

CAMILLA MIGUEL CARRARA LAZZARINI

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO EM
USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2012

CAMILLA MIGUEL CARRARA LAZZARINI

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO EM USINAS DE
AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

Orientador: Profa. Dra. Sezimária de Fátima Pereira Saramago

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Faria

UBERLÂNDIA - MG

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

L432m Lazzarini, Camilla Miguel Carrara, 1980-
2012 Modelagem e otimização da produção em usinas de açúcar e álcool /
Camilla Miguel Carrara Lazzarini. - 2012.

195 f. : il.

Orientadora: Sezimária de Fátima Pereira Saramago.
Coorientador: Carlos Alberto Faria.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Açúcar - Usinas - Teses. 3. Planejamento da produção - Teses. I. Saramago, Sezimária de Fátima Pereira. II. Faria, Carlos Alberto. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

DEDICATÓRIA

À Deus

Aos meus mestres

Ao meu marido Neto

À minha sobrinha e afilhada Bárbara

Aos meus pais Maria Catarina e Ronaldo, e minha irmã Ludmila

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal e de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro ao projeto vinculado a esta tese (processo TEC - APQ-01836-09).

À Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia pela autorização para a realização do doutorado.

À Professora Sezimária de Fátima Pereira Saramago, pela orientação, dedicação, confiança, incentivo e apoio para a elaboração deste trabalho, e pelo grande exemplo de profissional competente e dedicada, que muito me ensinou.

Ao Professor Carlos Alberto Faria, pela coorientação, permanente confiança, incentivo e apoio, e por todo ensinamento que me dedicou.

Ao Ledan Naves Oliveira Sobrinho, Ulisses Lima Rosa, Lucas Fernandes de Oliveira e Luiz Paulo Borges Miranda, pela ajuda e dedicação, que muito contribuíram na elaboração deste trabalho.

Ao meu marido Neto, pela constante compreensão, amor e incentivo.

Aos meus pais, Maria Catarina e Ronaldo, por todo amor, educação e orações.

À minha irmã, Ludmila, pelo amor e exemplo que sempre foi pra mim e que me inspirou muito a querer ser uma pessoa melhor sempre.

À minha sobrinha e afilhada, Bárbara, pelo amor, carinho e por ter o sorriso que ilumina minha vida.

À minha família, em especial, à Tia Cláudia, Tio André, Laís, Marina, Carol, Vó Aida e Vô Abdalla pela confiança, apoio e carinho.

À minha Vozinha Amélia e Vô Vitório pela proteção de sempre.

À Vó Paschoalina pelo carinho, orações e apoio de sempre.

Ao pessoal da Universidade Federal de Uberlândia do Campus Monte Carmelo, em especial às amigas Marly Luiz Pires e Luciane Gonçalves, pelo apoio e incentivo.

E, o meu MUITO OBRIGADA, mais uma vez, à Deus, pelo dom da vida, por sempre estar me guiando, por colocar pessoas maravilhosas em minha caminhada, e pela oportunidade de crescimento mais uma vez concedida.

LAZZARINI, C. M. C. Modelagem e Otimização da Produção em Usinas de Açúcar e Álcool. 2012. 199 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

RESUMO

A integração de operações agrícolas e industriais através do uso de sistemas logísticos é hoje adotada pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira como estratégia competitiva para melhorar a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar. O objetivo deste trabalho é desenvolver dois modelos que sejam capazes de apoiar decisões em uma usina de açúcar e álcool. O primeiro apresenta o dimensionamento ótimo da frota própria e/ou terceirizada de veículos disponíveis nas usinas. O segundo modelo considera o planejamento agregado da produção para apoiar as principais decisões envolvidas no planejamento e controle da produção de usinas de açúcar e álcool. Assim, a primeira parte trata de um modelo que representa o sistema de transporte de cana-de-açúcar das frentes de corte dos fornecedores até a usina. Na segunda parte é desenvolvido um modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção para representar o sistema de produção de açúcar, álcool, melaço e subprodutos. As decisões consideradas na modelagem são tomadas em períodos semanais e o horizonte de planejamento é o período de safra. Para resolver os problemas resultantes da modelagem, o código computacional com a formulação desenvolvida foi acoplado a sub-rotinas de otimização do Matlab. Simulações são apresentadas resolvendo um estudo de caso e um exemplo ilustrativo para representação do potencial do modelo matemático desenvolvido. Foi possível verificar a adequação dos modelos propostos quando aplicados às decisões envolvidas no planejamento agregado da produção de uma empresa sucroalcooleira.

Palavras-chave: Otimização, Usinas de cana-de-açúcar; Operações de transporte; Planejamento agregado da produção.

LAZZARINI, C. M. C. Modeling and Optimization of Production in Sugar and Alcohol Milling Company. 2012. 199 p. PhD Thesis. Federal University of Uberlândia. Uberlândia.

ABSTRACT

The integration of agricultural and industrial operations through the use of logistics systems is adopted by companies related to the sugar cane industry as a competitive strategy to improve the operational efficiency of sugarcane mills. The objective of this work is to develop two models that are able to support decisions in a sugar and alcohol milling company. The first presents the optimum equipment sizing of own fleet and/or outsourced fleet available in the mills. The second model considers the aggregate production planning to support key decisions involved in production planning and control process of sugar and alcohol milling company. So, the first part deals with model that represents the transportation system of suppliers cutting fronts from the mills. In the second part is developed a mathematical model of process selection and sizing production lots to represent the production process of sugar, alcohol, molasses and derivatives. The decisions considered in the modeling are taken in a weekly bases and the planning horizon is the whole sugarcane harvesting season. To solve the problems arising from modeling, the computational code was developed with the formulation coupled to optimization subroutines of Matlab. Simulations are presented by solving a case study and an illustrative example for representation of the potential of mathematical model developed. It was possible to verify the adequacy of proposed mathematical models when applied to the decisions involved in the aggregate production planning model of a milling company.

Keywords: Optimization, Sugarcane mills, Transport operations, Planning aggregate production

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Visão geral dos processos de uma usina	14
Figura 2.2 - Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola	15
Figura 2.3 - Fluxograma das atividades da etapa CCT	17
Figura 2.4 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e subprodutos	19
Figura 2.5 - Composição dos custos de produção da cana-de-açúcar	21
Figura 3.1 - Subsistemas e componentes do sistema CCT	26
Figura 3.2 - Estrutura para retirada e análise da amostra, a sonda e a realização da retirada de amostra pela sonda	31
Figura 3.3 - Caminhão estacionado para realizar o descarregamento, detalhe do descarregamento e da mesa alimentadora	31
Figura 3.4 - Sequenciamento de operações na indústria	32
Figura 3.5 - As moendas de uma usina, seu conjunto de ternos e cana-de-açúcar moída	33
Figura 3.6 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço	34
Figura 6.1 - Menu para definição e/ou atualização das principais variáveis	79
Figura 6.2 - Caixa para atualização de dados	80
Figura 6.3 - Caixa de saída apresentando os resultados gerais	81
Figura 6.4 - Resultados obtidos para o veículo Rodotrem próprio	81
Figura 6.5 - Resumo das operações industriais da usina do Estudo de Caso	86
Figura 7.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 1	106
Figura 7.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 1	107
Figura 7.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das frentes de corte para a usina no Estudo de Caso – Aplicação 1	108
Figura 7.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 1	109
Figura 7.5 - Quantidade dos produtos finais no estoque próprio nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 1	110
Figura 7.6 - Matriz de produção do Estudo de Caso – Aplicação 1	110
Figura 7.7 - Total semanal para as variáveis do Estudo de Caso – Aplicação 1	111

Figura 7.8 - Total da safra para Estudo de Caso – Aplicação 1	111
Figura 7.9 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 2	113
Figura 7.10 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 2	114
Figura 7.11 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 2	114
Figura 7.12 - Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais nas frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 2	115
Figura 7.13 - Quantidade dos produtos finais no estoque próprio nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 2	116
Figura 7.14 - Matriz de produção do Estudo de Caso – Aplicação 2	117
Figura 7.15 - Total semanal para as variáveis do Estudo de Caso – Aplicação 2	117
Figura 7.16 - Total da safra do Estudo de Caso – Aplicação 2	118
Figura 7.17 - Otimização Híbrida – Estudo de Caso – Aplicação 3	120
Figura 7.18 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 3	121
Figura 7.19 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 3	121
Figura 7.20 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 3	122
Figura 7.21 - Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais nas frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 3	123
Figura 7.22 - Quantidade dos produtos finais no estoque próprio nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 3	123
Figura 7.23 - Matriz de produção do Estudo de Caso – Aplicação 3	124
Figura 7.24 - Total semanal para as variáveis do Estudo de Caso – Aplicação 3	124
Figura 7.25 - Total da safra do Estudo de Caso – Aplicação 3	125
Figura 7.26 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	136
Figura 7.27 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	136
Figura 7.28 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada por cada tipo de frota das frentes de corte até a usina do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	137
Figura 7.29 - Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção de cada produto do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	138

Figura 7.30 - Quantidade de cada produto final estocado em estoque próprio e terceirizado do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	138
Figura 7.31 - Matriz de produção do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	139
Figura 7.32 - Total semanal para as variáveis do modelo do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	140
Figura 7.33 - Total da safra para as variáveis do modelo do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3	140
Figura 8.1 - Menu para definição e/ou atualização das principais variáveis	145
Figura 8.2 - Caixa para atualização de dados	146
Figura 8.3 - Caixas Resultados e Resultados Finais	147
Figura 8.4 - Resultados semanais para a variável transporte	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composições usuais para o transporte de cana-de-açúcar	28
Tabela 5.1 – Características operacionais das composições consideradas para o transporte de cana-de-açúcar	51
Tabela 6.1 - Custos de transporte para as composições	82
Tabela 6.2 – Dados do Estudo de Caso - Etapa Transporte	83
Tabela 6.3 – Dados do Estudo de Caso - Etapa Industrial	84
Tabela 6.4 – Matriz de distância das fontes de suprimento até Usina Estudo de Caso	84
Tabela 6.5 – Matriz de quantidade de cana colhida nas fontes de suprimento – Usina Estudo de Caso	85
Tabela 6.6 - Demanda entre as frentes de corte e a usina – Estudo de Caso	86
Tabela 6.7 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota mista – Estudo de Caso – Cenário 1	87
Tabela 6.8 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota terceirizada – Estudo de Caso – Cenário 2	88
Tabela 6.9 - Demanda entre as frentes de corte e as usinas – Exemplo Ilustrativo	89
Tabela 6.10 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota própria – Exemplo Ilustrativo – Cenário 1	90
Tabela 6.11 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 1	90
Tabela 6.12 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota própria e terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 1	91
Tabela 6.13 - Resultados ótimos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Treminhão para frota própria e terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 2	92
Tabela 6.14 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Rodotrem e frota própria – Exemplo Ilustrativo – Cenário 2	93
Tabela 6.15 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Rodotrem e frota própria e terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 2	93

Tabela 7.1 - Dados de entrada constantes do Estudo de Caso	96
Tabela 7.2 - Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto	97
Tabela 7.3 - Dados constantes do processo escolhido - Estudo de Caso	97
Tabela 7.4 - Dados correspondentes ao processo escolhido - Estudo de Caso	97
Tabela 7.5 - Dados de entrada com variação em t - Estudo de Caso	98
Tabela 7.6 - Dados de CCT - Estudo de Caso	98
Tabela 7.7 - Produtividade agrícola da cana arrendada - Estudo de Caso	99
Tabela 7.8 - Valor dos produtos - Estudo de Caso	99
Tabela 7.9 - Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal - Estudo de Caso	
	100
Tabela 7.10 - Demanda semanal de cada produto - Estudo de Caso	101
Tabela 7.11 - Custo de estocagem de cada produto - Estudo de Caso	102
Tabela 7.12 - Capacidade de estocagem de cada produto - Estudo de Caso	102
Tabela 7.13 - Estoque inicial dos produtos - Estudo de Caso	102
Tabela 7.14 - Penalização pela estocagem de entressafra - Estudo de Caso	102
Tabela 7.15 - Matriz de rendimentos industriais da produção do açúcar - Estudo de Caso	
	103
Tabela 7.16 - Matriz de rendimentos industriais da produção do melaço - Estudo de Caso	
	103
Tabela 7.17 - Matriz de rendimentos industriais da produção do álcool - Estudo de Caso	
	104
Tabela 7.18 - Custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período - Estudo de Caso	104
Tabela 7.19 - Custo de cada processo em cada período - Estudo de Caso	105
Tabela 7.20 - Dados correspondentes ao processo escolhido - Estudo de Caso - Aplicação 3	118
Tabela 7.21 - Dados de entrada constantes para o Exemplo Ilustrativo - Aplicação 3	126
Tabela 7.22 - Dados correspondentes ao processo escolhido para o Exemplo Ilustrativo - Aplicação 3	127
Tabela 7.23 - Matriz auxiliar de determinação dos açúcares e álcoois produzidos - Exemplo Ilustrativo - Aplicação 3	127
Tabela 7.24 - Dados de entrada com variação em t - Exemplo Ilustrativo	127
Tabela 7.25 - Dados de CCT - Exemplo Ilustrativo	128
Tabela 7.26 - Produtividade agrícola da cana própria e arrendada - Exemplo Ilustrativo	128
Tabela 7.27 - Valor dos produtos - Exemplo Ilustrativo	129

Tabela 7.28 - Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal - Exemplo Ilustrativo	129
Tabela 7.29 - Demanda semanal de cada produto - Exemplo Ilustrativo	130
Tabela 7.30 - Custo de estocagem de cada produto - Exemplo Ilustrativo	131
Tabela 7.31 - Capacidade de estocagem de cada produto - Exemplo Ilustrativo	131
Tabela 7.32 - Estoque inicial dos produtos - Exemplo Ilustrativo	131
Tabela 7.33 - Penalização pela estocagem de entressafra - Exemplo Ilustrativo	131
Tabela 7.34 - Matriz de rendimentos industriais da produção do açúcar - Exemplo Ilustrativo	132
Tabela 7.35 - Matriz de rendimentos industriais da produção do melaço - Exemplo Ilustrativo	132
Tabela 7.36 - Matriz de rendimentos industriais da produção do álcool - Exemplo Ilustrativo	133
Tabela 7.37 - Custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período - Exemplo Ilustrativo	133
Tabela 7.38 - Custo do processo em cada período - Exemplo Ilustrativo	134
Tabela A1.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas fontes de suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 1	155
Tabela A1.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas fontes de suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 1	157
Tabela A1.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das fontes de suprimento até a usina – Estudo de Caso – Aplicação 1	158
Tabela A1.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das fontes de suprimento até a usina – Estudo de Caso – Aplicação 1	160
Tabela A1.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 1	161
Tabela A1.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 1	163
Tabela A2.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas fontes de suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 2	165
Tabela A2.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas fontes de suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 2	167
Tabela A2.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das fontes de suprimento até a usina – Estudo de Caso – Aplicação 2	168
Tabela A2.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das fontes de suprimento até a usina – Estudo de Caso – Aplicação 2	170

Tabela A2.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 2	171
Tabela A2.6 - Total semanal e total da safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 2	173
Tabela A3.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas fontes de suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 3	175
Tabela A3.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas fontes de suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 3	177
Tabela A3.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das fontes de suprimento até a usina – Estudo de Caso – Aplicação 3	178
Tabela A3.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das fontes de suprimento até a usina – Estudo de Caso – Aplicação 3	180
Tabela A3.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 3	181
Tabela A3.6 - Total semanal e total da safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 3	183
Tabela A4.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas fontes de suprimento – Exemplo Ilustrativo	185
Tabela A4.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas fontes de suprimento – Exemplo Ilustrativo	187
Tabela A4.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das fontes de suprimento até a usina – Exemplo Ilustrativo	188
Tabela A4.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das fontes de suprimento até a usina – Exemplo Ilustrativo	190
Tabela A4.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Exemplo Ilustrativo	191
Tabela A4.6 - Quantidade de produtos finais em estoque terceirizado – Exemplo Ilustrativo	193
Tabela A4.7 - Total semanal e total da safra das variáveis da otimização – Exemplo Ilustrativo	194

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

[°]brix – Grau brix (unidade de medida de sólidos solúveis em uma solução açucarada).

[°]Z – Grau Zugar (unidade de medida do teor de sacarose).

alfa – Quantidade de açúcar na matriz de produção (%). Este parâmetro é definido pelo usuário.

AEAC – Álcool Etílico Anidro Carburante.

AEHC – Álcool Etílico Hidratado Carburante.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – Brasil.

AR – Açúcares Redutores.

AR_t - Açúcares redutores contidos na cana-de-açúcar em cada semana *t* (%). Este parâmetro se refere à qualidade da cana-de-açúcar que está sendo fornecida.

ARH – Parâmetro que é o valor padrão que determina a quantidade de AR presente no melaço. Açúcares redutores contidos no mel final produzido pelo processo da usina (%).

ART – Açúcares Redutores Totais.

ATR – Açúcares Totais Recuperáveis.

ATRC_t - Açúcares Totais Recuperáveis padrão para a cana-de-açúcar durante todos os períodos *t* (kg/ton de cana-de-açúcar)

ATRCA – Açúcares Totais Recuperáveis padrão para a cana-de-açúcar arrendada (kg/ton de cana-de-açúcar).

AVC1 – Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar própria (u.m./ton de cana-de-açúcar).

AVC2 – Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar arrendada (u.m./ton de cana-de-açúcar).

AVC3 – Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar de fornecedores (u.m./ton de cana-de-açúcar).

AVC4 – Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar de acionistas (u.m./ton de cana-de-açúcar).

beta - Quantidade de álcool na matriz de produção (%). Este parâmetro é definido pelo usuário.

BH – Brix do mel final adotado pela fábrica (°brix).

BH_k - Brix do mel final adotado pela fábrica pelo processo k ($^{\circ}$ brix).
 CA – Custo de arrendamento (ton de cana-de-açúcar/ha).
 $CAEA_{pa,k,t}$ - Parâmetro de conversão de álcoois pa em etanol absoluto pelo processo k e durante todos os períodos t .
 CAR – Cana-de-açúcar arrendada.
 CCT – Corte, carregamento e transporte.
 $CCCT_{st}$ – Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar pelo tipo de transporte s no período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
 $CCCT_{fpt}$ – Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar pela frota própria no período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
 $CCCT_{ftt}$ – Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar pela frota terceirizada no período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
 CE_{pe} – Custo variável de estocagem do produto p pelo tipo de estoque e (u.m./ton ou m^3).
 CE_{pep} – Custo variável de estocagem do produto p pelo tipo de estoque próprio (u.m./ton ou m^3).
 CE_{pet} – Custo variável de estocagem do produto p pelo tipo de estoque terceirizado (u.m./ton ou m^3).
 $CEAT_{pet}$ – Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques no período t (ton ou m^3).
 CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa.
 CFRTER – Custo do frete terceirizado (R\$/ton*km).
 $CFRTER_k$ – Custo do frete terceirizado para o veículo tipo k (R\$/ton*km).
 CFT – Custo Fixo Total (R\$/mês).
 CFT_k – Custo Fixo Total para o veículo tipo k (R\$/mês).
 CG – Capital de giro disponível para rodar a safra (u.m.).
 CG_t - Capital de giro disponível para cada período t (u.m.).
 $CHART_{ph,k,t}$ - Parâmetro de conversão do melaço ph em ART equivalente pelo processo k e durante cada período t .
 CONSECANA – Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool.
 CP – Cana-de-açúcar Própria.
 CPART – Custo de produção de cada kg de ART nos produtos finais pelo processo da usina (u.m./kg ART).
 CSIS – Coeficiente Sem Importância Segurada.
 $CSSE_{ps,k,t}$ - Parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente pelo processo k e durante cada período t .
 CTFP – Capacidade de transporte da frota própria (ton/sem).
 CTFT – Capacidade de transporte da frota terceirizada (ton/sem).

CV_k – Capacidade do Veículo Tipo k (tonelada/viagem).

CVT – Custo Variável Total (R\$/km).

CVT_k - Custo Variável Total para o veículo tipo k (R\$/km).

D_j – Distância da frente de corte i até a usina j (km).

DC – Despesas com combustível (R\$/km).

DECD_k - Determinação do desvio de caldo para a fábrica pelo processo k (valor unitarizado).

DEH_k - Desvio de melaço para a destilaria em cada processo k (valor unitarizado).

DFP_t - Disponibilidade da frota própria em cada período de análise t (%).

DFT_t - Disponibilidade da frota terceirizada em cada período de análise t (%).

DP_{pt} - Demanda do produto p em cada período t (ton ou m³/sem).

DPDL/PU – Modelo de Determinação de Processo e Dimensionamento de Lotes aplicado ao Planejamento agregado da produção em Usinas de açúcar e álcool.

DPVAT – Seguro por danos pessoais causados por veículos automotores (R\$).

e – Locais de estoque: determinado de acordo com o local onde o estoque está sendo feito (estoque próprio, estoque terceirizado).

ep – Estoque próprio de produtos finais.

et – Estoque terceirizado de produtos finais.

EFA_t - Eficiência de fermentação/centrifugação e destilação na produção de álcool (%). Este parâmetro representa as perdas ocorridas na destilaria de álcool durante as etapas de Fermentação e Destilação.

El_{pe} - Estoque inicial de cada produto p no tipo de estoque e (t ou m³).

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

ESA_t - Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool (%). Varia com o tempo de safra. Entende-se por parte comum de produção as operações de Pesagem, Estocagem, Lavagem, Moagem e Clarificação do caldo, gerando um índice de eficiência que representa as perdas ocorridas na Lavagem, no Bagaço, na Torta e as Indeterminadas.

EUA – Estados Unidos da América.

F – Função Objetivo.

Fc – Função Custo.

Fr – Função Receita.

