante é que a cana - inteira ou picada - principalmente se for queimada, pode se deteriorar caso permaneça por muito tempo em estoque ou em fila no pátio de descarga.

Portanto, a logística dos sistemas de corte, carregamento, transporte e recepção de cana-de-açúcar é muito complexa. É importante ter uma visão sistêmica dessa cadeia, pois a abordagem tradicional trata cada subsistema separadamente ou, quando muito, utiliza valores médios de desempenho de equipamentos para relacionar dois sistemas - por exemplo, carregamento e transporte - sem a preocupação com as consequências para outros sistemas.

Da indústria para o consumidor

As usinas possuem armazéns de açúcar (Figura 1) e de álcool com a finalidade de armazenar estes produtos por longos períodos de tempo a fim de regular e organizar o planejamento de transporte e logística das distribuidoras.

Buscar

[Busca Avançada](#)

Hiperbólica

Pasta de documentos

- Adicionar
- Visualizar
- Informes**
- Agritempo
- Embrapa Informática Agropecuária
- IEA - Banco de Dados de Bioenergia
- Mapa - Estatísticas
- Ridesa
- Unica

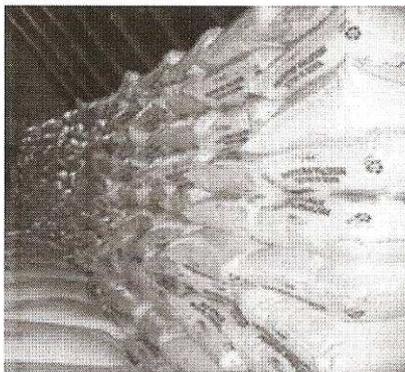


Fig. 1. Armazenamento de açúcar.
Foto: Patrícia Cândida Lopes.

Para que o açúcar e o álcool cheguem ao consumidor final existem empresas de distribuição e exportação especializadas. Para o mercado interno, o transporte desses produtos é feito, principalmente, por rodovias, saindo da indústria diretamente para as bombas de combustíveis ou supermercados. A utilização de outras formas de transporte de açúcar e álcool, como o ferroviário e o naval, ainda são pouco utilizadas. Contudo, são os setores que mais crescem no país, por sua maior eficiência em relação ao transporte rodoviário em longos trechos.

Já para o mercado externo, o sistema de logística e transporte é mais complexo, pois pode ser feito por via rodoviária, férrea e, no caso do álcool, o uso de alcooldutos ligando as usinas aos portos. Para que o porto tenha condição de exportar etanol é necessário que possua uma infraestrutura própria para o armazenamento e carregamento para os navios por ser um material inflamável. Já a exportação de açúcar exige armazéns para estocar o produto no porto e pode ser exportado a granel (Figura 2) ou ensacado (Figura 3).



Fig. 2. Descarregamento de açúcar a granel para exportação.
Foto: Rodrigo Leal.



Fig. 3. Carregamento de açúcar ensacado em navio para exportação.
Foto: Rodrigo Leal.

O maior problema do transporte de açúcar nos portos é ambiental, pois é um produto muito solúvel e, em dias de chuva, não é feito o carregamento para os navios (Figura 4). Ao chegar nos países consumidores, o açúcar é descarregado e levado para a indústria de alimentos ou embalado para a venda no varejo, sendo que sua distribuição é feita, principalmente, por rodovias. O álcool também é descarregado em armazéns para a distribuição nas indústrias alimentícias e o etanol combustível é destinado para refinarias, onde são feitas as misturas à gasolina, e posteriormente, é distribuído nas bombas de combustível.

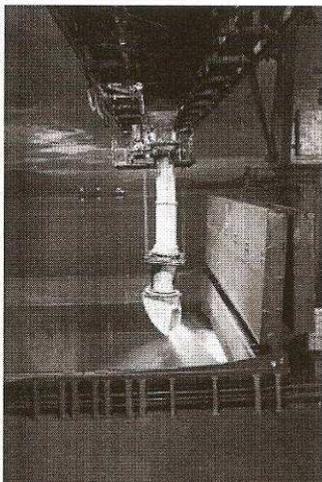


Fig. 4. Carregamento de açúcar a granel em navio para exportação.
Foto: Rodrigo Leal.

Informações Complementares:

 [Colaboração logística na cadeia de suprimentos do etanol : o elo atacadista-varejista](#) Este artigo tem por objetivo apresentar uma pesquisa exploratória, que buscou identificar os tipos de relacionamento logísticos existentes na cadeia de suprimentos do etanol, focando especialmente o elo existente entre as distribuidoras de etanol e os postos de combustíveis (varejistas). Para tanto, [Mais Detalhes](#)

 [Análise econômica sobre a utilização do corredor ferroviário bioceânico Atlântico-Pacífico para o comércio internacional da commodity álcool combustível \(etanol\) da macro-região de Bauri](#) Observa-se que a logística de transportes é estratégica para que o álcool combustível possa cruzar o mundo e chegar ao mercado asiático. Dentre as várias alternativas possíveis, este trabalho busca propor a utilização do corredor ferroviário bioceânico como um eixo de comércio exterior através do oc [Mais Detalhes](#)

 [A dinâmica da cadeia de suprimento no setor sucro-alcóoleiro](#) Desenvolvimento do setor canavieiro; Contexto das mudanças; A integração da cadeia de suprimento; Reestruturação das agroindústrias canavieiras paulistas com inovação na sua infra-estrutura tecnológica e em formas de gestão. Conclusão; Referências bibliográficas. [Mais Detalhes](#)

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa
Todos os direitos reservados, conforme Lei n° 9.610.
Política de Privacidade. sac@embrapa.br
2005-2007

Topo | Página Inicial | Voltar
Embrapa
Parque Estação Biológica - PqEB s/n°.
Brasília, DF - Brasil - CEP 70770-901
Fone: (61) 3448-4433 - Fax: (61) 3347-1041

ANEXO K – Distribuições estatísticas representativas das operações de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.

Operação	Distribuição representativa
Operações no campo	
Deslocamento vazio do trator/caminhão-transbordo	LOGN(8.63, 6.44)
Deslocamento carregado do trator/caminhão-transbordo	NORM(4.33, 1.77)
Engate ou Desengate de carretas (reboques/semirreboques)	NORM(1.5,0.5)
Transbordamento de cana picada para o caminhão	CONT(0.000, 1.000, 0.050, 1.339, 0.260, 1.678, 0.470, 2.017, 0.600, 2.356, 0.760, 2.695, 0.890, 3.034, 0.950, 3.373, 0.970, 3.712, 0.990, 4.051, 1, 4.390)
Tempo de bater pneu (preparação para saída do campo)	TRIA (2,3,4)
Operações na usina	
Tempo de pesagem (peso bruto ou tara)	NORM (1.07,0.137)
Sondagem de caminhões	CONT(0.000, 1.999, 0.130, 2.461, 0.190, 2.923, 0.210, 3.385, 0.230, 3.847, 0.380, 4.309, 0.670, 4.772, 0.920, 5.234, 0.990, 5.696, 1, 6.620)
Descarga de caminhão	NORM (7.36, 1.03)
Engate ou Desengate de carretas (reboques/semirreboques)	NORM(1.5,0.5)

Fonte: SILVA, ALVES e COSTA, 2011

ANEXO L – Distribuições estatísticas representativas das manutenções dos equipamentos de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar e de manuseio de palhico.