FCAEA_{pa} - Fator de conversão dos álcoois pa em etanol absoluto (adimensionais).

fp – Frota própria para transporte de cana-de-açúcar.

ft – Frota terceirizada para transporte de cana-de-açúcar.

h – hora.

ha – Hectare. Unidade de medida agrária.

IAA – Instituto do Açúcar e do Álcool.

IDEA - Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial.

IEA - Instituto de Economia Agrícola.

IOF – Imposto sobre Operações Financeiras.

IPVA – Imposto sobre a propriedade de veículos automotores (R\$).

k – Processo dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool.

kg – quilograma.

km – quilômetro.

LB – Lubrificantes (R\$/km).

LC – Licenciamento (R\$/mês).

LG – Lavagem e graxas (R\$/km).

LM – Lubrificantes do Motor (R\$/km).

LT – Lubrificantes da Transmissão (R\$/km).

lu – Número de possibilidades de transporte (combinação entre usinas e lavouras).

m – Fonte de Suprimento das matérias primas: determinado de acordo com o tipo de fornecedor da qual a cana-de-açúcar é proveniente: (1) cana-de-açúcar própria; (2) cana-de-açúcar arrendada; (3) cana-de-açúcar de fornecedores; e (4) cana-de-açúcar de acionistas.

m^3 - metros cúbicos.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

$MAS_{ps,k}$ - Matriz auxiliar de determinação dos açúcares ps produzidos pelo processo k (valor unitarizado).

max – maximizar.

MCA_{mt} - Matriz de custos agrícolas de cada fonte de suprimento de matéria prima m nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

MCA_{1t} - Matriz de custos agrícolas da cana-de-açúcar própria nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

MCA_{2t} - Matriz de custos agrícolas da cana-de-açúcar arrendada nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

MCA_{3t} - Matriz de custos agrícolas da cana-de-açúcar de fornecedores nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

MCA_{4t} - Matriz de custos agrícolas da cana-de-açúcar de acionistas nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

MCI_{kt} - Matriz de custos industriais do processo k nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

$MDA_{pa,k}$ – Matriz auxiliar de determinação dos álcoois pa produzidos pelo processo k (valor unitarizado).

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

MMIC – Moagem mínima de cana-de-açúcar (ton/sem).

MMAC – Moagem máxima de cana-de-açúcar (ton/sem).

mod - tipo de modelagem considerada no problema de otimização. Se $mod=1$, o problema considera como variáveis de projeto apenas quantidade de cana-de-açúcar a ser transportada. Se $mod=2$, considera-se como variáveis de projeto a quantidade de cana-de-açúcar a ser transportada e o número de veículos necessários para realizar o transporte.

MPUH - Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%). Em algumas usinas, especialmente na região C/S, o valor de MPUH pode variar em função do processo k que está sendo utilizado, gerando um parâmetro $MPUH_k$.

$MPUH_k$ - Meta de pureza do mel final adotada na fábrica para cada processo k (%).

MRI_{pkt} - Matriz de rendimentos industriais de cada produto p , em cada processo k , nos períodos t (ton ou m³).

MWh – Megawatt-hora. Equivale a 1.000.000 Wh ou $3,6 \times 10^9$ joules.

n - número de frentes de corte j .

n^o - número.

ncf – Relação entre o número de caminhões e o número de funcionários do setor. Este valor varia com a classe do veículo.

NP – Número de pneus (veículo + equipamento).

NTC – Associação Nacional do Transporte de Cargas.

nTF - quantidade de tipo de frota considerada na análise. Se for somente frota própria ou frota terceirizada o índice nTF assume o valor 1, se for frota mista (própria e terceirizada) o índice nTF recebe o valor 2;

nTV – Número de Tipos de Veículos.

$nTVp$ - Número de Tipos de Veículos Próprios.

$nTVt$ - Número de Tipos de Veículos Terceirizados.

NV_k – Número de Veículos do Tipo k .

ORPLANA – Organização dos plantadores de cana-de-açúcar da região Centro-Sul do Brasil.

p – Produtos fabricados: produtos que podem ser produzidos pela empresa, tanto na fábrica de açúcar quanto na destilaria de álcool (Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara, Melaço, AEHC, AEAC).

pa – Subconjunto de produtos da destilaria (AEHC, AEAC).

PATR_t - Preço do ATR no período de fornecimento (u.m./kg).

pc - número de usinas i .

PCdiesel – Preço do combustível (R\$/litro).

PCF_t - Porcentagem de cana-de-açúcar de fornecedores em cada período t (%).

PCN – Preço da câmara nova do pneu (R\$).

PCP – Planejamento e Controle da Produção.

ph – Subconjunto de resíduos da usina (Melaço).

PI – Programação Inteira.

PIM – Programação Linear Inteira Mista.

PL – Programação Linear.

PLM – Preço unitário do lubrificante do motor (R\$/litro).

PLT – Preço unitário do lubrificante da transmissão (R\$/litro).

PM – Peças, acessórios e material de manutenção (R\$/mês).

PNL – Programação Não-Linear.

PO – Pesquisa Operacional.

POC_t - Pol da cana-de-açúcar em cada semana t (%). Varia com o tempo de safra. Este parâmetro se refere à qualidade da cana-de-açúcar que está sendo fornecida.

POS - Polarização dos açúcares (°Z). Parâmetro referente à qualidade do açúcar que se pretende produzir. Valores em (%).

POS_k - Polarização dos açúcares produzidos pelo processo k (°Z).

PP – Preço do protetor novo (R\$).

PPL – Problema de Programação Linear.

PR – Pneus e recauchutagens (R\$/km).

PRA_{mt} - Produtividade agrícola da cana-de-açúcar da fonte de suprimento m em cada período t (ton/ha).

PRA_{1t} - Produtividade agrícola da cana-de-açúcar própria pelo período t (ton/ha).

PRA_{2t} - Produtividade agrícola da cana-de-açúcar arrendada pelo período t (ton/ha).

ps – Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar (Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara).

PU – Pureza de um fluido.

PU_{pe} – Penalização pelo uso pelo produto p do estoque e na entressafra (u.m./ton ou m³).

PUC_t - Pureza da cana-de-açúcar em cada semana t (%). Este parâmetro se refere à qualidade da cana-de-açúcar que está sendo fornecida.

PUCD_t - Pureza do caldo misto em cada semana t (%).

PUS_k - Pureza dos açúcares produzidos em cada processo k (%). A pureza do açúcar é um parâmetro determinante para a geração dos processos.

QL – Quilometragem recomendada pelo fabricante do veículo para lavagem periódica (km).

QM – Quilometragem de troca de óleo do motor (km).

QT - Quilometragem de reposição de óleo da transmissão (km).

R – Preço da recauchutagem ou recapagem (R\$).

R\$ - Reais.

R_{AEAC} - Fator de conversão para o álcool anidro em etanol absoluto.

R_{AEHC} – Fator de conversão para o álcool hidratado em etanol absoluto.

RC – Remuneração mensal do capital empatado (R\$/mês).

RCF – Seguro de responsabilidade civil facultativo (R\$/mês).

rco_i - Restrições de disponibilidade de colheita nas frentes de corte i (ton/dia).

RE – Reposição do Equipamento (R\$/mês).

REA_{pa} - Rendimento estequiométrico dos álcoois pa que se pretende produzir (1/100 kg ART). Parâmetro referente ao tipo de álcool que se pretende produzir.

$RECA_{pa,t}$ - Recuperação teórica da destilaria para os álcoois pa , em cada período t (%). A recuperação teórica é o valor de rendimento obtido em condições ideais descontado das perdas ocorridas no processo de produção.

$RECS_{kt}$ - Calcula a recuperação de açúcares em cada processo k e em cada período t (%). Este parâmetro indica a quantidade de açúcar que será recuperada do xarope proveniente do processo de evaporação e a quantidade de melaço que será gerada.

$RIA_{pa,k,t}$ - Rendimento industrial obtido na produção do álcool pa , pelo processo k , no período t .

$RIH_{ph,k,t}$ - Rendimento industrial obtido na produção do melaço ph , pelo processo k , no período t .

$RIS_{ps,k,t}$ - Rendimento industrial obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t .

rmo_j - Restrições de capacidade de moagem nas usinas j (ton/dia).

RV – Reposição do Veículo (R\$/mês).

s – Serviços de transporte: determinado de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado (transporte próprio, transporte terceirizado).

SA – Salário de Ajudante(s) (R\$/mês). Despesas mensais com salário de ajudante e horas extras, quando houver.

SA1 – Valor do salário do ajudante.

SAH_k - Quantidade de sacarose existente no melaço (%).

SE – Seguro do Equipamento (R\$/mês).

Sem – Semana.

SM – Salário do Motorista (R\$/mês). Despesas mensais com salário de motorista e horas extras, quando houver.

SM1 – Valor do salário do motorista.

SO – Salário do pessoal de Oficina (R\$/mês). Cobre despesas com pessoal de manutenção e seus encargos sociais.

SO1 – Valor dos salários do pessoal da oficina.

SPDL - Modelo de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes.

SRCF – Seguro de Responsabilidade Civil Facultativo. Prêmio relativo a danos pessoais e danos materiais (R\$).

SV - Seguro do Veículo (R\$/mês).

t – Períodos de análise: determinados pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar (semana 1, ... semana T). Este valor depende de condições climáticas e do grau de maturação da cana-de-açúcar. Número total de semanas da safra.

TAI_{*t*} – Porcentagem de tempo aproveitado na indústria durante um período de análise *t* (%).

TEM_{*t*} - Porcentagem de tempo efetivo de moagem durante um período de análise *t* (%).

TL – Taxa de licenciamento paga ao DETRAN (R\$).

ton – Tonelada.

UE – União Europeia.

u.m. – Unidade Monetária.

UMS_{*k*} - Umidade dos açúcares produzidos pelo processo *k* (%). Parâmetro referente à qualidade do açúcar que se pretende produzir.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar.

USP – Universidade de São Paulo.

VA – Custo da Apólice (R\$).

VB – Variáveis básicas.

VAC_{*pt*} - Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto *p* em cada período *t* (u.m./ton ou m³).

VAC_{*pa,t*} - Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo álcool *pa* em cada período *t* (u.m./ton ou m³).

VAC_{*ph,t*} - Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo melaco *ph* em cada período *t* (u.m./ton ou m³).

VAC_{*ps,t*} - Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo açúcar *ps* em cada período *t* (u.m./ton ou m³).

VART_{*kt*} - Valor total do ART produzido pelo processo *k* e durante todos os períodos *t* (valores em kg ART).

VC_t - Valor da cana-de-açúcar para cada período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
 VCA_t - Valor da cana-de-açúcar arrendada para cada período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
 VCC – Capacidade do Câmbio (litros).
 VD – Capacidade da caixa e diferencial de transmissão (litros).
 VE – Vida útil do Equipamento (meses).
 VEZQ – Valor do Equipamento “Zero Quilômetro” sem pneus (R\$).
 VHP – Polarização muito elevada (*Very High Polarization*).
 VNB – Variáveis Não Básicas.
 VP – Preço de cada pneu novo (R\$).
 $VPA_{pa,t}$ - Valor líquido do produto pa , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
 VPD_{pt} - Valor líquido do produto p , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
 $VPH_{ph,t}$ - Valor líquido do produto ph , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
 $VPS_{ps,t}$ - Valor líquido do produto ps , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
 VR – Taxa de reposição (litros/1000 km).
 VTP – Valor Total dos Pneus (R\$).
 VUP – Vida Útil Total do Pneu, incluindo-se uma recauchutagem (km).
 VV - Vida útil do Veículo (meses).
 VVC – Valor do Veículo Completo (R\$).
 VVZQ - Valor do Veículo “Zero Quilômetro” sem pneus (R\$).
 x – Solução encontrada pela função de otimização do problema linear.
 x_j - Demanda de cana-de-açúcar da lavoura i para a usina j (toneladas).
 $XC_{acio,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida na fonte de suprimentos dos acionistas no período t (ton/sem). $XC_{acio,t} \geq 0$.
 $XC_{forn,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida na fonte de suprimentos dos fornecedores no período t (ton/sem). $XC_{forn,t} \geq 0$.
 XC_{mt} - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida por semana (ton/sem).
 Quantidade obtida em cada fonte de suprimento m no período t . $XC_{mt} \geq 0$.
 $XC_{m,t-1}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida por semana (ton/sem).
 Quantidade obtida em cada fonte de suprimento m no período $t-1$. $XC_{m,t-1} \geq 0$.

XD_{mt} - variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima (ton ou m³/sem).

Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período t . $XD_{mt} \geq 0$.

$XD_{m,t-1}$ - variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima (ton ou m³/sem). Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período $t-1$. $XD_{m,t-1} \geq 0$.

XE_{pet} - Variável de estoque (ton ou m³/sem). Quantidade estocada do produto p , pelo estoque tipo e , no período t . $XE_{pet} \geq 0$.

$XE_{p,e,t-1}$ - Variável de estoque (ton ou m³/sem). Quantidade estocada do produto p , pelo estoque tipo e , no período $t-1$. $XE_{p,e,t-1} \geq 0$.

XK_{pt} - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar no processo por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar processada para produzir o produto p , no período t . $XK_{pt} \geq 0$.

$XK_{pa,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar no processo para produzir o álcool pa no período t (ton/sem). $XK_{pa,t} \geq 0$.

$XK_{ph,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar no processo para produzir o melaço ph no período t (ton/sem). $XK_{ph,t} \geq 0$.

$XK_{ps,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar no processo para produzir o açúcar ps no período t (ton/sem). $XK_{ps,t} \geq 0$.

$XT_{prop,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar transportada pelo tipo de transporte próprio no período t (ton/sem). $XT_{prop,t} \geq 0$.

XT_{st} - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar transportada por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar transportada pelo tipo de transporte s no período t . $XT_{st} \geq 0$.

$XT_{terc,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar transportada pelo tipo de transporte terceirizado no período t (ton/sem). $XT_{terc,t} \geq 0$.

y_i - Solução encontrada pela função de otimização do problema não linear.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Delimitação da Pesquisa	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. <i>Objetivos Específicos</i>	7
1.4. Justificativa	8
1.5. Estrutura do Trabalho	12
CAPÍTULO 2 - O Setor Sucroalcooleiro no Brasil	14
2.1. Os Processos de Produção	14
2.1.1. <i>Etapa Agrícola</i>	15
2.1.2. <i>Etapa CCT</i>	16
2.1.3. <i>Etapa Industrial</i>	16
2.2 Custos de Produção	20
2.3. Perspectivas para o Setor	21
CAPÍTULO 3 - Planejamento da Safra no Setor Sucroalcooleiro	24
3.1. Planejamento da Etapa CCT	25
3.2. Planejamento da Etapa Industrial	29
CAPÍTULO 4 - Revisão Problema de Programação Linear	35
4.1. Programação Linear	36
4.1.1. <i>Método Simplex</i>	39
4.2. Modelo de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes	45
4.3. Considerações Importantes	47
CAPÍTULO 5 – Modelagem da Etapa de Transporte e Industrial	48

5.1. Etapa Transporte	49
5.1.1. Parâmetros Gerais de Entrada	50
5.1.2. Cálculo do Custo Fixo da Frota Própria (CFT)	52
5.1.3. Cálculo do Custo Variável da Frota Própria (CVT)	55
5.1.4. Formulação Problema de Otimização – Etapa Transporte	57
5.2. Etapa Industrial	59
5.2.1. Função Receita da Etapa Industrial	63
5.2.2. Função Custo da Etapa Industrial	67
5.2.3. Restrições do Problema – Etapa Industrial	72
CAPÍTULO 6 – Simulações Numéricas - Etapa Transporte	78
6.1. Estudo de Caso	82
6.1.1. Parâmetros Gerais de Entrada	82
6.1.2. Cenário 1	86
6.1.3. Cenário 2	87
6.2. Exemplo Ilustrativo	89
6.2.1. Cenário 1	89
6.2.2. Cenário 2	91
6.3. Discussão	94
CAPÍTULO 7 - Simulações Numéricas - Etapa Industrial	95
7.1. Estudo de Caso	96
7.1.1. Matrizes de Rendimento – Estudo de Caso	103
7.1.2. Aplicação 1: Planejamento agregado da produção de uma usina instalada	105
7.1.3. Aplicação 2: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pelo usuário do modelo	112
7.1.4. Aplicação 3: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo	118
7.2. Exemplo Ilustrativo	125
7.2.1. Matrizes de Rendimento - Exemplo Ilustrativo	132
7.2.2. Aplicação 3: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo	134

7.3. Discussão	141
CAPÍTULO 8 - Conclusão	142
8.1. Conclusão	142
8.2. Sugestões para Pesquisas Futuras	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
ANEXO I	155
ANEXO II	165
ANEXO III	175
ANEXO IV	185

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar é uma das mais importantes do agronegócio brasileiro, não só pelo seu destaque no contexto nacional e internacional, mas também pela dinâmica apresentada nos últimos anos e pelas perspectivas de crescimento.

O setor sucroalcooleiro possui importância na economia nacional como fonte de riquezas e atividade geradora de empregos. Segundo Procana (2012), foram movimentados na safra 2010/2011 cerca de R\$ 60 bilhões na produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade, sendo que esse valor corresponde a 1,6% do PIB do país. Na safra 2010/2011, foram gerados 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos.

O Brasil apresenta 437 unidades produtoras, sendo 168 produtoras de álcool, 16 de açúcar e 253 de açúcar e álcool. Com relação ao percentual, a região centro-sul representa aproximadamente 77% das unidades produtoras e a região norte-nordeste 23% das unidades produtoras. Hoje o país conta com 8,5 milhões de hectares de área plantada com cana-de-açúcar, que corresponde a 3,8% da área agricultável.

Atualmente, o Brasil é o líder na produção canavieira no mundo, seguido da Índia, China e Tailândia. Este fato foi proporcionado pela expansão do número de novas usinas - consequência do investimento de grandes empresas petrolíferas na produção de bicompostível, pelo crescimento e modernização da lavoura canavieira e pela ampliação dos investimentos na modernização das unidades industriais já existentes no país.

A produção de cana-de-açúcar no Brasil vem aumentando desde a safra 2005/2006. O crescimento das exportações brasileiras de açúcar explica boa parte da significativa expansão do setor sucroalcooleiro nacional nos últimos anos e as perspectivas promissoras do mercado interno e externo para o etanol num futuro próximo. Assim, a necessidade de fornecer etanol para o consumo interno em expansão e para o mercado internacional, que

anseia por fontes renováveis de energia, traz excelentes oportunidades para incrementos no crescimento do setor.

Observa-se que com o aumento da utilização dos biocombustíveis em escala mundial houve uma expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil, segundo dados CONAB (2012), foi registrado um aumento de 147,62% da produção de cana-de-açúcar da safra 2000/2001 (processadas 252 milhões de toneladas) para a safra 2010/2011 (processadas 624,0 milhões de toneladas). De acordo com UNICA (2012), na safra 2010/2011 foram produzidos 38,0 milhões de toneladas de açúcar e 27,6 bilhões de litros de álcool, sendo 8 bilhões de litros de álcool anidro e 19,6 bilhões de álcool hidratado.

Segundo dados do MDIC (2012), a produção brasileira de álcool na safra 2010/2011 registrou um aumento de 7% em relação a safra 2009/2010 na qual foram produzidos 25,8 bilhões de litros. Além disso, a produção brasileira de açúcar na safra 2010/2011 registrou um aumento de 15,2% em relação a safra 2009/2010, na qual foram produzidos 33,03 milhões de toneladas de açúcar.

No cenário internacional o país se posiciona como maior produtor e exportador mundial de açúcar e álcool. Dados da Procana e MDIC (2012) indicam que as exportações de álcool alcançaram a marca de 1,964 bilhões de litros na safra 2010/2011, sendo os maiores importadores os Estados Unidos, com 33,8% do total exportado. Ainda segundo dados do MDIC (2012), as exportações de açúcar atingiram 28 milhões de toneladas na safra 2010/2011.

Além do grande potencial de acréscimo do consumo de álcool combustível no mercado interno devido ao advento dos carros bicompostível e também proporcionado pelo preço competitivo do combustível em relação à gasolina, o principal potencial de comercialização do álcool está nas possibilidades de expansão das vendas para os seguintes países: EUA, Japão e países da União Européia (UE). De acordo com Tavares (2008), o álcool está em expansão por ser um combustível ainda barato, renovável e cujo emprego como alternativa para a matriz energética mundial está em fase de crescimento.

Uma questão relevante na expansão do consumo do álcool como alternativa de substituição da matriz energética predominantemente fóssil é a possível mudança da atual configuração de produção de petróleo concentrada em poucas regiões, basicamente o Oriente Médio (IEA, 2012).

Apesar de algumas restrições, como, por exemplo, dificuldades para fornecimento ao mercado global em função da logística de escoamento do produto, do consumo interno crescente, da relação do preço de açúcar e álcool no mercado internacional e da confiança na disponibilidade regular do produto, o Brasil se mantém como maior produtor e exportador de álcool no mundo, seguido pelos EUA.

De acordo com MDIC (2012), o Fórum Internacional de Biocombustíveis 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 Europeia 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.

O Brasil apresentou um crescimento de cerca de 130% das exportações de açúcar brasileiro da safra 1999/2000 (12,1 milhões de toneladas) até a safra 2010/2011 (28 milhões de toneladas). Neste período, o país registrou uma queda de 16% nas exportações do açúcar com relação a safra 2011/2012, porém, ainda assim, na safra 2011/2012 a quantidade exportada foi superior aos demais anos. A queda da exportação na safra 2011/2012 pode ser justificada pelo aumento da demanda interna para o açúcar tanto para o consumo direto quanto para o uso pelos setores industriais processadores dessa matéria-prima.