Operação	Distribuição representativa
Colhedora	
Abastecimento - duração	TRIA(10,20,30)
Abastecimento - intervalo	TRIA(540,600,660)
Lubrificação - duração	TRIA(240,300,360)
Lubrificação - intervalo	TRIA(3240,3600,3960)
Troca de facas - duração	TRIA(10, 15, 20)
Troca de facas - intervalo	TRIA(600,720,840)
Manutenção no campo - duração	CONT(0.000, 4.999, 0.638, 81.110, 0.848, 157.222, 0.920, 233.333, 0.959, 309.444, 0.979, 385.556, 0.988, 461.667, 0.992, 537.778, 0.996, 613.890, 1, 690.001)
Manutenção no campo - intervalo	8 + GAMM(786, 0.926)
Manutenção na oficina - duração	270 + EXPO(1.33e+004)
Manutenção na oficina - intervalo	270 + EXPO(4.11e+004)
Trator/Caminhão transbordo	
Abastecimento - duração	TRIA(20,30,40)
Abastecimento - intervalo	TRIA(1320,1440,1560)
Manutenção no campo - duração	CONT(0.000, 4.999, 0.314, 25.999, 0.614, 46.999, 0.766, 67.999, 0.839, 89.000, 0.888, 110.000, 0.921, 131.000, 0.936, 152.000, 0.950, 173.000, 0.960, 194.000, 0.971, 215.000, 0.977, 236.000, 0.991, 257.001, 0.993, 278.001, 0.995, 299.001, 1, 320.001)
Manutenção no campo - intervalo	CONT(0.000, 9.999, 0.880, 7087.999, 0.959, 14165.999, 0.974, 21244.000, 0.981, 28322.000, 0.988, 35400.000, 0.989, 42478.000, 0.993, 49556.000, 0.995, 56634.001, 0.997, 63712.001, 1, 70790.001)
Manutenção na oficina - duração	CONT(0.000, 59.999, 0.747, 1019.999, 0.914, 1979.999, 0.946, 2940.000, 0.959, 3900.000, 0.968, 4860.000, 0.968, 5820.000, 0.982, 6780.000, 0.982, 7740.001, 0.986, 8700.001, 1, 9660.001)
Manutenção na oficina - intervalo	CONT(0.000, 1199.999, 0.153, 8983.333, 0.521, 16766.666, 0.660, 24550.000, 0.726, 32333.333, 0.860, 40116.667, 0.958, 47900.000, 0.972, 55683.334, 0.981, 63466.667, 1, 71250.001)
Veículos	
Abastecimento - duração	TRIA(20,30,40)
Abastecimento - intervalo	TRIA(1200,1440,1680)
Lavagem e lubrificação - duração	TRIA(180,240,300)
Lavagem e lubrificação - intervalo	TRIA(8640,10080,11520)
Manutenção no campo - duração	CONT(0.000, 4.999, 0.556, 27.499, 0.834, 49.999, 0.914, 72.500, 0.952, 95.000, 0.974, 117.500, 0.981, 140.000, 0.986, 162.500, 0.988, 185.001, 0.995, 207.501, 1, 230.001)
Manutenção no campo - intervalo	CONT(0.000, 19.999, 0.462, 8166.499, 0.687, 16312.999, 0.813, 24459.500, 0.879, 32606.000, 0.929, 40752.500, 0.944, 48899.000, 0.970, 57045.500, 0.975, 65192.001, 0.985, 73338.501, 1, 81485.001)

continua...

Operação	Distribuição representativa
Manutenção na oficina - duração	CONT(0.000, 4.999, 0.557, 338.666, 0.886, 672.333, 0.936, 1005.999, 0.952, 1339.666, 0.969, 1673.333, 0.973, 2007.000, 0.981, 2340.667, 0.985, 2674.333, 0.988, 3008.000, 0.992, 3341.667, 0.995, 3675.334, 0.997, 4009.001, 0.998, 4342.667, 0.998, 4676.334, 1, 5010.001)
Manutenção na oficina - intervalo	CONT(0.000, 49.999, 0.269, 2140.332, 0.444, 4230.666, 0.578, 6320.999, 0.703, 8411.333, 0.928, 10501.666, 0.965, 12592.000, 0.980, 14682.333, 0.988, 16772.667, 0.993, 18863.000, 0.996, 20953.334, 0.997, 23043.667, 0.997, 25134.001, 0.998, 27224.334, 0.998, 29314.668, 1, 31405.001)
Enleiradoras, enfardadoras e recolhedor de fardos	
Abastecimento - duração	TRIA(10,20,30)
Abastecimento - intervalo	TRIA(600,720,840)
Manutenção no campo - duração	CONT(0.000, 4.999, 0.760, 63.499, 0.925, 121.999, 0.973, 180.500, 0.985, 239.000, 0.993, 297.500, 0.996, 356.000, 0.998, 414.500, 0.999, 473.001, 1, 590.001)
Manutenção no campo - intervalo	CONT(0.000, 4.999, 0.529, 659.666, 0.760, 1314.333, 0.872, 1968.999, 0.924, 2623.666, 0.958, 3278.333, 0.975, 3933.000, 0.984, 4587.667, 0.990, 5242.333, 0.995, 5897.000, 0.997, 6551.667, 0.998, 7206.334, 0.999, 7861.001, 1, 9825.001)

Fonte: SILVA, ALVES e COSTA, 2011