A agroindústria canavieira do Brasil se diferencia dos outros países por produzir em escala industrial tanto açúcar quanto álcool e, mais recentemente, energia elétrica co-geradora a partir da queima da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. Portanto, há uma característica de aproveitamento múltiplo da cana-de-açúcar, cujos produtos intermediários e finais são dotados dessa cadeia produtiva.

A reestruturação produtiva e organizacional das usinas vem acontecendo de maneira significativa. Sofisticados mecanismos de gestão e controle do processo produtivo e da força de trabalho, como a utilização da computação no controle do processo produtivo, o uso de tecnologias de gerenciamento e o emprego de novos equipamentos, o uso do corte mecanizado da cana-de-açúcar, e até o aumento do processo de terceirização, têm sido algumas das medidas adotadas por empresas do setor.

O momento atual do setor sucroalcooleiro tem sido marcado por um cenário de crescimento e transformações. Dessa forma, o país apresenta uma necessidade em aumentar sua produção, e consequentemente, a extensão da cultura de cana-de-açúcar, para que possa atender às necessidades tanto do mercado interno quanto do externo. De acordo com Ramão et al. (2007), a intensificação da mecanização de todas as etapas do processo produtivo é uma tendência do padrão tecnológico do modelo de agricultura produtivista vigente na atualidade.

Estratégias que possam contribuir para dinamizar os processos da indústria canavieira são sempre de interesse. Nos últimos anos, a adoção de novas tecnologias de produção de

açúcar e álcool impulsionou o agronegócio brasileiro tornando-o competitivo mundialmente em termos de custo e qualidade.

De acordo com Rodrigues (2006), para os próximos anos o setor se mostra promissor, com possibilidade de expansão frente à esperada elevação nas vendas externas de açúcar e ao possível aumento nas exportações e no consumo interno de álcool combustível. O Ministério da Agricultura calcula que a área cultivada com cana-de-açúcar no país crescerá 55% de 2006 até 2013 para atender à forte demanda nacional pelo álcool, alavancada, principalmente, pelo aumento da procura por carros bicompostíveis, e a ampliação prevista nas exportações de açúcar.

Belik e Vian (2002) e Vian (2003) afirmam que após um longo período de controle estatal sobre o mercado de açúcar e álcool, o setor sucroalcooleiro enfrenta as consequências do processo de desregulamentação ocorrido na década de 80. Esta desregulamentação provocou modificações drásticas na dinâmica do setor, tendo como algumas de suas consequências a alteração das estratégias competitivas adotadas pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira.

A adoção destas estratégias implica em um processo de melhoria dos departamentos agrícola, industrial e de marketing das empresas. De acordo com Iannoni e Morabito (2002), principalmente nas últimas décadas, o setor agroindustrial canavieiro iniciou 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 como a melhor forma de integrar as áreas agrícola e industrial.

Segundo Yamada et al. (1998), a necessidade da implantação de alternativas de técnicas, equipamentos e recursos que beneficiem o planejamento e o controle do processo produtivo ocorre em razão do aumento de competitividade no setor.

Na área agrícola, este processo de mudança e racionalização foi observado por Eid (1996), que relata várias inovações importantes destacando as relacionadas ao aprimoramento dos sistemas logísticos por meio de novas estratégias gerenciais para o transporte da cana-de-açúcar. Mostra também o desenvolvimento de variedades especiais de cana-de-açúcar e do controle biológico de pragas que estão contribuindo para a melhoria da qualidade e produtividade dos canaviais.

Na área industrial, verificam-se modificações através de melhorias dos processos por meio de mudanças tecnológicas, modernização das análises de controle de qualidade, automação das operações produtivas, intensificação do processo de melhoria da qualidade dos produtos finais, como a busca por certificação das empresas. Outra questão importante nesse processo de desenvolvimento é a diversificação da produção onde se verifica um aumento do número de produtos fabricados pelas empresas do setor.

A influência do mercado externo e interno, da disponibilidade da força de trabalho, do meio ambiente, da competição nacional, da globalização e da busca pela sustentabilidade gerou a necessidade de racionalização do processo produtivo.

A diversificação e diferenciação dos produtos fabricados pelas usinas originam um problema adicional para o planejamento e controle da produção (PCP) na área industrial das usinas de açúcar. Esta dificuldade adicional deriva do aumento da complexidade na seleção dos processos que serão utilizados para a produção de um maior número de produtos. Para auxiliar no planejamento da produção da safra das usinas uma alternativa é a utilização de técnicas de Pesquisa Operacional (PO).

De acordo com Paiva (2006), estas técnicas podem apoiar decisões importantes que são consideradas no planejamento e controle da produção (PCP) das usinas, em particular, com respeito à quantidade de cana-de-açúcar que deve ser colhida e comprada dos fornecedores, à logística de transporte de cana-de-açúcar a partir das frentes de corte até as usinas, à determinação da moagem semanal, à seleção dos processos de produção utilizados em cada semana, além da política de estoque de produtos finais. Para tanto, deve-se levar em consideração a melhor utilização dos insumos produtivos, dos fatores de mercado e principalmente o melhor aproveitamento da matéria prima, de forma que o planejamento da produção efetivamente apóie as estratégias competitivas que estão sendo adotadas.

1.2. Delimitação da Pesquisa

Esta pesquisa está dividida em dois objetos de estudo. O primeiro objeto de estudo é a operação de transporte de cana-de-açúcar das frentes de corte até a usina. Nesta análise, admite-se como conhecidas as distâncias entre as frentes de corte e a(s) usina(s), a quantidade de cana-de-açúcar disponível em cada frente de corte e a demanda por cana da usina para rodar a safra.

O segundo objeto de estudo desta pesquisa é o processo de planejamento agregado da safra, considerando a etapa agrícola, a etapa de corte, carregamento e transporte (CCT), e a etapa industrial. Nesta análise, considera-se que sejam conhecidos os períodos de utilização industrial dos talhões de cana-de-açúcar, os períodos de entrega dos produtos finais, os preços de mercado e os custos de produção.

Os problemas são abordados por meio de programação matemática, em particular, programação linear. Problemas de Programação Linear são problemas de otimização, onde a função objetivo e as restrições impostas ao problema são lineares.

Modelos deste tipo podem auxiliar no dimensionamento da frota para as operações de transporte e no planejamento agregado da produção de uma usina, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises, orientando os gestores em uma melhor compreensão das variáveis inerentes à gestão das usinas e propiciando uma análise quantitativa que pode apoiar o planejamento operacional da safra e as decisões estratégicas da empresa.

1.3. Objetivos

Os objetivos deste estudo é o desenvolvimento de modelos matemáticos parametrizáveis para qualquer tipo de planta que sejam capazes de: (1) representar o transporte de cana-de-açúcar das fontes de fornecimento até a(s) usina(s) de açúcar e álcool; (2) auxiliar no planejamento agregado da produção com a aplicação de um modelo de otimização que tenha potencial para apoiar parte das principais decisões envolvidas no planejamento e controle da produção (PCP) e na comercialização e estocagem dos produtos de uma usina sucroalcooleira brasileira, de forma a gerar planos de produção eficazes para o período de safra.

Dessa forma, o modelo desenvolvido para as operações de transporte de cana-de-açúcar deve auxiliar os gerentes agrícolas no dimensionamento da frota, definindo assim, a quantidade e tipo de veículos que atenderão a determinada frente de corte, e na determinação da quantidade de cana-de-açúcar que deve ser colhida em cada frente de corte para atender a moagem diária de cada usina, de forma que o custo operacional seja minimizado e as restrições de disponibilidade de matéria-prima em cada frente de corte, da capacidade de moagem diária da(s) usina(s) e a capacidade de disponibilidade dos veículos sejam consideradas.

O modelo desenvolvido para o planejamento agregado da produção deve auxiliar na determinação da moagem semanal, dos processos produtivos e da política de atendimento da demanda, de forma que a margem de contribuição da empresa seja maximizada e as restrições de disponibilidade de matéria-prima, de capacidade produtiva, de estoque, de fluxo de caixa positivo e atendimento da demanda por produto sejam consideradas.

O projeto ótimo deve fornecer informações úteis que permitam a análise das opções mais apropriadas ao sistema estudado, com a finalidade de alcançar a maximização da produção e qualidade, e a minimização de custos e tempos.

Para alcançar este objetivo, utilizou-se a combinação de um modelo de seleção de processos e de dimensionamento de lotes de produção. Essa combinação deve permitir

obter respostas a questões de planejamento tático de médio prazo, tais como: quanto de cana-de-açúcar processar em cada período de análise, quanto de cana-de-açúcar obter de cada fonte de fornecimento, que fornecedor de serviço de transporte utilizar para transportar esta matéria-prima, que matriz de produção utilizar para produzir cada produto demandado e qual a política de estoque, de forma que a usina maximize sua margem de contribuição agroindustrial e minimize os desvios para o alcance dos objetivos estabelecidos pela administração.

1.3.1. *Objetivos Específicos*

- Apresentar dois diferentes cenários para o dimensionamento da frota de veículos, sendo um deles a adoção de um estudo de caso e o outro, um exemplo ilustrativo de forma a representar o potencial do modelo desenvolvido;

O estudo de caso é o cenário gerado considerando a configuração da usina visitada: quantidade e tipo de frentes de corte, tipo de transporte utilizado para transportar a cana-de-açúcar das frentes de corte até a usina, quantidade e tipos de produtos finais produzidos e tipo de estoque utilizado para armazenamento dos produtos finais. Neste cenário, foram utilizados dados fornecidos pela usina e para complementação dos valores necessários à geração do modelo foram utilizados dados obtidos em bibliografias consultadas.

O exemplo ilustrativo teórico foi concebido de forma a ilustrar a capacidade do modelo desenvolvido de ser aplicado a usinas com diferentes configurações e dimensões. Dessa forma, todas as variáveis de projeto são alteradas.

- Apresentar dois diferentes cenários para o planejamento agregado da produção, sendo um deles a adoção de um estudo de caso e o outro, a utilização também de um exemplo ilustrativo teórico para representar o potencial do modelo desenvolvido;

- Analisar o comportamento do modelo para o planejamento agregado da produção quando submetido às variações da matriz de produção. Assim, o status da matriz de produção pode ser pré-estabelecida ou considerada como parâmetro (variável de projeto) do problema de otimização. A matriz de produção é composta pela quantidade de cana-de-açúcar destinada para a produção de açúcar e pela quantidade de cana-de-açúcar designada para a produção de álcool. Por sua vez, a participação de cada tipo de açúcar e/ou álcool considerado na análise, compõe as matrizes auxiliares de produção de açúcar e álcool, respectivamente.

1.4. Justificativa

Conforme cita Marcos Sawaya Jank, presidente da UNICA: A cana-de-açúcar tem quase 500 anos de história neste país, sendo que nos últimos 30 anos, graças aos empreendedores do setor sucroalcooleiro, a atividade tomou o leme da eficiência no universo da agroenergia, deixando de ser apenas uma planta alimentícia para se tornar um novo paradigma da energia limpa e renovável, na área dos combustíveis e da eletricidade (UNICA, 2012).

As novas gerações de gestores das usinas de açúcar, atentos a esse movimento evolutivo, têm reconhecido que somente terão um lugar garantido nesse novo cenário se adotarem técnicas modernas de gestão e planejamento.

Algumas particularidades da agroindústria sucroalcooleira são suficientes para caracterizá-la como um sistema logístico complexo e que demanda prioridade no planejamento de suas atividades.

A usina opera 24 horas ininterruptamente durante a safra, que se estende por 8 meses e há a necessidade de se manter o abastecimento contínuo de cana-de-açúcar. Outro fator importante está relacionado a sua rápida deterioração após a colheita. Uma vez colhida, a cana-de-açúcar precisa ser entregue para industrialização em até 48 horas, induzindo um exigente planejamento logístico evitando-se, assim, o comprometimento da eficiência industrial.

A necessidade de manter a continuidade do abastecimento de cana-de-açúcar na usina reforça a importância de realizar o planejamento adequado das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar para a indústria, cujo principal aspecto é a alocação dos recursos para estas atividades.

Esse empenho no processo é determinante para alcançar o principal compromisso da área agrícola no período de safra: a manutenção da entrega de cana-de-açúcar para moagem.

Dessa forma, numa situação ideal, Silva (2006) afirma que a entrega de cana-de-açúcar na usina deve ocorrer sem interrupções e com o menor tempo possível entre colheita e moagem. A gerência agrícola das usinas tem a responsabilidade de coordenar as operações de corte, carregamento e transporte (CCT) para proporcionar matéria prima de qualidade e sem falha de abastecimento, uma vez que os custos de *setup* na área industrial são muito altos. A busca pela moagem de uma matéria prima de melhor qualidade tem levado as usinas a reduzir a quantidade de cana-de-açúcar estocada no pátio. Para isso, a confiabilidade do sistema de transporte deve ser alta.

Iannoni e Morabito (2002) asseguram que os sistemas logísticos são hoje fundamentais para melhorar a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar, pois atuam na integração de operações agrícolas e industriais.

As paradas na indústria açucareira, caracterizadas pela interrupção da produção por falta de matéria-prima, podem afetar negativamente a qualidade do produto final. Para que o abastecimento de cana-de-açúcar na moenda seja feito de forma contínua é importante que o dimensionamento da frota para execução das operações de transporte da cana-de-açúcar, até a entrega na usina, seja realizado de forma criteriosa, sob pena de se incorrer em elevado custo operacional (MUNDIM, 2009).

As perspectivas do setor sucroalcooleiro já se refletem na crescente elevação dos investimentos para a construção de novas unidades e aumento da capacidade daquelas já instaladas, devendo atingir um montante de US\$ 4 a 5 bilhões nos próximos anos (BOUÇAS, 2005).

Portanto, níveis consideráveis de capital nacional e internacional estão sendo canalizados para o fortalecimento e crescimento do setor. É um mercado extremamente dinâmico, com alterações recentes em relação à atuação do Estado, e evolutivo em termos de área plantada, renda e divisas geradas. Dessa forma, segundo Rodrigues (2006), torna-se importante a realização de estudos que procurem caracterizar a expansão prevista para o setor, bem como investigar os problemas relativos a eficiência produtiva e a organização da produção, buscando manter a hegemonia e sustentabilidade do agronegócio sucroalcooleiro nacional.

Com a crise econômica mundial e seus reflexos sobre a economia sucroalcooleira, o aumento nos níveis de concorrência e as exigências do mercado nacional e mundial, verifica-se a importância de investimento em pesquisas de novas tecnologias agrícolas no setor.

Desta forma, a implantação de técnicas, recursos e equipamentos que favoreçam as operações de CCT e o planejamento e controle da produção faz-se necessário devido às exigências de mercado, onde a busca por acréscimos na produtividade e na melhoria da qualidade dos produtos é adotada como estratégia para manter a competitividade na área.

O conhecimento e tecnologia são instrumentos imprescindíveis ao crescimento sustentável do agronegócio do Brasil. O potencial do agronegócio brasileiro, aliado à capacidade instalada de suas instituições e à reconhecida criatividade de seus pesquisadores, abrem enormes possibilidades de investimentos externos e privados em pesquisa e desenvolvimento no país (MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012).

Ao longo dos anos, o volume e a velocidade com que novos dados são gerados é diretamente proporcional à importância e risco das decisões tomadas por gestores em organizações empresariais (PACHECO, 2006).

Trabalhos que envolvem modelagem e simulação de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar são muito comuns em países onde a atividade sucroalcooleira exerce grande importância, tais como Brasil, Austrália, África do Sul, Cuba e Índia.

Hansen; Barnes; Lyne (2001) desenvolveram um modelo de simulação para estimar o impacto e a efetividade de realizar mudanças no sistema de colheita e transporte de cana-de-açúcar de uma usina da África do Sul. O sistema foi modelado com o objetivo de reduzir o tempo entre a colheita e a moagem.

Diaz e Pérez (2000) realizaram a simulação e otimização das operações de transporte de cana-de-açúcar. Os resultados foram obtidos como conjuntos de soluções viáveis de cana-de-açúcar transportada e de tempos de ciclo de caminhões em função do número de caminhões e reboques utilizados.

No Brasil, o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) que sucedeu em agosto de 2004 o Centro de Tecnologia Copersucar, tem elaborado projetos de simulação de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar desde a safra 1996/1997. Os projetos de simulação desenvolvidos visam, por exemplo, estudos de quantificação de equipamentos, avaliação de turnos de trabalho de funcionários, análises de sensibilidade considerando variações de carga por viagem e distância média.

Iannoni e Morabito (2002) utilizaram simulação para abordar a recepção da cana-de-açúcar em uma usina. Foram avaliados o tempo de permanência na área industrial de diversas configurações de transporte, as regras de despacho dos caminhões para os pontos de descarga e a quantidade de cana-de-açúcar moída. Além do sistema vigente, três cenários alternativos foram testados: Cenário 1 – considera desengate total dos reboques das composições tipo Treminhão; Cenário 2 – aumento de caminhões tipo Rodotrem em substituição a composições tipo Treminhão; Cenário 3 – aumento de 50% de caminhões do tipo Rodotrem de cana-de-açúcar picada com substituição proporcional de caminhões tipo Romeu e Julieta de cana-de-açúcar inteira.

Ripoli e Ripoli (2004) atestaram que o dimensionamento da frota canavieira, especificando o número e os tipos de veículos de transporte mais convenientes, é uma tarefa que exige bastante conhecimento e responsabilidade do administrador e que para auxiliar a tomada de decisão podem ser empregadas metodologias determinísticas ou métodos de simulação. Os autores argumentaram que no Brasil, diversas empresas vêm

elaborando *softwares* para auxiliar os centros de processamento de dados das usinas na elaboração de programas dedicados à logística de sistemas de transporte.

A partir da década de 90 no Brasil verifica-se o surgimento de estudos sobre a utilização de métodos quantitativos no setor sucroalcooleiro. Como exemplo, cita-se: Barata (1992) utilizou programação linear para propor um modelo de avaliação técnico-econômica aplicado às etapas relacionadas ao corte e a reforma de canaviais; Grisotto (1995) aplicou um modelo de otimização do tempo de viagem de caminhões utilizados no transporte ferroviário de cana-de-açúcar; Yoshizaki et al. (1996) utilizaram programação linear para modelar o problema da distribuição centralizada de álcool no sudeste do país; Colin et al. (1999) apresentaram um modelo de programação linear para otimização do sistema logístico de distribuição e armazenamento de açúcar, considerando um depósito central e diversos depósitos secundários; Kawamura et al. (2006) desenvolveram um modelo de programação linear, multiperíodo, para abordar decisões de transporte e estocagem dos produtos de uma cooperativa de comercialização de açúcar e álcool; Silva (2006) desenvolveu um modelo de simulação das operações de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar na determinação da política de turnos de trabalho para a frota de máquinas e veículos de uma usina de açúcar e álcool; Paiva (2006) desenvolveu um modelo de programação linear inteira mista usando a linguagem de modelagem GAMS para realizar o planejamento agregado da produção de uma usina do estado de Alagoas; e Tavares (2008) propôs um sistema de apoio à decisão para controle e gerenciamento agrícola em usinas de açúcar e álcool.

Analizando estas publicações, percebe-se que existe um esforço crescente em desenvolver e aplicar métodos numéricos para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro. Verifica-se na literatura que há destaque para modelos voltados para a etapa agrícola, etapa de corte, carregamento e transporte (CCT) e estoque de produtos finais.

Na etapa industrial, os estudos do processo de produção de açúcar, álcool e subprodutos estão mais restritos na representação das transformações químicas e físicas que acontecem nas diversas operações unitárias de produção de açúcar e álcool, contemplando estudos de análise de investimentos e de melhorias de projeto de equipamentos, como por exemplo, o trabalho de Rodrigues (2005).

Dentro da percepção de que a etapa do sistema agroindustrial canavieiro envolve decisões importantes, segundo Paiva e Morabito (2007), considerando a crescente tendência de utilização de uma estratégia de diversificação produtiva nas usinas de açúcar e álcool, verifica-se a importância de se desenvolver e aplicar modelos quantitativos de

planejamento da produção de forma que se possa atingir, da melhor forma possível, os objetivos estratégicos e comerciais da empresa.

Para auxiliar a tomada de decisão uma das opções é empregar a simulação computacional. Esta técnica permite a análise dinâmica da interação entre os elementos do sistema.

A simulação computacional é uma linha de atuação da Pesquisa Operacional (PO) que pode ser utilizada pela gerência das usinas para auxiliar a tomada de decisão. Conforme Silva (2006), visando atingir os objetivos de desempenho (qualidade, custo, confiabilidade, rapidez e flexibilidade) do sistema de corte, carregamento e transporte (CCT) e do planejamento e controle da produção (PCP), a simulação permite a avaliação comparativa de sistemas retratando cenários reais sem a necessidade de implementá-los.

Assim, quando o modelo é validado, é possível submetê-lo a distintas condições operacionais e avaliar comparativamente o resultado de diversos cenários. A avaliação prévia de cenários, sem implementá-los, permite reduzir falhas, compreender como os diferentes recursos interagem e identificar e explorar antecipadamente as peculiaridades dos sistemas para futura decisão de alocação dos recursos.

A avaliação comparativa permite direcionar melhor os recursos a investir e no caso específico desta pesquisa, escolher o sistema de frota (quantidade de veículos e qual frente de corte atender) que atua nas operações de transporte de cana-de-açúcar, reduzindo o risco de falta de matéria-prima para moagem com a racionalização no uso dos recursos envolvidos e planejar a produção da safra de uma usina de açúcar e álcool.

O uso de técnicas de modelagem matemática pode ser aplicada, de maneira incisiva e positiva, como ferramentas de apoio à decisão, aos executivos e gestores destas empresas. Dessa forma, a contribuição desta pesquisa é a criação da modelagem, a utilização de otimização híbrida (problema linear e não linear) e o desenvolvimento de códigos computacionais que serão disponibilizados para os usuários do setor.

1.5. Estrutura do Trabalho

A tese está estruturada em 8 capítulos. No Capítulo 1 é feita uma introdução sobre a motivação deste trabalho, apresentando a delimitação da pesquisa, os objetivos e as justificativas.

No Capítulo 2 tem-se uma descrição sintética do setor sucroalcooleiro do Brasil, destacando seus processos de produção, os custos de produção e as perspectivas para o setor.

No Capítulo 3 são realizadas considerações sobre o planejamento da safra no setor sucroalcooleiro mostrando as especificidades do planejamento da etapa de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar e também da etapa industrial para produção de açúcar e álcool.

A revisão bibliográfica é realizada no Capítulo 4, onde foram abordados os conceitos de modelagem do problema de otimização destacando a programação linear e o método simplex, do modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes.

No Capítulo 5 são descritos os dados e metodologia adotados para o dimensionamento da frota de veículos e planejamento agregado de safra de uma usina de açúcar e álcool. Neste capítulo é sugerido um Estudo de Caso fundamentado em dados coletados em uma usina de açúcar e álcool do Estado de Minas Gerais, que depois servirá para a aplicação dos modelos matemáticos na elaboração de um cenário.

O Capítulo 6 contém os resultados para a Etapa de Transporte e o Capítulo 7, os resultados para a Etapa Industrial. Nestes capítulos são apresentados dois cenários (Estudo de Caso e Exemplo Ilustrativo) que foram definidos como uma forma de validar os modelos matemáticos propostos. No Capítulo 7 ainda foram definidas três situações: (1) Aplicação 1: Planejamento agregado da produção de uma usina instalada; (2) Aplicação 2: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pelo usuário do modelo; e (3) Aplicação 3: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo.

Essa divisão dos resultados em dois capítulos foi realizada em virtude do número de possibilidades de resultados conseguidos na etapa industrial (três situações para os dois cenários).

As conclusões e sugestões para pesquisas futuras são discutidas no Capítulo 8, que finaliza esta pesquisa.

CAPÍTULO II

O SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL

2.1. Os Processos de Produção

Entender a interação entre campo e indústria contribui para compreender o funcionamento das empresas canavieiras. Para analisar esta interação é suficiente subdividir o processo produtivo em três etapas ou subsistemas principais: (1) etapa agrícola, (2) etapa de corte, carregamento e transporte (CCT) e (3) etapa industrial.

Na Fig. 2.7 é demonstrada uma visão geral dos processos de produção em uma usina que produz açúcar e álcool.

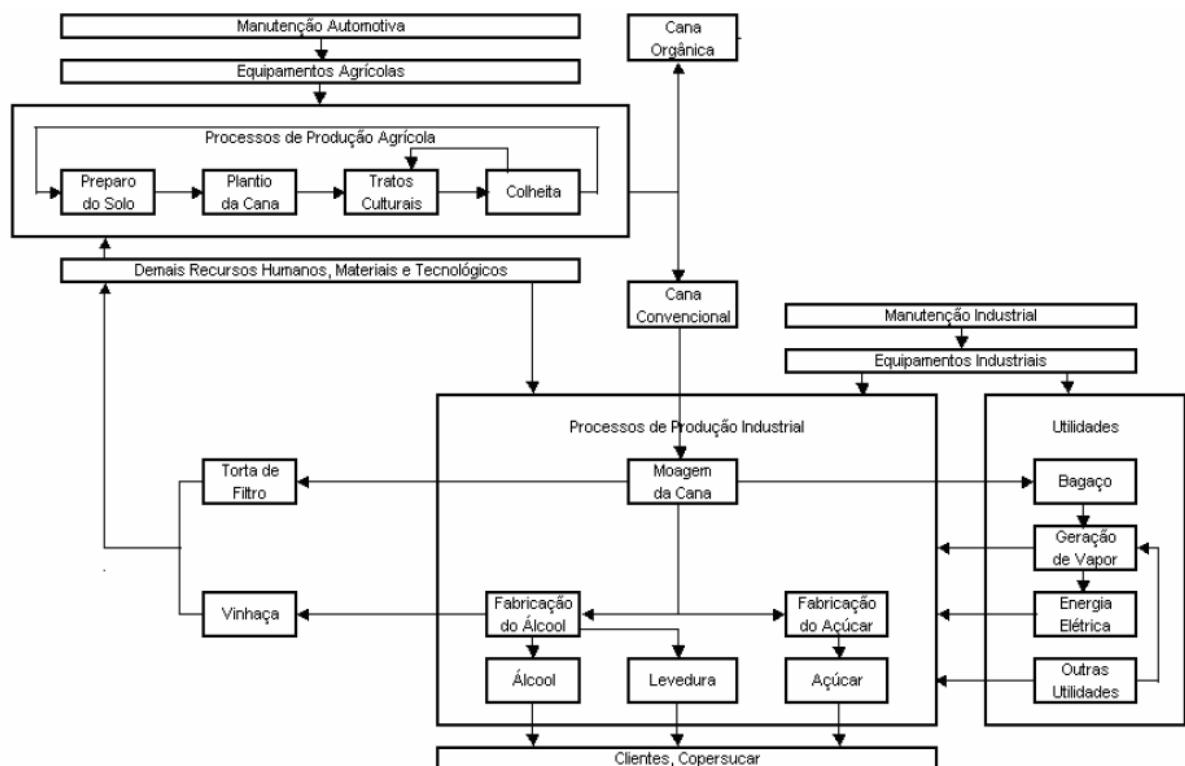


Figura 2.1 - Visão Geral dos Processos de uma Usina (Fonte: Tavares, 2008)

2.1.1. Etapa Agrícola

A produção agrícola corresponde à fase agrícola até a colheita (exclusive). A etapa de corte, carregamento e transporte (CCT) é na maioria das vezes considerada como parte complementar da etapa agrícola, estando subordinada à gerência agrícola das usinas, porém, nesta pesquisa esta etapa é tratada separadamente.

As atividades de preparo do solo, sulcação, adubação e plantio, cultivo da cana-planta, tratos culturais da socaria (parte terrestre da cana-de-açúcar que contém as raízes e a base da planta), e irrigação da cana-planta e da socaria compõem a etapa agrícola da cultura da cana-de-açúcar, conforme descreve esquematicamente a Fig. 2.2.

A primeira atividade da etapa agrícola diz respeito aos processos de preparo do solo, que se caracterizam pela retirada da soqueira e aplicação de corretivos agrícolas. Após o preparo do solo e antes do processo de sulcação e plantio, pode ser realizado o plantio de outras culturas, como, por exemplo, do amendoim, para utilizar o período de entressafra e para fixar nitrogênio no solo com a rotação de culturas.

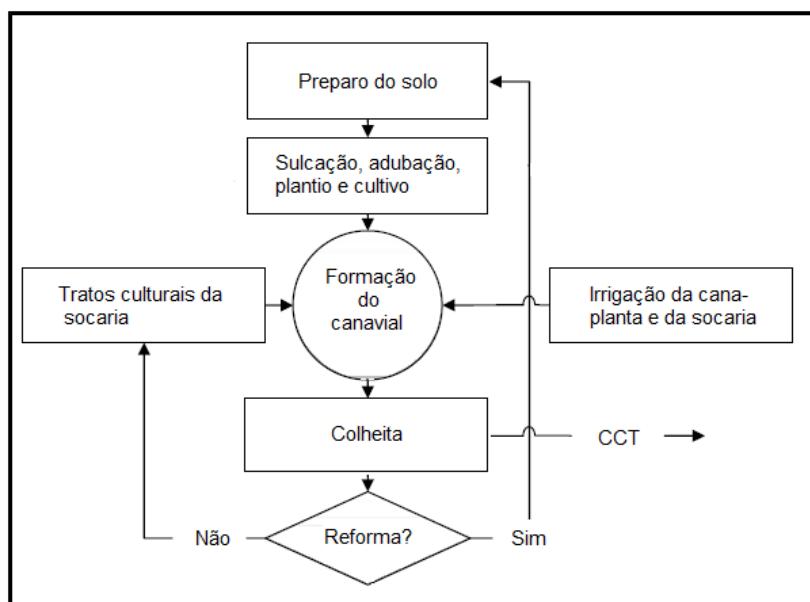


Figura 2.2 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)

As atividades que compõem o segundo processo da atividade de preparo do solo são: sulcação, adubação, plantio e cultivo, e estas são fundamentais para o bom desempenho do canavial.

As próximas atividades a serem executadas são os tratos culturais da socaria, aplicação da vinhaça, controle de pragas daninhas e correção do pH do solo. Esta atividade existe pelo fato da cana-de-açúcar ser uma cultura colhida em mais de uma safra, ou seja, a

cana-de-açúcar é plantada uma vez e propicia em média cinco cortes, ou cinco safras. Durante os quatro anos subsequentes, a socaria é deixada no campo e deve ser tratada de forma que seja mantido o desempenho produtivo da cana-de-açúcar das safras anteriores.

Nesta pesquisa, como considerou que a colheita não compõe a etapa agrícola, o processo de irrigação é considerado como a última atividade da etapa agrícola. Esta atividade é mais comumente utilizada nas culturas da região Norte e Nordeste como forma de compensar os períodos de seca e assim, proporcionar um melhor rendimento agrícola.

2.1.2. Etapa CCT

A etapa de CCT consiste em três principais operações que determinam o tipo de colheita que será adotado: o corte, o carregamento e o transporte da cana-de-açúcar. Segundo Ripoli e Ripoli (2007), a colheita pode ser conceituada conforme a combinação das duas primeiras operações, dessa forma, tem-se a colheita manual, semi-mecanizada ou mecanizada. Na colheita manual, subentende-se que o corte (pode ser precedido ou não por queima da palha) e o carregamento são realizados de forma manual. Este tipo de colheita é atualmente pouco praticado. A colheita semi-mecanizada é caracterizada pelo corte manual e carregamento mecanizado, e na colheita mecanizada, o corte e o carregamento são realizados utilizando sistemas mecânicos. Para a operação de transporte da cana-de-açúcar até a unidade processadora pode-se alterar os tipos e composições utilizadas para esta atividade.

De acordo com Paiva (2009), além destas questões operacionais, é importante destacar alguns pontos referentes à qualidade do CCT realizado. Primeiramente, é importante que a definição do momento de colheita de cada talhão seja especificado de forma otimizada, dada a necessidade de obter uma matéria-prima com maior teor de ART (Açúcares Redutores Totais) e com uma pureza alta, e outro ponto é a necessidade de que todas as operações do CCT sejam executadas em um intervalo inferior a 48 horas.

A Fig. 2.3 apresenta um fluxograma das atividades que compõem a etapa CCT.

2.1.3. Etapa Industrial

Após o corte, a cana-de-açúcar é carregada em caminhões e transportada até a usina. A etapa industrial se inicia com a pesagem e análise da cana-de-açúcar para fins de pagamento do fornecedor pelo sistema CONSECANA (Pagamento de Cana pelo Teor de Açúcares Totais Recuperáveis - ATR) ou para fins de controle dos rendimentos industriais.

Em seguida a cana-de-açúcar passa diretamente para a mesa alimentadora ou vai para o estoque de cana-de-açúcar, onde posteriormente é levada até a mesa alimentadora.

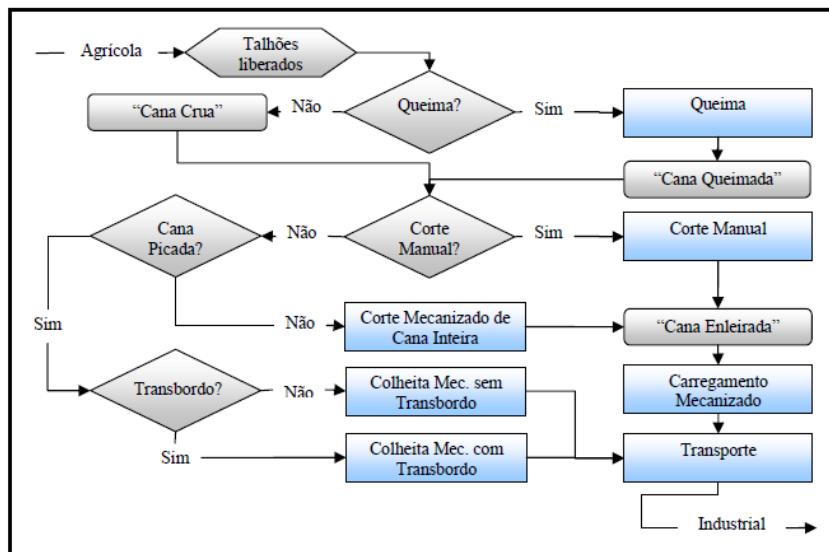


Figura 2.3 – Fluxograma das atividades da etapa CCT (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)

Na mesa alimentadora, a cana-de-açúcar de colheita manual é lavada para retirada de impurezas minerais e vegetais. A água utilizada para limpeza da cana-de-açúcar passa por tratamento e é reutilizada na mesa. Outro processo utilizado atualmente pelas usinas é a limpeza a seco, caracterizada por uma ventilação forçada. Em seguida, a cana-de-açúcar é transportada por esteiras aos picadores e ao desfibrador, com a finalidade de que a cana-de-açúcar apresente o maior índice possível de células abertas e assim possibilite uma maior extração da sacarose pelas moendas.

Antes de seguir para as moendas, acontece a retirada de partículas metálicas que acompanham a cana-de-açúcar através de uma esteira que passa sobre um eletroímã. Logo em seguida inicia-se a alimentação das moendas. Na moagem, a cana-de-açúcar desfibrada passa por um conjunto de ternos e rolos para separação do caldo, que contém a sacarose, da parte fibrosa (bagaço).

O bagaço resultante é levado por uma esteira até as caldeiras para a queima e a produção de vapor. O vapor das caldeiras alimenta turbinas para a movimentação de máquinas (moenda e preparo de cana-de-açúcar) e turbo-geradores que produzem a energia elétrica necessária às atividades de produção de açúcar, álcool e uma eventual cogeração de energia junto à concessionária. O vapor de escape das turbinas é usado no processo de aquecimento e evaporação do caldo, cozimento de açúcar e destilação do álcool (PAIVA, 2009). A usina é autossuficiente, e em geral pode ter excedentes de energia.

Logo após o aquecimento, o caldo passa por várias etapas de tratamento até se transformar em cristais de açúcar. Cada tipo de açúcar possui características peculiares em

relação às etapas de tratamento utilizadas. Os cristais de açúcar formados são envoltos por solução açucarada chamada mel.

As centrífugas recebem os cristais ainda envoltos em mel e separam o mel do açúcar. O açúcar centrifugado é levado por esteiras transportadoras ao secador e ao resfriador de açúcar e, posteriormente, ao ensaque e armazenamento. O mel é recirculado no processo de cozimento até atingir a sua esgotabilidade, quando então é retirado com o nome de mel final ou mel residual.

O mel final, co-produto da fabricação do açúcar, é enviado para a fabricação do álcool na destilaria anexa à usina ou vendido como matéria-prima para outras empresas. A primeira operação na destilaria de álcool é o preparo do mosto, resultante da mistura de caldo de cana-de-açúcar, xarope, mel final e água. O mosto é enviado para fermentação onde irão ocorrer várias reações. Leveduras ou fermento são os microorganismos responsáveis pela fermentação alcoólica. Para o mosto desenvolver o processo fermentativo, ele deve ser inoculado com a levedura.

O vinho é o produto resultante da fermentação alcoólica. O vinho é centrifugado para separação da levedura e enviado à destilação. A primeira coluna fabrica a cachaça, a segunda recupera o álcool hidratado e, na sequência do processo, outra coluna produz o álcool anidro. No processo de destilação, obtém-se ainda o óleo fúsel e a vinhaça, esta última aproveitada na lavoura como fertilizante e o óleo fúsel comercializado com a indústria farmacêutica.

Os produtos e subprodutos são comercializados ou destinados para armazenagem. Como exemplo da etapa industrial de uma usina, a Fig. 2.4 apresenta o fluxograma de um esquema simplificado que define toda a etapa industrial de produção de açúcar, álcool e subprodutos.

Pelo fato dos fornecedores e as usinas possuírem diferentes tamanhos, tecnologias e sistemas de gestão da produção, o grau de eficiência econômica será em maior ou menor proporção de acordo com: i) função produção específica de cada unidade produtiva; ii) funções de custos (variáveis, marginais e médios), onde estão implícitos os preços de insumos incluindo mão-de-obra direta; iii) pela eficiência gerencial (COSTA; CARVALHO, 2007).

Outra observação importante é que os processos industriais utilizados e consequentemente os produtos e subprodutos fabricados pelas usinas brasileiras são bastante heterogêneos, variando de acordo com a classificação (política de comercialização) e tamanho das mesmas.

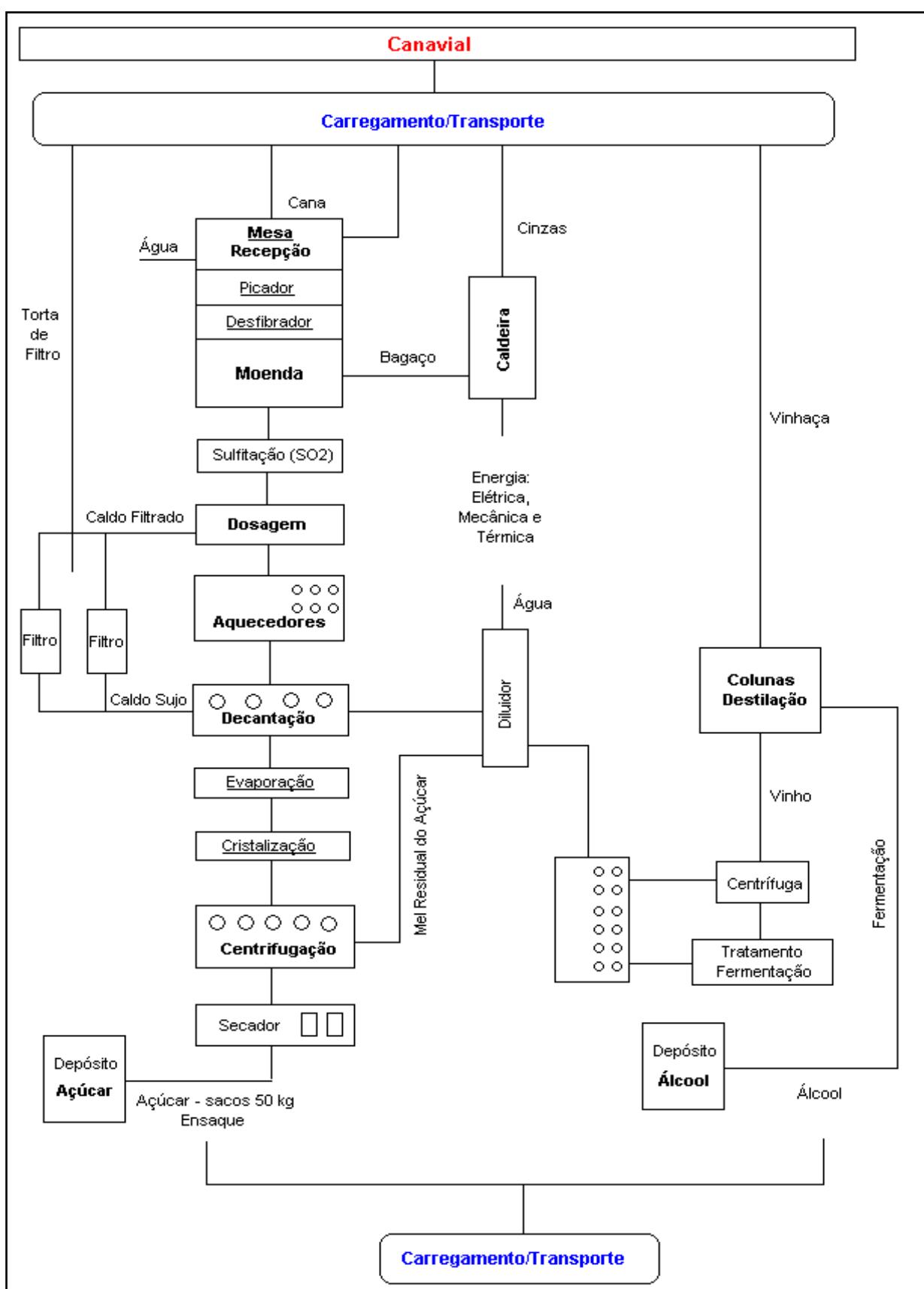


Figura 2.4 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e subprodutos

2.2. Custos de Produção

A pressão dos custos que incidem sobre o processo produtivo é um fator relevante para o setor sucroalcooleiro. Dos insumos à mão de obra, dos equipamentos ao frete, das máquinas agrícolas ao arrendamento da terra, verifica-se uma elevação dos preços dos componentes na cadeia da agroindústria canavieira (IDEA, 2012).

Mas, o ritmo preocupante dos custos vem da análise não só dos profissionais que lidam no dia-a-dia com as demandas das usinas, mas também de especialistas econômico-financeiros ligados ao setor (TAVARES, 2008).

Pode-se afirmar que existem três fatores que são determinantes para a definição dos custos de produção de açúcar e álcool em cada unidade processadora que, de acordo com Tavares (2008), são:

1. Seu perfil de produção;
2. Eficiência operacional na indústria;
3. Qualidade da matéria-prima.

Uma usina que processa matéria-prima de boa qualidade e produzindo-a a baixo custo, com elevado teor de sacarose, com processo de produção ajustado e apresentando otimização do uso do seu parque industrial, certamente apresentará custos inferiores que outra usina operando em condições opostas.

O perfil da produção afeta os resultados, pois custa menos produzir álcool que açúcar. Para enfrentar a elevação dos custos, é fundamental para a usina demonstrar eficiência tanto no campo quanto na indústria e dispor de informações e flexibilidade para ajustar o seu perfil de produção, atentando para os fatores que equacionam o lucro: custos de produção e preços praticados pelo mercado para cada linha de produção.

Desde que houve a desregulamentação do setor sucroalcooleiro e se viu sujeito às condições da livre oferta e procura, os produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool têm buscado sistematicamente esses ganhos de eficiência. Dessa forma, as empresas que investiram fortemente no seu desenvolvimento organizacional, na introdução de novas tecnologias e, acima de tudo, recrutaram profissionais gabaritados (MACEDO, 2005), e assim, tomaram decisões baseadas em sistemas de custos e orçamentos e de planejamento e controle, certamente se destacaram e ganharam competitividade.

Porém, independentemente da forma como as usinas têm se preparado para tornarem-se mais eficientes e mais competitivas, a pressão dos custos tem se acentuado sobre diferentes áreas das empresas. A Fig. 2.5 mostra a composição dos custos de produção com a cana-de-açúcar na região Centro-Sul.

De maneira geral, fazendo-se uma análise qualitativa, é possível observar que as usinas estão aprimorando seus processos, investindo em máquinas, equipamentos e tecnologia da informação, o que traz uma redução de custos. Isso é consequência do aquecimento do mercado pela demanda de álcool e pelo cenário positivo para o açúcar. O investimento nas usinas para incremento dos rendimentos está acontecendo por meio de planos de ação, ferramentas de gestão, controle e análise. A implantação desses processos resulta em eficiência e, consequentemente, redução de custos em virtude da melhora da produtividade e do rendimento agrícola e industrial das usinas (TAVARES, 2008).

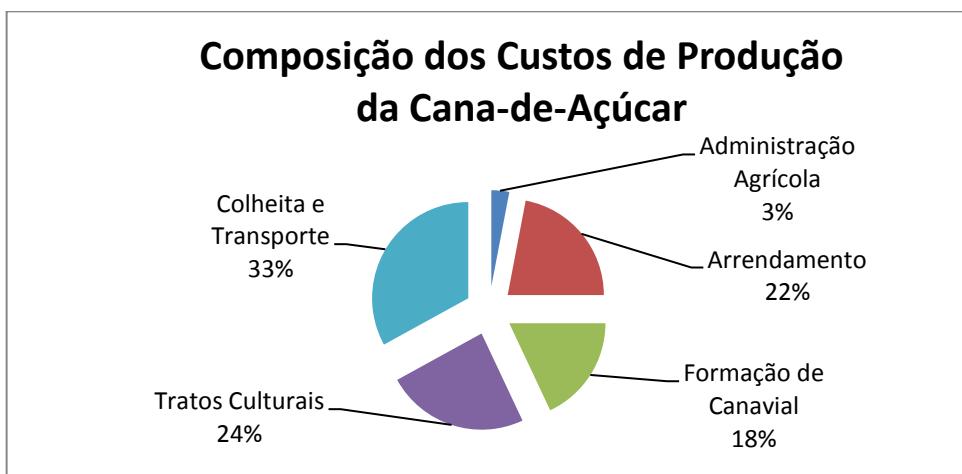


Figura 2.5 – Composição dos custos de produção da cana-de-açúcar (Fonte: IDEA, 2012)

2.3. Perspectivas para o Setor

Em 2011, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, divulgou o Plano Decenal de Expansão de Energia. Segundo o documento, a projeção é que, até 2020, o percentual da participação de fontes de energia limpa na matriz energética brasileira alcance 46,3%, dos quais 21,8% serão provenientes dos derivados de cana-de-açúcar (ZILOR ENERGIA E ALIMENTOS, 2012).

De acordo com o plano, a utilização dos derivados de petróleo deverá se reduzir no país, mesmo com o avanço da produção brasileira. Este avanço foi projetado após as descobertas de reservas de petróleo na faixa do pré-sal, porém, a produção deverá ser voltada ao mercado externo. A expectativa é que o processo de substituição da gasolina pelo etanol hidratado, utilizado nos veículos bicompostível continue a acontecer no mercado interno. Dessa forma, a demanda por etanol deverá crescer exponencialmente, que, de

acordo com Zilor Energia e Alimentos (2012), deverá alcançar o montante de 73 bilhões em 2020.

Ainda segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia, a capacidade nacional instalada de produção de energia crescerá de 110 mil MWh, no fim de 2010, para 171 mil MWh em 2020, com priorização das fontes renováveis, como biomassa, eólica e hidráulica (ZILOR ENERGIA E ALIMENTOS, 2012).

No mercado internacional também há sinais de que a procura pelo biocombustível será crescente. Na União Europeia, a Diretiva 2009/28/CE estabelece que, até 2020, cada país do bloco utilize, pelo menos, 10% de energia renovável no setor de transportes. Já nos Estados Unidos, maior consumidor de etanol no mundo, está em tramitação uma lei que elimina a cobrança da tarifa de importação para o etanol e os subsídios aos produtores americanos de etanol à base de milho.

A projeção para 2015 é que a produção brasileira seja de 36 bilhões de litros, dos quais 28 bilhões para o mercado interno e cerca de oito bilhões de litros para exportação (MAPA, 2012). A Fig. 2.6 mostra a projeção de exportação de álcool do Brasil para as próximas safras.

As expectativas de produção para a safra 2015/16 são de 829 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 41,3 milhões de toneladas de açúcar e 46,9 bilhões de litros de etanol. Para esse crescimento haverá um investimento em novas unidades no valor de R\$33 bilhões (TONETO JR.; LIBONI, 2007). De acordo com Torquato (2008), a demanda crescente nos mercados interno e externo por combustíveis renováveis, especialmente o etanol, atrai novos investimentos para a formação de novas áreas de cultivo da cana-de-açúcar para indústria (CRUZ, 2010).

Esta situação de expansão do setor sucroalcooleiro está relacionada ao desenvolvimento de novas variedades de cana-de-açúcar, crescimento da área plantada, equipamentos industriais mais adequados, avanços na logística e no transporte da matéria-prima, aumento da produtividade, entre outros. Assim vantagens naturais combinadas com políticas de incentivo ao setor resultam na elevada competitividade do país na produção de açúcar e etanol (LIBONI, 2009).

Nos últimos anos, o setor sucroalcooleiro no Brasil deu um salto no sentido do desenvolvimento aplicado à produção. Fato é que essa situação, favorável ao setor, está totalmente ligada ao processo de modernização e também a outros inúmeros fatores, tais como o surgimento do carro com motor bicompostível, o elevado preço do petróleo, além de preocupações relacionadas ao meio ambiente, como a questão do aquecimento global causada por emissões de gases e, principalmente, a necessidade de buscar fontes renováveis de energia mais limpa (BOZZO, 2012).

O setor sucroalcooleiro, depois de ter passado pela crise de superprodução de etanol no período de 1999/2000, representada pelos baixos preços do álcool carburante para os produtores e por um expressivo excedente do produto no mercado, conseguiu acumular condições suficientes para um crescimento sustentado, desde então até o momento atual, com perspectivas de continuar essa expansão de forma muito sólida (SILVA, 2012).

O Brasil, considerado o maior fornecedor de álcool do mundo, tem um potencial muito grande para se manter no topo do setor sucroalcooleiro. Porém, é preciso haver comprometimento, não apenas na obtenção de lucro, mas sim no sentido de consolidação de um país com potencial para ampliar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que possam contribuir para um mundo melhor (BOZZO, 2012).

De acordo com Veiga; Fronzaglia; Torquato (2011), por configurar-se no papel da matriz energética, o álcool poderá viabilizar profundas mudanças na economia setorial. Porém, sua competitividade vai depender fundamentalmente do processo de inovação tecnológica da área agrícola e industrial e de melhorias na logística dos processos acarretando menores perdas e maior eficiência.

Desta forma, justifica-se que novas pesquisas continuem sendo desenvolvidas neste setor.

CAPÍTULO III

PLANEJAMENTO DA SAFRA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

A indústria sucroalcooleira possui algumas peculiaridades que influenciam diretamente no planejamento da safra. Dentre estas características, pode-se destacar a sazonalidade na produção agrícola, o alto custo de sua matéria-prima (aproximadamente 60% do custo dos produtos finais), gerando uma necessidade de total aproveitamento deste recurso durante os melhores períodos de colheita e a continuidade da operação de moagem durante toda a safra, que se estende de maio a dezembro na região Centro-Sul e de setembro a março na região Norte-Nordeste.

O período de moagem é definido por três fatores relacionados ao clima seco. Primeiramente, a cana-de-açúcar tem seu teor de sacarose aumentado em virtude do stress hídrico causado pela maior disponibilidade de água. Em segundo lugar, do ponto de vista agronômico, a colheita apresenta menor risco de causar danos como a compactação do solo e o dilaceramento de soqueiras devido à movimentação das máquinas no campo e o envio de impurezas minerais para a usina, o que causa o desgaste dos equipamentos e perda da eficiência industrial. Finalmente, a interrupção frequente do processo de colheita e transporte devido à chuva reduz a confiabilidade de entrega de cana-de-açúcar na indústria.

Diferente dos demais países produtores de cana-de-açúcar, no Brasil, o processamento industrial é integrado verticalmente à produção agrícola. Dessa forma, a usina mói cana-de-açúcar própria, arrendada, de fornecedores e acionistas e dependendo do tipo de contrato, as operações agrícolas de preparo do solo, plantio e tratos culturais, além do próprio CCT são realizadas pela usina (SILVA, 2006).

A rápida deterioração da matéria-prima após a colheita induz a um exigente planejamento logístico que está diretamente relacionado com a interação entre as etapas agrícola, CCT e industrial das empresas canavieiras.

Outra particularidade é sua disposição na cadeia produtiva. As usinas e destilarias utilizam distintos canais para a distribuição de seus produtos. Isto faz com que uma parte da

produção esteja comprometida com os clientes (p.ex., contratos de longo prazo) e o restante esteja livre para comercialização, aproveitando as variações de mercado (p.ex., mercado spot). Estas características geram pressões por preços, necessidade de altos níveis de serviço e baixa tolerância a pedidos atrasados.

O processo de desenvolvimento do planejamento da produção nas organizações produtivas tem-se mostrado muito dinâmico, onde muitas variáveis interagem umas com as outras, numa relação não raramente complexa. A análise e ponderação sobre tais variáveis e suas inter-relações leva a uma definição de parâmetros a serem implementados e/ou controlados de tal forma a satisfazer as previsões de produção (YAMADA et al., 1998).

O principal objetivo do planejamento e controle da produção (PCP) é propiciar informações adequadas para que os administradores possam gerenciar e controlar as atividades da operação produtiva e satisfazer, de maneira contínua, à demanda dos consumidores.

De acordo com Slack et al. (2002) *apud* Paiva (2009), este gerenciamento se dá por meio do planejamento, que é a atividade de formalizar o que se pretende que aconteça em um momento no futuro, e por meio do controle, que é o processo de lidar com as variações ocorridas no sistema de forma que as metas da corporação sejam alcançadas em todos os níveis.

É através do planejamento e controle da produção (PCP) que a empresa garante que suas decisões táticas e operacionais sobre *o que, quando, quanto, como e com o que* produzir e/ou comprar, sejam apropriadas ao planejamento estratégico e, por conseguinte, adequadas aos objetivos da organização.

A demanda, os custos dos componentes, a capacidade disponível, enfim, as condições que afetam o processo de produção não são estáveis no tempo. Logo, todas as etapas de produção devem ser planejadas de forma agregada para obter uma utilização eficiente dos recursos produtivos. Os problemas surgem devido ao fato de que as quantidades impostas pelo mercado raramente coincidem com as melhores taxas de utilização dos recursos disponíveis na empresa.

3.1. Planejamento da Etapa CCT

As operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar podem ser realizadas de várias formas, alterando-se os parâmetros, como o tipo de corte (corte manual ou mecanizado) e/ou o tipo de equipamento utilizado (carregadoras, colhedoras,

tratores-reboque, etc.). Na Fig. 3.1 encontra-se a representação dos subsistemas e componentes do sistema CCT.

A cana-de-açúcar que chega à usina vem de pontos distintos, trabalhada por uma equipe autônoma, denominada frente de corte. As frentes de corte operam com equipamentos diferentes conforme o tipo de cana-de-açúcar (corte manual/colheita mecanizada).

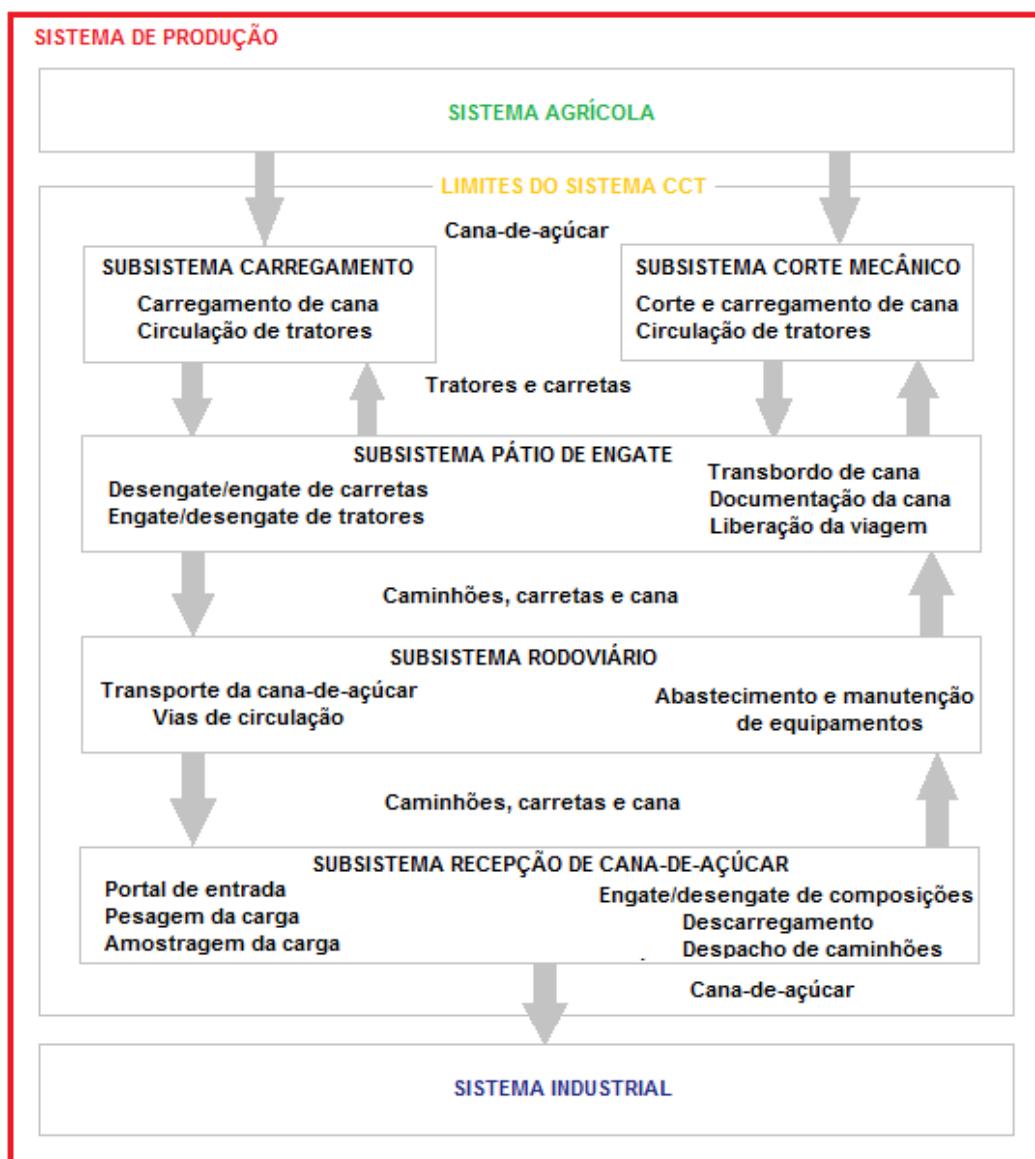


Figura 3.1 – Subsistemas e componentes do sistema CCT (Fonte: adaptado de Gualda, 1995)

Algumas usinas possuem grande parte de sua moagem dependente da entrega de cana-de-açúcar de frentes de cortes de fornecedores. A complexidade operacional nas frentes de corte diz respeito a interação na alocação e uso dos equipamentos, que deve ter

como finalidade a maximização do tempo produtivo e do uso da capacidade dos veículos, equipamentos de corte e carregamento e operadores. Assim, de acordo com Silva (2006), evita-se tempos ociosos em filas e esperas por cana-de-açúcar ou outros equipamentos dos quais depende a continuidade das operações.

Outro artifício que as usinas utilizam é dispor de equipamentos reserva sem operador nas frentes de corte e carregamento, como, por exemplo, colhedoras, tratores transbordo, dentre outros. Dessa forma, em eventual quebra de algum equipamento, o operador utiliza o maquinário reserva e continua sua jornada.

Segundo Hahn (1994) *apud* Mundim (2009), o número de frentes de corte trabalhadas diariamente varia de três até mais de 12, de acordo com a quantidade de cana-de-açúcar estimada em cada frente e a capacidade de moagem diária da usina. Estas frentes encontram-se a diferentes distâncias da usina, fazendo com que a quantidade de caminhões em direção a uma frente de corte seja diferente de outra frente com o mesmo potencial de colheita. Assim, as frentes de corte não são constantes, podendo alterar diariamente em localização e número.

De acordo com Silva (2012), estas frentes são essenciais para a otimização dos recursos, pois a sua distribuição em diferentes distâncias permite operar em uma distância média que possibilite otimizar os equipamentos e que garanta o abastecimento contínuo da indústria, dessa forma, obtém a racionalização do uso dos recursos necessários para a realização da colheita. Do contrário, considerando o processo com uma única frente de corte seria ineficiente, pois haveria sobra de equipamentos quando as distâncias fossem curtas e falta deles quando as distâncias fossem maiores, o que certamente levaria a uma estrutura superdimensionada, com pesado ônus para o processo produtivo e para a organização.

Como mencionado anteriormente, os subsistemas de colheita podem ser do tipo: sistema manual, semi-mecanizado e mecanizado. Genericamente, os sistemas são geralmente identificados pela forma em que a cana-de-açúcar é recebida na indústria: inteira ou picada. Quando uma frente de corte é identificada como sendo de cana-de-açúcar inteira, subentende-se que o sistema seja semi-mecanizado, ou seja, corte manual e carregamento mecânico, porém a colheita mecânica comercial da cana-de-açúcar inteira não é muito difundida. Já o termo cana-de-açúcar picada se refere ao sistema que emprega colhedoras para efetuar o corte e o carregamento (SILVA, 2006).

Além da necessidade de entrega contínua de matéria-prima nas usinas, as máquinas e veículos que são utilizados na produção da cana-de-açúcar são equipamentos de alto investimento. Dessa forma, para aproveitá-los intensamente, turnos de trabalho são determinados ao longo das 24 horas do dia. O procedimento usual considera o trabalho dos

operadores em três turnos de oito horas, mas algumas usinas trabalham com sistema de dois turnos.

Os tipos de transportes da cana-de-açúcar utilizados no país são: ferroviário, hidroviário e rodoviário, sendo o último o de maior utilização.

Através da malha rodoviária circula cerca de 95% de toda cana-de-açúcar colhida no País e as vias utilizadas podem pertencer à propriedade, aos municípios, aos estados ou ao Governo Federal (SILVA, 2012).

A otimização dos transportes é importante para garantir o abastecimento de cana-de-açúcar nas usinas a um menor custo possível, considerando os altos custos envolvidos na cadeia produtiva do setor sucroalcooleiro.

O transporte da cana-de-açúcar é predominantemente do tipo rodoviário, com o emprego de caminhões que transportam cana-de-açúcar inteira (colheita manual) ou cana-de-açúcar picada (colheita mecânica). Há diversos tipos de composições de transporte para cana-de-açúcar, sendo os mais utilizados o caminhão com um reboque (Romeu e Julieta), o caminhão com dois reboques (Treminhão) e o cavalo-mecânico com dois semi-reboques (Rodotrem), que são apresentados na Tab. 3.1. A frota pode ser homogênea ou ter várias categorias de caminhões com diferentes capacidades e características operacionais.

Tabela 3.1 - Composições usuais para o transporte de cana-de-açúcar

Descrição	Esquema	Nome Popular
Caminhão plataforma com um reboque acoplado		Romeu e Julieta
Caminhão plataforma com dois reboques acoplados		Treminhão
Cavalo mecânico com dois semi-reboques acoplados		Rodotrem

O transporte é efetuado de forma repetitiva entre a usina e as frentes de corte. A principal característica deste sistema é que um caminhão, a cada viagem, visita apenas um ponto de fornecimento de cana-de-açúcar, retornando em seguida à usina.

De acordo com a composição de transporte e o tipo da carroceria utilizada, variam a necessidade de potência do motor do caminhão, a capacidade de carga transportada por viagem, as velocidades de deslocamento (vazio e carregado), o tipo de carregamento no campo e o tipo de descarga na usina.

Para o transporte da cana-de-açúcar, a troca de turnos pode ocorrer apenas na usina, no campo e na usina, ou em sistema de troca em trânsito. Neste último sistema, um veículo

transporta os operadores até encontrarem seu veículo de trabalho para que a troca seja feita em seu devido horário de troca de turno.

Embora atualmente não seja uma prática muito difundida, algumas usinas têm realizado contrato de terceirização de algumas operações, como, de acordo com Silva (2006), a colheita mecanizada, o carregamento de cana-de-açúcar inteira e o transporte.

A primeira e grande decisão a ser tomada é se o serviço de transporte na empresa deve ser próprio ou contratado. Esta decisão é complexa e deve ser precedida de estudos especializados de viabilidade econômico-financeira, além de fatores políticos e estratégicos. Hoje as empresas buscam concentrar-se em sua verdadeira vocação, terceirizando atividades não afins (GUIMARÃES, 2006).

As operações de corte, carregamento e transporte (CCT) envolvem equipamentos de custos elevados, tais como colhedoras, carregadoras, tratores e caminhões. O planejamento da utilização desses insumos de produção requer decisões quanto à sua quantificação.

Dimensionar a frota é definir a quantidade certa de veículos para atender a demanda de transporte na empresa (GUIMARÃES, 2006). Caso o dimensionamento do transporte não esteja adequado, poderão ocorrer problemas de abastecimento de cana-de-açúcar na usina. Segundo Caixeta et al. (1998), as operações de CCT respondem por 30% do custo da cana-de-açúcar entregue para moagem, e na sequencia desses custos, após a moagem, o transporte é a operação mais cara, seguida pelo carregamento.

O estudo visando à organização e à racionalização das operações do transporte rodoviário poderá representar uma grande economia de recursos para as empresas do setor, bem como aumentar a eficiência operacional e, consequentemente, a produtividade dos caminhões (LEITE, 1992 *apud* BERGER et al., 2007).

Assim, o sistema de transporte deve ser eficiente, sem haver ociosidade de equipamentos e deve fornecer matéria-prima em quantidade suficiente sem ocasionar parada da indústria por falta desta, uma vez que qualquer interrupção na moagem irá ocasionar vários transtornos no processo de fabricação e, em consequência, reduzirá a eficiência global da indústria, o que é extremamente indesejável.

3.2. Planejamento da Etapa Industrial

A primeira atividade da etapa industrial é a pesagem dos caminhões para registrar a quantidade de cana-de-açúcar fornecida de determinada frente de corte. Dessa forma, toda a cana-de-açúcar que entra na usina é pesada em plataforma. É realizada uma pesagem com o caminhão carregado ao entrar na indústria e novamente após o descarregamento, na

saída, encontrando-se, assim, a quantidade de cana-de-açúcar transportada, com o intuito de avaliar o rendimento industrial e obter níveis de produção da área agrícola e de transporte.

A pesagem é necessária para controle da quantidade de matéria-prima, pagamento de cana-de-açúcar, cálculo da eficiência dos equipamentos e eficiência global da usina, assim como quantificar eventuais perdas.

A recepção da cana-de-açúcar na usina é realizada através de uma balança rodoviária, onde o motorista do veículo deverá trazer em mãos uma ordem de carregamento. Esta ordem deve conter um número diferente da outra, e todos os códigos: caminhão, motorista, carreta, carregadeira, reboque, operadores e a frente de corte, para que o operador possa digitá-la no sistema, em seguida, o operador da balança consulta, no sistema, se a frente de corte está com a porcentagem de análise dentro do padrão.

Em seguida, alguns caminhões seguem para a sonda de retirada de amostras, onde são retiradas, aleatoriamente, amostras das cargas de cana-de-açúcar de onde se extrai o caldo para a determinação dos seguintes parâmetros de qualidade da matéria-prima: o POC (Pol da Cana), o AR (Açúcares Redutores), o ART, o ATR, o brix, a fibra e a pureza da cana-de-açúcar. A escolha dos caminhões que terão amostras retiradas para análise é feita de acordo com o tipo de fonte de suprimento que a cana-de-açúcar transportada faz parte. Os caminhões que transportam cana-de-açúcar de fornecedores são 100% analisados e os da usina em torno de 70%, para esta escolha não é adotado nenhum método específico.

Orientado pelo mapa de amostragem (Ba), que o motorista do caminhão recebe na balança, o operador faz com que o tubo de amostragem penetre de cima para baixo no local determinado, recolhendo uma quantidade de amostra de cana-de-açúcar. A Fig. 3.2 mostra em detalhe a estrutura para retirada e análise da amostra, a sonda e a realização da retirada de amostra pela sonda.

O próximo procedimento é o descarregamento da cana-de-açúcar na indústria, que pode ser realizado nas esteiras (cana-de-açúcar inteira e cana-de-açúcar picada) ou a carga pode ser levada para o pátio (cana-de-açúcar inteira). Segundo Silva (2012), o equipamento ideal a ser utilizado no descarregamento é determinado pelo tipo de caminhões e de cana-de-açúcar (inteira ou picada) adotados pela empresa. Os sistemas de descarga de cana-de-açúcar inteira mais comuns são a descarga por hilo ou a descarga por ponte rolante. Já os sistemas de descarga de cana-de-açúcar picada mais utilizados são por báscula lateral ou por báscula superior.



Figura 3.2 – Estrutura para retirada e análise da amostra, a sonda e a realização da retirada de amostra pela sonda (Fonte: Acervo pessoal da autora)

A Fig. 3.3 apresenta o caminhão estacionado para realizar o descarregamento da cana-de-açúcar, o detalhe do descarregamento e da mesa alimentadora que leva a cana-de-açúcar até as moendas.



Figura 3.3 - Caminhão estacionado para realizar o descarregamento, detalhe do descarregamento e da mesa alimentadora (Fonte: Acervo pessoal da autora)

Após serem descarregados, os caminhões que transportam cana-de-açúcar inteira passam primeiro por um processo de limpeza e os caminhões que transportam cana-de-açúcar picada seguem diretamente para a pesagem, para que seja efetuada a segunda pesagem, para que se obtenha o peso líquido e em seguida retornam ao campo.

A cana-de-açúcar pode ser descarregada e permanecer em pátio próprio para estocagem. É possível, também, ser estocada nas próprias composições que realizam o transporte desde a lavoura (estoque sobre rodas), que se caracteriza como um estoque temporário, ou, ainda, ser enviada para alimentação direta nas moendas. Tratando-se de cana-de-açúcar picada, o estoque só pode ser feito sobre rodas.

O estoque de cana-de-açúcar no pátio garante a alimentação das moendas nos momentos de descontinuidade da entrega, como, por exemplo, nos intervalos de trocas de turnos, nas paradas dos operadores para refeição. Geralmente, o estoque de cana-de-açúcar é formado ao longo do dia sendo esvaziada a noite. Algumas usinas monitoram constantemente esse estoque, assim, se a quantidade de cana-de-açúcar no pátio for

suficiente para abastecer as moendas até a chegada de cana-de-açúcar “nova” do próximo turno, determinam o fim da jornada de trabalho dos motoristas e operadores de máquinas.

A Fig. 3.4 mostra a sequência das operações na área industrial.

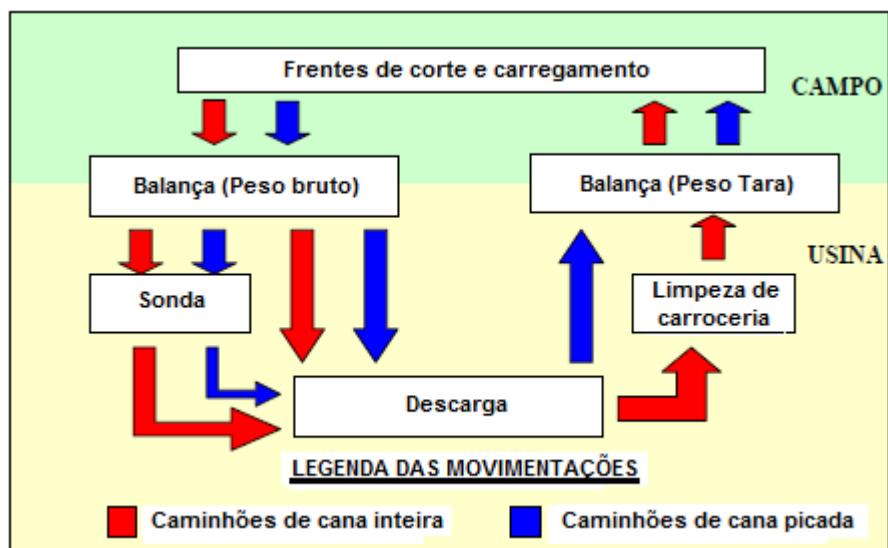


Figura 3.4 – Sequenciamento de operações na indústria (Fonte: Silva, 2006)

A etapa industrial se inicia com a pesagem e análise da cana-de-açúcar para fins de pagamento do fornecedor pelo sistema CONSECANA (Pagamento de Cana pelo Teor de Açúcares Totais Recuperáveis - ATR) ou para fins de controle dos rendimentos industriais. Em seguida a cana-de-açúcar passa diretamente para a mesa alimentadora ou vai para o estoque de cana-de-açúcar, onde posteriormente é levada até a mesa alimentadora. Em seguida, são realizados todos os processos industriais necessários para a produção dos produtos e subprodutos provenientes da cana-de-açúcar. Os produtos e subprodutos são comercializados ou destinados para armazenagem. O tipo de estoque pode ser próprio ou terceirizado. A Fig. 3.5 mostra as moendas de uma usina, seu conjunto de ternos e cana-de-açúcar moída.

Como exemplo da etapa industrial de uma usina, a Fig. 3.6 apresenta o fluxograma que define toda a etapa industrial de produção de açúcar, álcool, melaço e subprodutos. É possível visualizar as macroperdas envolvidas na produção de açúcar e álcool (perdas na água de lavagem, no bagaço, na torta, na fermentação, na vinhaça e perdas indeterminadas), assim como o local onde estas perdas ocorrem. Os pontos TS 1, TS 2, TM, SJM, 1-SJM referem-se ao local onde as mudanças de processo podem acontecer, ou seja, aos desvios de fluxo dos produtos semiacabados no processo. Estes desvios fazem com que os diversos tipos de açúcares, méis e alcoóis sejam produzidos por uma combinação de

processos, envolvendo estes e outros parâmetros que devem ser considerados na modelagem.



Figura 3.5 - As moendas de uma usina, seu conjunto de ternos e cana-de-açúcar moída (Fonte: Acervo pessoal da autora)

O surgimento e a difusão de tecnologias têm direcionado firmas agroindustriais brasileiras para a automatização, gerenciamento da logística, inovação de seus produtos e estrutura organizacional e diversificação produtiva e mercadológica. Empresas agroindustriais sucroalcooleiras entraram em um processo de reorganização de suas estruturas produtivas para enfrentar o aumento da competição entre mercados, setores e elos de suas cadeias produtivas (MAPA, 2012).

Segundo Corrêa e Ganesi (1993) *apud* Silva (2006), a capacidade de responder rápido e bem às mudanças ambientais é essencial ao bom desempenho das organizações. O desenvolvimento de metodologias que possam auxiliar nas decisões frente às mudanças, confere maior segurança na adoção das escolhas necessárias.

Para auxiliar a tomada de decisão uma das opções é empregar a simulação computacional. Esta técnica permite a análise dinâmica da interação entre os elementos do sistema. No setor sucroalcooleiro a simulação tem sido utilizada para investigar novas estratégias gerenciais e equipamentos, a um custo relativamente baixo para as usinas.

Silva (2006) afirma que a simulação visando atingir os objetivos de desempenho (qualidade, custo, confiabilidade, rapidez e flexibilidade) do sistema de corte, carregamento e transporte (CCT) permite a avaliação comparativa de sistemas retratando cenários reais sem a necessidade de implementá-los.

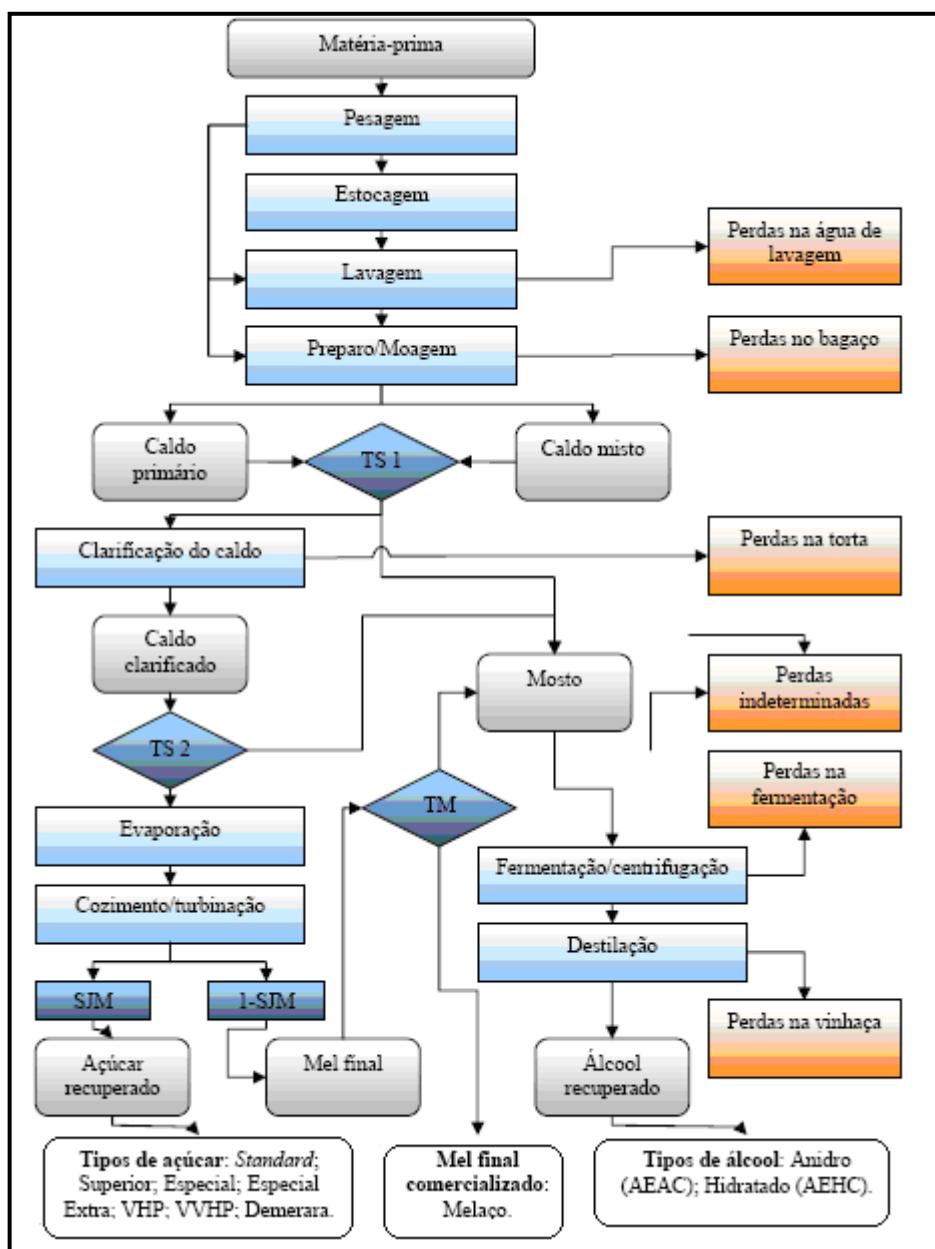


Figura 3.6 - Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço (Fonte: Paiva, 2006)

CAPÍTULO IV

REVISÃO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

A otimização consiste em utilizar a representação de um sistema real através do uso de lógica e de ferramentas matemáticas, de forma que as melhores condições de operação do sistema possam ser determinadas. Se existem n decisões a serem adotadas então se associam a cada decisão uma variável designada variável de decisão. Para expressar a medida de desempenho do modelo, deve-se associar uma função numérica com as variáveis de decisão denominada função objetivo. As limitações de recursos envolvidos no sistema são demonstradas pelo uso de equações ou inequações chamadas restrições do modelo, podendo tanto ser de natureza quantitativa quanto de natureza lógica.

É comum classificar os modelos de programação matemática em subcategorias. A primeira diferenciação que pode ser estabelecida é quanto à formulação utilizada, classificando-os da seguinte forma: modelos de programação linear (PL), caso particular dos modelos de programação matemática em que as variáveis são contínuas e apresentam comportamento linear, tanto em relação às restrições quanto à função objetivo; modelos de programação não-linear (PNL), caracterizados por apresentarem qualquer tipo de não-linearidade, seja na função objetivo ou em qualquer de suas restrições; modelos de programação inteira (PI), que apresentam variáveis que não podem assumir valores contínuos, ficando condicionados a assumir valores discretos. Além disso, é possível ter modelos que são uma combinação das classes acima descritas, como por exemplo: modelos de programação linear inteira mista (PIM), quando são utilizadas variáveis inteiras e contínuas em um mesmo modelo linear.

Os modelos matemáticos ainda podem ser caracterizados pelas seguintes dicotomias: determinístico x probabilístico; restrito x irrestrito; monocritério x multicritério; contínuo x discreto; unidecisor x multidecisor; univariável x multivariável; linear x não-linear; uniobjetivo x multiobjetivo. Assim, constitui-se uma imensa variedade de modelos possíveis de serem implementados, dependendo apenas das características do sistema que está sendo

modelado. Maiores detalhes com relação às características dos modelos matemáticos podem ser encontrados no estudo realizado por Brandão (2010).

Os modelos determinísticos aplicados ao planejamento e controle da produção (PCP) são as mais tradicionais ferramentas utilizadas da Pesquisa Operacional (PO). Dentre estes modelos destacam-se os que utilizam programação linear (PL), devido à sua adequação a vários problemas práticos e à possibilidade de conversão de modelos não lineares em lineares, e modelos que utilizam programação linear inteira mista (PIM) devido à utilização de variáveis inteiras e contínuas num mesmo modelo linear.

A modelagem de um sistema pode ser utilizada como auxílio à tomada de decisão. Assim, torna-se indispensável identificar a capacidade operacional dos equipamentos do processo em estudo.

Nesta pesquisa, desenvolveu-se uma modelagem tanto para representar o transporte de cana-de-açúcar das fontes de fornecimento até a(s) usina(s) de açúcar e álcool quanto para a representação do planejamento agregado da produção da usina de açúcar e álcool com capacidade para ser aplicado a usinas com diferentes configurações e dimensões. Ou seja, o modelo pode ser adaptado de acordo com a necessidade do usuário para análise de estudos diversos de uma usina de açúcar e álcool.

4.1. Programação Linear

Programação Linear (PL) é uma ferramenta da Pesquisa Operacional (PO) aplicada à solução de problemas que tem como objetivo a otimização de um sistema linear em estudo. De acordo com Arenales et al. (2007), embora esta técnica já tivesse sido proposta há mais tempo, o ano de 1947 foi um marco na área de otimização, quando o método simplex foi publicado, seguindo-se intensas pesquisas de novos métodos e aplicações nas mais diversas áreas.

Os problemas de Programação Linear, segundo Costa (2003), referem-se à distribuição eficiente de recursos limitados entre atividades competitivas, com a finalidade de atender a um determinado objetivo, por exemplo, maximização de lucros ou minimização de custos. Em se tratando de Programação Linear, esse objetivo será expresso por uma função linear, a qual se denomina função objetivo.

Nos problemas de Programação Linear é necessário também definir as limitações, exigências e condições a serem obedecidas, que serão fornecidas por equações ou inequações lineares, uma para cada recurso. Ao conjunto dessas equações e/ou

inequações dá-se o nome de restrições do modelo. As restrições do modelo determinam uma região à qual denominamos de conjunto das soluções viáveis.

Normalmente têm-se um elevado número de maneiras para distribuir os recursos escassos entre diversas atividades em estudo, bastando para com isso que essas distribuições estejam coerentes com as restrições do modelo. No entanto, o que se busca, num problema PL, é a melhor das soluções viáveis, que maximiza ou minimiza a função objetivo, e denomina-se solução ótima.

De acordo com Bertsimas e Tsitsiklis (1997) e Silva Júnior (2008), um PPL tem um vetor custo, apresentado por:

$$c = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

E procura-se minimizar uma função custo linear (também chamada de função objetivo), definida como:

$$F(x) = c^T x = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (4.2)$$

Sobre todos os vetores n -dimensionais, representado por:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Sujeitos a um conjunto de restrições lineares de igualdade e desigualdade.

Sejam M_1 , M_2 e M_3 conjuntos finitos de índices, e considere que para todo i em qualquer um desses conjuntos, é dado um vetor a_i no R^n e um escalar b_i , que será usado para formar a i -ésima restrição. Sejam N_1 e N_2 subconjuntos de $N = \{1, 2, \dots, n\}$. Considere o problema apresentado pelas Eq. (4.4) e (4.5).

$$\text{Minimizar } c^T x \quad (4.4)$$

$$\text{Sujeito a } \begin{cases} \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} \geq b_i, i \in M_1, \\ \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} \leq b_i, i \in M_2, \\ \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} = b_i, i \in M_3, \\ x_j \geq 0, j \in N_1, \\ x_j \leq 0, j \in N_2. \end{cases} \quad (4.5)$$

As variáveis x_1, x_2, \dots, x_n são chamadas variáveis de decisão, e o vetor \mathbf{x} satisfazendo todas as restrições é chamado de solução viável ou vetor viável. O conjunto de todas as soluções viáveis é chamado de conjunto viável ou região viável. Se $j \notin N$ então se diz que x_j é uma variável livre ou não-restrita.

A função $c^T \mathbf{x}$ é chamada de função objetivo ou função custo. A solução viável \mathbf{x}^* que minimiza a função objetivo, isto é, a solução que forneça $c^T \mathbf{x}^* \leq c^T \mathbf{x}$ para todo \mathbf{x} viável, é chamada de solução viável ótima, ou simplesmente, uma solução ótima e o valor de $c^T \mathbf{x}^*$ é chamado de custo ótimo. Por outro lado, se para todo número real $K \in \mathbb{R}$ for possível achar uma solução viável \mathbf{x} cujo custo seja menor do que K , então diz que o custo ótimo é $-\infty$ ou que é ilimitado inferiormente. Deve-se notar que não existe necessidade de estudar problemas de maximização separadamente, visto que minimizar uma função custo $F(\mathbf{x}) = c^T \mathbf{x}$ é equivalente a minimizar a função custo $G(\mathbf{x}) = -c^T \mathbf{x}$.

O desenvolvimento de um método (ou algoritmo) que determine a solução de um PPL torna necessária a redução do problema a uma forma tal que permita a aplicação direta deste algoritmo. No caso, para a solução de um PPL o algoritmo mais utilizado é o Simplex, cuja aplicação necessita reduzir o PPL à sua forma padrão.

Diz-se que o modelo de um PPL encontra-se na Forma Padrão quando ele é formulado da seguinte forma:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i & \text{onde } b_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j \geq 0 & \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n c_j x_j = F(\mathbf{x}) & \rightarrow \quad MÍN! \end{cases} \quad (4.6)$$

Os dois primeiros conjuntos de equações normalmente são denominados restrições do PPL, sendo o segundo chamado de condição de não-negatividade, enquanto a última equação representa a função objetivo.

A programação linear é uma poderosa ferramenta de planejamento e vem sendo largamente utilizada em todo o mundo (BERGER et al., 2003).

Muitos problemas de administração e economia tratam da alocação de recursos limitados – dinheiro, pessoal, materiais, máquinas, espaço, tempo – tendo em vista maximizar algum índice de desempenho ou minimizar alguma medida de custo. As técnicas matemáticas para planejar tais alocações constituem a programação matemática. O caso particular no qual o índice de desempenho ou o de custo é uma função linear e as restrições sobre a disponibilidade ou utilização de recursos são expressáveis como equações ou desigualdades lineares, é denominado de “programação linear” (BERGER et al., 2003).

4.1.1. Método Simplex

Segundo Bregalda et al. (1988) e Bertsimas e Tsitsiklis (1997), o Simplex é um algoritmo que utiliza, fundamentalmente, o ferramental da Álgebra Linear. É baseado em um algoritmo de buscas, isto é, não se encontra diretamente a solução ótima, mas determinam-se soluções viáveis, cada vez melhores, até que, depois de certo número de iterações, seja encontrada a ótima. A solução ótima é encontrada movendo-se de um vértice a outro da região viável, sempre numa direção que reduza o custo.

A seguir é desenvolvido o Método Simplex introduzido por George Bernard Dantzig, destacando suas particularidades, e a necessidade de artifícios e de manipulações algébricas para a solução do método.

Seja um PPL na forma padrão, de acordo com:

$$\text{minimizar } c^T x \quad (4.7)$$

sujeito a

$$\begin{cases} Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

A Eq. (4.8) também pode ser representada por:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1s}x_s + \dots + a_{1n}x_n + x_{n+1} = b_1 \\ \dots \dots + \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{r1}x_1 + \dots + a_{rs}x_s + \dots + a_{rn}x_n + x_{n+r} = b_r \\ \dots \dots + \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{ms}x_s + \dots + a_{mn}x_n + x_{n+m} = b_m \\ c_1x_1 + \dots + c_sx_s + \dots + c_nx_n = Q(x) \rightarrow \text{MÍN!} \\ x_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, n+m) \end{cases} \quad (4.9)$$

Podem-se representar as m primeiras equações e a função objetivo através do seguinte quadro ou *tableau*:

Quadro 4.1. *Tableau* do Método Simplex

x_1	...	x_s	...	x_n	x_{n+1}	...	x_{n+r}	...	x_{n+m}	$ \underline{b}$
a_{11}	...	a_{1s}	...	a_{1n}	...	1	...	0	...	0
...
a_{r1}	...	a_{rs}	...	a_m	...	0	...	1	...	0
a_{m1}	...	a_{ms}	...	a_{mn}	...	0	...	0	...	1
c_1	...	c_s	...	c_n	...	0	...	0	...	0
										$ Q(x)$

É assumido que a matriz A tem dimensão $m \times n$ e que suas linhas são linearmente independentes (LI).

Seja n_0 o número total de variáveis do sistema apresentado pelas Eq. (4.9), incluindo também as variáveis de folga. Isto é, $n_0 = n + m$.

Tem-se m vetores coluna LI, referentes às variáveis de folga $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$.

Uma solução do sistema consiste em atribuir arbitrariamente valores a $n_0 - m = n$ variáveis, determinando, a seguir, os valores para as m variáveis restantes. É exatamente isto que será feito, pois se está interessado em uma Solução Básica Viável. Precisa-se, portanto, impor condições adicionais, quais sejam:

- as n variáveis arbitradas são as Variáveis Não Básicas (VNB), sendo-lhes atribuído o valor zero;
- as m variáveis restantes, determinadas com auxílio do sistema $Ax = b$, são as Variáveis Básicas (VB). As VNB devem ser escolhidas de maneira a termos VB não negativas;
- os vetores coluna a_i associados às VB devem ser LI, de modo a constituírem uma base associada à matriz A .

Cumpridas as condições acima, gera-se sempre uma solução básica viável. O Simplex consiste, portanto, em um conjunto de regras, de forma que sejam respeitadas as condições mencionadas, mais a quarta regra:

- as soluções básicas viáveis são geradas no sentido de otimizar a função objetivo.

Passo 1. Solução básica viável inicial x^* .

Seja o PPL (4.8), reduzido à forma padrão e representado pelo Quadro (4.1). Considera-se VNB as primeiras n variáveis, atribuindo-lhes o valor zero. O sistema de

equações pode, então, ser resolvido diretamente, pois já se encontra na forma escalonada. Assim, tem-se que:

$$\begin{aligned} \text{VNB} \rightarrow x_1^* &= x_2^* = \cdots = x_s^* = \cdots = x_n^* = 0 \\ \text{VB} \rightarrow x_{n+1}^* &= b_1, \cdots, x_{n+r}^* = b_r, \cdots, x_{n+m}^* = b_m. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Pode-se verificar que a solução x^* , respeitando as condições a), b) e c), constitui realmente uma solução básica viável, ou seja, um vértice.

Passo 2. É possível uma solução melhor? Em caso afirmativo, escolher nova VB.

Uma vez obtida a solução básica viável x^* , o próximo passo é gerar uma nova solução básica viável melhor que x^* .

Uma nova solução implica necessariamente em ao menos uma nova VB, bem como na transformação de uma VB em VNB. Isto é, procura-se atribuir um valor positivo a uma das variáveis x_1, \dots, x_n , de forma a anular uma das variáveis $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m}$. Evidentemente, esta transformação alterará o valor da função objetivo. Veja a seguir o que acontece, observando a função objetivo representada no Quadro (4.1). A Eq. (4.11) exibe a solução básica viável inicial x^* :

$$Q(x^*) = c_1 x_1^* + \cdots + c_s x_s^* + \cdots + c_n x_n^* + 0x_{n+1}^* + \cdots + 0x_{n+r}^* + \cdots + 0x_{n+m}^*. \quad (4.11)$$

Como $x_1^* = x_2^* = \cdots = x_s^* = \cdots = x_n^* = 0$, tem-se $Q(x^*) = 0$.

Suponha, agora, uma nova solução básica viável x , tal que x_s seja a nova VB. Mantém todas as demais VNB, isto é, $x_i = x_i^* = 0$ para $i = 1, \dots, s-1, s+1, \dots, n$. Observando a expressão usada para calcular $Q(x^*)$, observa-se que, para a nova solução básica viável x , tem $Q(x) = c_s x_s$. Resulta, então, $Q(x) - Q(x^*) = c_s x_s$.

Esta análise permite-nos estabelecer uma regra para a escolha da nova VB. Como se deseja minimizar $Q(x)$ deve-se escolher x_s tal que $c_s < 0$. Neste caso, a função objetivo diminuirá da quantidade $c_s x_s$. Caso exista mais de um coeficiente negativo da função objetivo, parece lógico escolher x_s tal que:

$$c_s = \min_{i|c_i < 0} (c_i). \quad (4.12)$$

Não existindo coeficiente negativo, isto é, $c_i \geq 0 \quad \forall i$, então torna-se impossível diminuir o valor da função objetivo. Logo, $Q(x^*)$ representa o mínimo, ou seja, x^* é solução ótima do PPL.

Seja $c_i \geq 0 \quad \forall i$. Suponha que exista ao menos uma VNB x_s tal que $c_s = 0$. Então, fazendo x_s VB, isto é, atribuindo-lhe um valor não negativo, gera-se uma nova solução básica viável x , onde $Q(x) = Q(x^*)$. Tem, portanto, mais de uma solução ótima, o que, significa que possui uma infinidade de soluções ótimas.

Passo 3. Atribuição de valor à nova VB – determinação da nova VNB.

Seja a nova solução básica viável x , onde tornamos x_s nova VB, mantendo as demais VNB $x_i = x_i^* = 0$ para $i = 1, \dots, s-1, s+1, \dots, n$. Deve-se determinar a alteração no valor das demais VB. Fazendo $x_s \geq 0$, obtém-se:

$$x_{n+i} = b_i - a_{is}x_s \quad \forall i \in K \quad (4.13)$$

onde $K = \{1, 2, \dots, m\}$

Para chegar à nova solução básica viável, deve-se também respeitar as condições de não negatividade apresentada na Eq. (4.14). Logo:

$$b_i - a_{is}x_s \geq 0 \quad \forall i \in K. \quad (4.14)$$

Dois casos são possíveis, exibidos pelas Eq. (4.15) e (4.16):

$$i) \quad a_{is} \leq 0 \quad \forall i \in K \quad (4.15)$$

Neste caso as condições de não negatividade serão respeitadas para qualquer valor não negativo de x_s . Fazendo $x_s \rightarrow \infty$, tem-se $Q(x) \rightarrow -\infty$, pois, de acordo com o Passo 2, sabe-se que $c_s < 0$. Isto significa que $Q(x)$ não tem mínimo finito, isto é, a determinação da solução ótima do PPL é impossível.

ii) Existe ao menos um $a_{is} > 0$

$$\text{Seja } K^+ = \{i | i \in K, \quad a_{is} > 0\}. \quad (4.16)$$

Como para $a_{is} \leq 0$, a condição de não negatividade para x_{n+i} é automaticamente respeitada, basta considerar as Eq. (4.17) e (4.18):

$$b_i - a_{is}x_s \geq 0 \text{ para } i \in K^+. \quad (4.17)$$

$$\text{Isto é: } x_s \leq \frac{b_i}{a_{is}} \text{ para } i \in K^+. \quad (4.18)$$

Por outro lado, precisa-se anular alguma variável x_{n+i} , tornando-a VNB, o que será conseguido fazendo $x_s = b_i / a_{is}$ para algum $i \in K^+$. Como deve considerar as condições de não negatividade, faz-se de tal forma que:

$$x_s = \frac{b_r}{a_{rs}} = \min_{i \in K^+} (b_i / a_{is}). \quad (4.19)$$

Assim, garante de um lado que sejam respeitadas as condições de não negatividade e por outro, uma nova VNB x_{n+r} .

Basta, agora, verificar se é possível substituir o vetor a_{n+r} , que sai da base (x_{n+r} torna-se VNB), pelo vetor a_s , que entra na base (x_s é a nova VB). Definido, assim, pela Eq. (4.20):

$$a_s = \sum_{i=1}^m a_{is} a_{n+i}. \quad (4.20)$$

Como $a_{rs} > 0$, pode-se fazer a substituição. a_{rs} recebe a denominação de Pivô, a r -ésima linha é a linha Pivô, enquanto a s -ésima coluna é denominada Coluna Pivô.

Passo 4. Pivoteamento – redução à forma canônica.

Analizando o raciocínio feito nos Passos 2 e 3, verifica-se que houve notável simplificação devido à forma especial em que o PPL se encontra. Em particular:

i) são nulos os coeficientes das VB na função objetivo. Este fato permitiu a verificação imediata da alteração no valor da função objetivo pela introdução da nova VB x_s (Passo 2). A alteração da demais VB x_{n+1}, \dots, x_{n+m} não se refletia sobre $Q(x)$ pelo fato de serem nulos os coeficientes destas VB na função objetivo;

ii) a base deve estar na forma canônica, ou seja, deve ser igual a uma matriz identidade.

Observando o Quadro (4.1), é possível verificar que a base referente à solução básica viável x^* é uma matriz identidade. Esta forma especial permitiu constatar diretamente como a introdução de uma nova VB x_s se refletia sobre as demais VB x_{n+1}, \dots, x_{n+m} . Foi isto que determinou a escolha do pivô (Passo 3).

Neste caso, considera-se que a base está na forma canônica, o que, na verdade, significa a aplicação do método de Gauss-Jordan na determinação dos valores das VB.

Generalizando o conceito, diz-se que o PPL está na forma canônica, quando são respeitadas as condições expressas em i) e ii).

Observa-se que, para passar de uma solução básica viável inicial x^* a uma nova solução básica viável x , é importante que o PPL esteja na forma canônica. Se pretende continuar o processo iterativo, isto é, a partir de x gerar uma nova solução melhor ainda, precisa manter a forma canônica. Isto se dá através das operações de pivoteamento, discriminadas a seguir com referência ao Quadro (4.1).

i) Dividir a linha pivô pelo pivô a_{rs} .

ii) Anular todos os demais elementos da coluna-pivô. Isto poderá ser feito subtraindo da i -ésima linha ($i = 1, 2, \dots, r-1, r+1, \dots, m, m+1$) a nova linha-pivô, multiplicada, respectivamente, por $a_{1s}, a_{2s}, \dots, a_{r-1,s}, a_{r+1,s}, \dots, a_{ms}, c_s$.

Em síntese, o que faz nas operações de pivoteamento é reduzir o vetor a_s , que entra na base, a um vetor unitário, substituindo assim o vetor a_{n+r} que sai da base. Além disso, anula-se o coeficiente de x_s (nova VB) na função objetivo.

Realizadas as operações de pivoteamento, obtém-se o Quadro (4.2).

Quadro 4.2 – Operações de pivoteamento no *Tableau* do Simplex

$$\left| \begin{array}{ccccccc|c}
 x_1 & \dots & x_s & \dots & x_n & x_{n+1} & \dots & x_{n+m} \\
 a_{11} & -\frac{a_{r1}a_{1s}}{a_{rs}} & \dots 0 & \dots & a_{1n} & -\frac{a_m a_{1s}}{a_{rs}} & 1 & \dots & -\frac{a_{1s}}{a_{rs}} & \dots 0 \\
 & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 & \frac{a_{r1}}{a_{rs}} & \dots 1 & \dots & \frac{a_m}{a_{rs}} & 0 & \dots & \frac{1}{a_{rs}} & \dots 0 \\
 & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 a_{m1} & -\frac{a_{r1}a_{ms}}{a_{rs}} & \dots 0 & \dots & a_{mn} & -\frac{a_m a_{ms}}{a_{rs}} & 0 & \dots & -\frac{a_{ms}}{a_{rs}} & \dots 1 \\
 & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 c_1 & -\frac{a_{r1}c_s}{a_{rs}} & \dots 0 & \dots & c_n & -\frac{a_m c_s}{a_{rs}} & 0 & \dots & -\frac{c_s}{a_{rs}} & \dots 0 \\
 & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\
 \end{array} \right| \quad (4.2)$$

Para a nova solução básica viável x , conseguiu-se, portanto, reduzir o PPL à forma canônica, utilizando as operações de pivotamento. Basta fazer uma troca de colunas (coluna $n+r$ pela coluna s) para que o novo quadro assuma forma semelhante ao Quadro (4.1).

Como descrito, o algoritmo Simplex foi aqui desenvolvido, considerando a primeira iteração. Isto é, a partir da solução básica viável inicial x^* , gerou-se uma nova solução x . Na verdade, o algoritmo não termina neste ponto. Novas soluções básicas viáveis ainda melhores serão geradas, até que seja determinada a solução ótima. Uma vez feito o pivotamento no Passo 4, deve-se voltar ao Passo 2, procurando uma solução melhor. O algoritmo pára, quando isto se torna impossível, o que significa já ter encontrado a solução ótima ou determinado que não existe solução ótima finita.

4.2. Modelo de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes

O modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes (SPDL) combina problema de dimensionamento de lotes com as decisões de programação da produção. Consiste em um problema monoestágio, multiproduto e que combina decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

A principal suposição deste tipo de modelo é que em um período de análise só poderá ser usado um lote, ou seja, tem-se um modelo de produção *tudo ou nada* (ou *Small Bucket*). Logo, ocorre apenas custo de preparação (ou custo de *setup*) quando for iniciada a produção de um novo lote.

Considera-se o dimensionamento de lotes de processos de produção, que podem produzir vários produtos ao mesmo tempo. Esta consideração permite utilizar este tipo de modelo para representar a produção de empresas que possuam processos com produção simultânea de múltiplos produtos, como é o caso das usinas de açúcar e álcool.

Considera-se também que o custo de preparação de processos é nulo. Seguindo estas considerações e de acordo com Paiva (2006), apresenta-se um modelo para tratar lotes de processos sem custo de preparação, denominado modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes (SPDL):

$$\max Z = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J_t} \sum_{i=1}^n (r_{it} a_{ij} - c_{jt}) x_{jt} - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n h_{it} l_{it} \quad (4.21)$$

Sujeito a

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \left(\sum_{j=1}^{J_i} a_{ij} x_{jt} \right) - D_{it} \quad \forall i, t \quad (4.22)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} x_{jt} \leq 1 \quad \forall t \quad (4.23)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, I_{it} \geq 0 \quad \forall j, i, t \quad (4.24)$$

A simbologia adotada neste modelo, utilizada nas Eq. de (4.21) a (4.24) está descrita a seguir:

Parâmetros

a_{ij} – Quantidade do produto i produzido pelo processo j ;

c_{jt} – Custo de utilizar o processo j no período t ;

D_{it} – Demanda do produto i no período t ;

h_{it} – Custo de estocar o produto i no período t ;

r_{it} – Receita obtida na venda do produto i no período t ;

Variáveis

Z – Função objetivo de contribuição ao lucro na produção total em todos os períodos;

x_{jt} – Variável binária que determina a utilização ($x_{jt}=1$), ou não ($x_{jt}=0$), do processo j no período t ;

I_{it} – Variável de estoque do produto i no período t .

Neste modelo, a equação (4.21) maximiza a margem de contribuição ao lucro em todos os períodos t analisados, de acordo com a produção de i gerada pela escolha dos processos j ; a restrição (4.22) faz o balanceamento de estoque, produção e demanda de cada produto i em cada período t ; a inequação (4.23) indica a utilização de apenas um processo por período t , visto que x_{jt} é um valor binário; e a equação (4.24) define o domínio das variáveis de seleção de processos (x_{jt}) e da variável de estoque (I_{it}).

4.3. Considerações Importantes

Uma vez obtido o modelo linear (ou modelo do problema), que é constituído pela função objetivo e pelas restrições, a programação linear se encarrega de encontrar a solução ótima, que pode ser tanto a maximização do lucro como a minimização de custos.

O modelo tem fundamental importância na determinação da quantidade e tipos de veículos necessários para o transporte da cana-de-açúcar, quantidade da moagem semanal, dos processos produtivos e da política de atendimento da demanda, de forma que a margem de contribuição da empresa seja maximizada e as restrições de disponibilidade de matéria prima, de transporte, de capacidade produtiva e de estoque sejam consideradas.

É natural o desejo de se obter um modelo que auxilie de forma completa na produção de uma usina, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises feitas, fornecendo parâmetros para uma melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema e propiciando uma análise quantitativa que pode apoiar o planejamento de safra e as decisões estratégicas da empresa.

A contribuição desta pesquisa propondo uma modelagem para este complexo problema é apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO V

MODELAGEM DA ETAPA DE TRANSPORTE E INDUSTRIAL

Como visto anteriormente, nesta pesquisa pretende-se solucionar o problema de otimização da etapa de transporte (da etapa de CCT) e o planejamento agregado da produção na indústria sucroalcooleira utilizando-se o código computacional desenvolvido pelo grupo de pesquisa e o *toolbox* Linprog do Matlab. Dessa forma, o modelo de simulação desenvolvido contempla a modelagem das principais decisões envolvidas no planejamento e controle da produção (PCP) de uma usina de açúcar e álcool e a sua utilização como ferramenta gerencial para a determinação do dimensionamento ótimo da frota própria e terceirizada de veículos de forma a auxiliar a geração de planos de transporte e produção eficazes para o período de safra de usinas de açúcar e álcool.

A agroindústria sucroalcooleira nacional mostra-se, historicamente, competitiva, sempre em busca de alternativas, inovações e melhorias, tanto em relação à produtividade quanto à qualidade dos produtos. Esta pesquisa visa contribuir com mais uma opção de ferramenta de trabalho na busca por incrementos nos parâmetros de produtividade e eficiência visando melhoria e aperfeiçoamento da indústria canavieira.

Segundo Slack (1997) *apud* Mundim (2009), a atividade de programação da produção é uma das mais complexas tarefas no gerenciamento da produção. Os programadores têm que lidar com tipos diferentes de recursos simultaneamente. As máquinas têm diferentes capacidades e funções e os operadores diferentes habilidades. De maneira mais importante, o número de programações cresce rapidamente à medida que o número de atividades e processos aumenta. A tarefa de programação da produção deve ser repetida frequentemente para permitir respostas às variações de mercado e às mudanças do mix de produtos. Pequenas alterações no mix de produtos podem fazer com que os recursos limitadores de capacidade dentro das instalações mudem bastante em um tempo curto, assim, gargalos podem mover-se pela fábrica rapidamente.

Os modelos devem fornecer informações úteis que permitam a análise das opções mais apropriadas ao sistema estudado, com a finalidade de alcançar a minimização de custos e a maximização da produção e qualidade.

O problema é abordado por meio de programação matemática usando conceitos de seleção de processos de produção e dimensionamento de lotes para a etapa industrial.

A pesquisa utiliza a abordagem de pesquisa quantitativa, pois está centrado na criação de um modelo quantitativo de planejamento da operação de transportes e do planejamento agregado da produção. A metodologia adotada para estudar esta abordagem é típica de Pesquisa Operacional (PO), e pode ser resumida pelo modelo proposto por Law e Kelton (1991) *apud* Paiva (2006):

- (a) Conceitualização: consiste na interpretação da realidade, ou partes dela, em um modelo conceitual;
- (b) Coleta de dados: consiste na obtenção de valores dos parâmetros que são necessários para utilizar o modelo;
- (c) Modelagem: representação do modelo conceitual por um modelo científico;
- (d) Experimento: processo de obtenção de uma solução para o modelo científico;
- (e) Validação: verificar se o modelo científico corresponde à realidade ou ao recorte da realidade considerado;
- (f) Documentação e *feedback*: análise e documentação da coerência entre a solução obtida e o modelo conceitual.

5.1. Etapa Transporte

A modelagem de um sistema tem como função o auxílio à tomada de decisão. Assim, torna-se necessário identificar a capacidade operacional dos equipamentos do processo em estudo, bem como os níveis de serviço.

Nível de serviço pode ser entendido, conforme Gualda (1995), como sendo a qualidade do serviço oferecido e, no caso desta pesquisa, pode ser exemplificado pelo cumprimento do transporte de forma ininterrupta, entregando de maneira contínua cana-de-açúcar para moagem na usina.

Nesta pesquisa a modelagem tem capacidade para ser aplicada a usinas com diferentes configurações e dimensões, ou seja, é adaptável à necessidade de avaliação para estudos diversos onde o número de frentes de corte e de usinas, tipo de transporte, tipo de estoque, produtos fabricados e o período de análise deve ser considerada de acordo

com a necessidade do usuário. A pesquisa buscou assegurar o fornecimento da cana-de-açúcar na usina para atendimento da moagem diária.

O objetivo é apoiar as principais decisões envolvidas no planejamento da frota de veículos de uma usina de açúcar e álcool de forma a auxiliar a geração de planos de produção eficazes para o período de safra.

Segundo Leite (1992) *apud* Berger et al. (2003), a distância é um dos fatores que mais afetam o custo de transporte e este varia de acordo com a localização da empresa em relação às áreas de produção.

Nesta pesquisa, os parâmetros de chegadas dos veículos nas frentes de corte e na(s) usina(s), o tempo de espera nas frentes de corte para carregamento e descarregamento na(s) usina(s) da cana-de-açúcar e a formação de fila foram desconsideradas. Com essas premissas, utilizou-se da programação linear e não do método da Teoria das Filas.

O principal objetivo é minimizar o custo, que constitui a função objetivo. Os demais objetivos são considerados como restrições, sendo estes: o número de veículos disponível, a capacidade de moagem diária da usina e a quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte.

5.1.1. Parâmetros Gerais de Entrada

O modelo matemático desenvolvido considera o sistema de transporte da cana-de-açúcar para pc usinas e n frentes de corte.

Nesta pesquisa foram consideradas as composições de frota do tipo Romeu e Julieta, Treminhão e Rodotrem. Porém o modelo pode ser estendido para simular quantos e quais tipos de composições forem necessários.

O caminhão Romeu e Julieta transporta em média 25 toneladas e transporta a maior parte da cana-de-açúcar inteira da usina, além de parte da cana-de-açúcar picada. O Treminhão é composto de “cavalo” e três reboques acoplados, e carrega em média 45 toneladas de cana-de-açúcar picada. O terceiro tipo de caminhão é o Rodotrem que carrega em média 65 toneladas de cana-de-açúcar picada.

Considerou-se que os três tipos de veículos podem trafegar 24 horas por dia, ou seja, não há restrição de horário para circulação dos veículos.

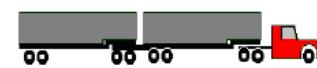
Pode ser que ocorra um estoque temporário no pátio das usinas em determinados períodos ao longo do dia, porém considera-se que toda a cana-de-açúcar colhida seja moída no mesmo dia.

A jornada de trabalho em usinas de açúcar é de 24 horas/dia. Os turnos de trabalho dos operadores e motoristas são estabelecidos levando-se em conta as restrições legais - adoção de três turnos, com oito horas de duração cada um.

Tempo de carga e descarga é o tempo médio para carregamento e descarga da composição. Os motoristas utilizam desse tempo para realizarem eventuais necessidades, inclusive suas refeições. De acordo com informações obtidas com o gerente agrícola da usina visitada, pelo fato das operações de carregamento e descarregamento serem realizadas por sistemas mecânicos, pode-se considerar que a média para estas operações é de 36 toneladas de cana-de-açúcar por hora.

Dessa forma, considerou-se que o tempo de carga e descarga para o caminhão Romeu e Julieta é em média 0.70 horas, que o Treminhão leva em média 1.25 horas para realizar a carga e descarga e que o caminhão do tipo Rodotrem gasta em média 1.80 horas. A Tab. 5.1 apresenta as principais características operacionais das composições consideradas na pesquisa.

Tabela 5.1 - Características operacionais das composições consideradas para o transporte da cana-de-açúcar

Composição	Capacidade de transporte (ton)	Tempo de carga e descarga (horas)	Capacidade de carga e descarga (ton/hora)
Romeu e Julieta 	25	0.70	35,71
Treminhão 	45	1.25	36,00
Rodotrem 	65	1.80	36,11

Tempo de parada corresponde ao tempo diário gasto em possíveis paradas para abastecimento, manutenção do veículo, etc. Considerou-se tempo de parada total de 2 horas. Dessa forma, o tempo útil de trabalho do veículo por dia é de 22 horas.

Para o estabelecimento da velocidade média adotada para as composições vai depender se estes trafegam em rodovias pavimentadas e/ou não pavimentadas, e da velocidade que os caminhões conseguem desempenhar vazios e carregados.

Considerou-se que cada veículo atende a uma única frente de corte por ciclo. Ou seja, um ciclo é composto de quatro etapas ou tempos (desconsiderando-se o tempo de espera): tempo de percurso vazio (tempo gasto entre a saída da usina e a chegada à frente de corte), tempo de carregamento (tempo gasto no local de carregamento), tempo de percurso carregado (tempo gasto para retorno da frente de corte até a usina), e tempo de descarregamento (tempo gasto para descarregamento na usina).

No cálculo dos custos de transporte utilizou-se como referência para os cálculos de custo o Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas da NTC - Associação Nacional do Transporte de Cargas (NTC, 2001).

Custos de transferência correspondem às despesas do transporte de cargas entre dois terminais, ou entre origem e destino. No caso, refere-se à transferência da cana-de-açúcar entre as frentes de corte *i* e as usinas *j*. Divide-se em custos fixos e custos variáveis.

Os custos fixos referem-se às despesas operacionais do veículo que não variam com a distância percorrida, isto é, continuam existindo, mesmo com o veículo parado. Geralmente, são calculados por mês. O custo fixo de operação do veículo é composto das seguintes parcelas: Remuneração mensal do capital empatado (RC); Salário do motorista (SM); Salário de ajudante(s) (SA); Salário do pessoal de oficina (SO); Reposição do veículo (RV); Reposição do equipamento (RE); Licenciamento (LC); Seguro do veículo (SV); Seguro do equipamento (SE); Seguro de responsabilidade civil facultativo (RCF); e Peças, acessórios e material de manutenção (PM).

Os custos variáveis correspondem às despesas que variam com a distância percorrida pelo veículo, ou seja, que inexistem caso o veículo permaneça parado. O custo variável do veículo é composto das seguintes parcelas: Despesas com combustível (DC); Lubrificantes (LB); Lavagem e graxas (LG); e Pneus e recauchutagens (PR).

Para o cálculo dos custos da frota terceirizada utilizou-se como referência planilhas de fretes da Central de Custos e Preços de Transportes, do Portal Guia do Transportador (GUIADOTRC, 2010). Para o caso em estudo, também foram consideradas as composições de frota do tipo Romeu e Julieta, Treminhão e Rodotrem. Além disso, para estabelecer o custo adotou-se que estes veículos poderiam percorrer até 1000 km por dia.

5.1.2. Cálculo do Custo Fixo da Frota Própria (CFT)

O custo fixo de operação do veículo é composto das seguintes parcelas:

- RC = Remuneração mensal do capital empatado;
- SM = Salário do motorista;
- SA = Salário de ajudante(s);
- SO = Salário do pessoal de oficina;
- RV = Reposição do veículo;
- RE = Reposição do equipamento;
- LC = Licenciamento;
- SV = Seguro do veículo;
- SE = Seguro do equipamento;
- RCF = Seguro de responsabilidade civil facultativo;

- PM = Peças, acessórios e material de manutenção.

Para este cálculo devem ser fornecidos os seguintes dados:

- SM1 = Valor do salário do motorista;
- SA1 = Valor do salário do ajudante(s);
- SO1 = Valor dos salários do pessoal da oficina;
- ncf = relação entre o número de caminhões e o número de funcionários do setor.

Este valor varia com a classe do veículo. Para caminhões pesados, $ncf = 3$;

▪ VV = Vida Útil do Veículo (em meses). Obs.: A atual planilha NTC admite como vida útil o valor de 84 meses para a classificação dos caminhões pesados;

▪ VE = Vida Útil do Equipamento (em meses). Obs.: A atual planilha NTC admite como vida útil o valor de 66 meses para a classificação dos caminhões pesados;

- DPVAT = Seguro por danos pessoais causados por veículos automotores;

- TL = Taxa de licenciamento paga ao DETRAN;

▪ Rodoar = É um sistema de calibragem utilizado em veículos que possuem compressor de ar. Pode ser usado com o veículo em movimento;

- VA = Custo da apólice;

- IOF = Imposto sobre Operações Financeiras;

▪ CSIS = Coeficiente Sem Importância Segurada. Obs.: Varia com o tipo de utilização do veículo e do equipamento;

▪ SRCF = Seguro de Responsabilidade Civil Facultativo = PRDP + PRDM = Prêmio relativo a danos pessoais e relativo a danos materiais;

- VP = Preço de cada pneu novo;

▪ IPVA = Imposto sobre a propriedade de veículos automotores: $IPVA = 0.01 * VVC$;

- NP = Número de pneus (veículo + equipamento): $NP = NPV + NPE$;

- VTP = Valor total dos pneus: $VTP = NP * VP$;

▪ VVZQ = Valor do Veículo Zero Quilômetro sem Pneus. Obs.: Os preços fornecidos pelos fabricantes de caminhões incluem os pneus. É necessário, portanto, subtrair o valor dos pneus antes de realizar o cálculo. Logo, $VVZQ = VVC - (NPV * VP)$;

▪ VEZQ = Valor do Equipamento (reboque) "Zero Quilômetro" sem Pneus. Obs.: Os preços fornecidos pelos fabricantes de caminhões excluem os pneus. Portanto, não é necessário subtrair o valor dos pneus antes de realizar o cálculo. Assim, $VEZQ = NE * VEZQ$.

Assim, o cálculo do Custo Fixo será dado pelas seguintes parcelas:

a) *Salário do Motorista (SM)* - Considerando apenas um motorista por veículo (não tem motorista apoio), tem-se:

$$SM = 1.(1,9614.SM1) \quad (5.1)$$

O valor 1,9614 refere-se ao índice considerado na planilha de custos para os encargos trabalhistas, e o valor 1 refere-se à consideração de apenas um motorista por veículo.

b) Salário do(s) Ajudante(s)(SA) - Considerando apenas 1 ajudante, obtém-se:

$$SA = 1.(1,9614.SA1) \quad (5.2)$$

O valor 1,9614 refere-se ao índice considerado na planilha de custos para os encargos trabalhistas, e o valor 1 refere-se à consideração de apenas um ajudante por veículo.

c) Salário do Pessoal de Oficina (SO)

$$SO = \frac{1,9614.SO1}{ncf} \quad (5.3)$$

O valor 1,9614 refere-se ao índice considerado na planilha de custos para os encargos trabalhistas.

d) Remuneração Mensal do Capital (RC)

$$RC = \frac{0,13.VVC}{12} \quad (5.4)$$

e) Reposição de Veículo (RV)

$$RV = \frac{0,80.VVZQ}{VV} \quad (5.5)$$

f) Reposição de Equipamento (Reboque) (RE)

$$RE = \frac{0,95.VEZQ1}{VE} \quad (5.6)$$

g) *Licenciamento (LC)*

$$LC = \frac{DPVAT + IPVA + TL}{12} \quad (5.7)$$

h) *Seguro Total (ST)* - Considera-se o seguro do veículo e do equipamento.

$$ST = \frac{(((VVC + RODOAR).CS/S) + VA).IOF}{12} \quad (5.8)$$

i) *Seguro de Responsabilidade Civil Facultativo (RCF)*

$$RCF = \frac{(SRCF + VA).IOF}{12} \quad (5.9)$$

j) *Peças, Acessórios e Material de Manutenção (PM)*

$$PM = 0,01.(VVC - VTP) \quad (5.10)$$

Assim, o Custo Fixo Total (CFT) será:

$$CFT(R\$/mês) = RC + SM + SA + SO + RV + RE + LC + ST + RCF + PM \quad (5.11)$$

5.1.3. Cálculo do Custo Variável da Frota Própria (CVT)

O custo variável do veículo é composto das seguintes parcelas:

- DC = Despesas com combustível;
- LB = Lubrificantes;
- LG = Lavagem e graxas;
- PR = Pneus e recauchutagens.

Para este cálculo devem ser fornecidos os seguintes dados:

- PCdiesel = Preço do combustível (R\$/litro);
- PLM = Preço unitário do lubrificante do motor (R\$/litro);
- QM = Quilometragem de troca de óleo do motor;
- VR = Taxa de reposição (litros/1000 km);
- VD = Capacidade da caixa e diferencial de transmissão (litros);
- VCC = Capacidade do câmbio (litros);

- PLT = Preço unitário do lubrificante da transmissão (R\$/litro);
- QT = Quilometragem de troca de óleo da transmissão;
- QL = Quilometragem recomendada pelo fabricante do veículo para lavagem periódica;
- PCN = Preço da câmara nova;
- PP = Preço do protetor novo;
- R = Preço da recauchutagem ou recapagem;
- VUP = Vida útil total do pneu, incluindo-se uma recauchutagem.

Utilizando estes dados, o cálculo do Custo Variável é obtido considerando:

a) *Combustível (DC)*

$$DC = \frac{PC_{diesel}}{RM} \quad (5.12)$$

b) *Lubrificantes (LB)* - Considera-se os lubrificantes do motor (LM) e da transmissão (LT).

Logo,

$$LM = \frac{(VOLC + VR).PLM}{QM} \quad (5.13)$$

e

$$LT = \frac{PLT.VD}{QT} \quad (5.14)$$

Assim, tem-se:

$$LB = LM + LT \quad (5.15)$$

c) *Lavagem e Graxas (LG)*

$$LG = \frac{PLC}{QL} \quad (5.16)$$

d) Pneus e Recauchutagem (PR)

$$PR = \frac{(1.2.(VP + PCN + PP)).NP + (R.NP)}{VUP} \quad (5.17)$$

Finalmente, o Custo Variável Total (CVT) será:

$$CVT(R\$/km) = DC + LB + LG + PR \quad (5.18)$$

5.1.4. Formulação Problema de Otimização – Etapa Transporte

Na formulação do problema de otimização considerou-se a seguinte função objetivo que visa minimizar o custo de transporte:

$$\begin{aligned} f(x) = & \sum_{j=1}^{nTVp^*lu} \left(\frac{2D_j CVT_k}{CVk_k} \right) x_j + \sum_{j=(nTVt^*lu)+1}^{(nTVt^*lu)^*mod} \left(2D_j CFRTER_k \right) x_j + \\ & + \sum_{j=(nTVp^*lu)^*mod+1}^{(nTV^*lu)+(nTVp^*lu)+1} \left(\frac{CFT_k}{30} + 2D_j CVT_k \right) x_j + \\ & + \sum_{j=(nTV^*lu)+(nTVt^*lu)+mod}^{(nTV^*lu)+(nTVt^*lu)^*mod+mod} \left(2D_j CVk_k CFRTER_k \right) x_j \end{aligned} \quad (5.19)$$

Sujeita a

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + \dots + x_{pc} &= rco_1 \\ x_{pc+1} + x_{pc+2} + \dots + x_{2*pc} &= rco_2 \\ &\vdots \\ x_{(n-1)*pc+1} + x_{(n-1)*pc+2} + \dots + x_{n*pc} &= rco_n \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} x_1 + x_{1+pc} + \dots + x_{1+(n-1)*pc} &= rmco_1 \\ x_2 + x_{2+pc} + \dots + x_{2+(n-1)*pc} &= rmco_2 \\ &\vdots \\ x_{pc} + x_{2*pc} + \dots + x_{n*pc} &= rmco_{pc} \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned}
 & x_{(n^*pc)+1} + x_{(n^*pc)+2} + \cdots + x_{(n^*pc)+pc} \leq NVk_1 \\
 & x_{(n^*pc)+pc+1} + x_{(n^*pc)+pc+2} + \cdots + x_{(n^*pc)+2*pc} \leq NVk_2 \\
 & \vdots \\
 & x_{(n^*pc)+(n-1)*pc+1} + x_{(n^*pc)+(n-1)*pc+2} + \cdots + x_{2*n^*pc} \leq NVk_n
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

A Eq. 5.19 representa a função objetivo do problema de otimização, onde deseja-se minimizar o custo de transporte das demandas de cana-de-açúcar das frentes de corte i para as usinas j . Observe que foi considerado o percurso de ida e volta do veículo, ou seja, a distância total a ser percorrida da usina até a frente de corte e seu retorno à usina ($2 D_j$). Além disso, o custo fixo total dos veículos próprios é calculado em R\$/dia (por isso seu valor é dividido por 30). As Eq. 5.20 e 5.21 referem-se às restrições de colheita nas frentes de corte e de moagem nas usinas, respectivamente. A soma das demandas de cana-de-açúcar em cada frente de corte tem que ser igual à quantidade de cana-de-açúcar colhida na mesma, e a soma de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte que abastecem determinada usina deve ser igual à sua capacidade de moagem. A Eq. 5.22 representa a restrição do número máximo de veículos disponível para cada tipo de veículo próprio e terceirizado para realizar o transporte da demanda de cana-de-açúcar das frentes de corte i para as usinas j . Ou seja, a soma do número de veículos necessário para realizar o transporte da demanda de cana-de-açúcar em cada frente de corte tem que ser menor ou igual à capacidade de transporte do número total de veículos disponível para essa frente de corte.

A notação adotada neste modelo (Eq. 5.19 a 5.22) está descrita a seguir:

- pc - número de usinas i ;
- n - número de frentes de corte j ;
- lu - número de possibilidades de transporte (combinação entre usinas i e frentes de corte j);
- D_j - distância da frente de corte i até a usina j (km);
- x_{ij} - demanda (t) de cana-de-açúcar e número de veículos que realiza o transporte entre frente de corte i para a usina j ;
- nTV - corresponde ao número total de tipos de veículos considerados na modelagem;
- $nTVp$ - corresponde ao número de tipos de veículos próprios considerados na modelagem;
- $nTVt$ - corresponde ao número de tipos de veículos terceirizados considerados na modelagem;
- CFT_k - custo Fixo Total para o veículo tipo k (R\$/mês);
- CVT_k - custo Variável Total para o veículo tipo k (R\$/km);

- $CFRTER_k$ - valor do Frete Terceirizado para o veículo tipo k (R\$/ton*km);
- NV_k - número máximo de veículos disponível para o transporte da cana-de-açúcar considerando a frente de corte 1 e as usinas 1, 2 e 3, a frente de corte 2 e as usinas 1, 2 e 3, e etc;
- CV_k - capacidade do veículo tipo k (t/viagem);
- rco_i - restrições de disponibilidade de colheita nas frentes de corte i (ton/dia);
- rmo_j - restrições de capacidade de moagem nas usinas j (ton/dia);
- mod - tipo de modelagem considerada no problema de otimização. Se $mod = 1$, o problema considera como variáveis de projeto apenas quantidade de cana-de-açúcar a ser transportada. Se $mod = 2$, considera-se como variáveis de projeto a quantidade de cana-de-açúcar a ser transportada e o número de veículos necessários para realizar o transporte.

Uma contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de um código computacional, interativo com o usuário, que permite realizar simulações numéricas utilizando o modelo matemático desenvolvido para o transporte e testar diversos cenários de interesse do administrador da usina.

5.2. Etapa Industrial

Na definição das equações aqui apresentadas, utilizou-se como referência a pesquisa de Paiva (2006), Paiva (2009), Silva (2009), as recomendações do sistema CONSECANA (CONSECANA, 2012) e as orientações dos gerentes da usina considerada no estudo de caso desta pesquisa.

Para aplicação desta formulação em outra usina pode-se haver necessidade de adaptação de algumas considerações para a realidade de operação da mesma.

Esta pesquisa procura fazer uma análise do planejamento agregado de safra, tendo como horizonte o período de safra (médio prazo). Nesta análise, o foco é o *trade-off* entre aproveitamento do potencial da matéria-prima, cumprimento das exigências dos contratos de venda e aproveitamento das oportunidades do mercado. Estes pontos são analisados juntamente com as restrições de disponibilidade de matéria-prima, capacidade produtiva, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e intolerância ao atraso nos pedidos, procurando com isso atingir uma melhor margem de contribuição para a empresa e que sejam respeitadas as restrições impostas ao problema.

A agregação proposta nesta pesquisa está relacionada com a associação temporal dos parâmetros de entrada do modelo e a condição de cooptação dos insumos produtivos.

O modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes (SPDL) foi utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento deste modelo de planejamento agregado da produção. Porém, na modelagem apresentada nesta pesquisa considera que o gerente industrial institui o processo a partir do estabelecimento da matriz de produção que deseja ou considera como ideal. Ou seja, não ocorre a seleção do processo a ser utilizado para a produção dos produtos finais. Dessa forma, os parâmetros do processo adotado são pré-estabelecidos pelo gerente industrial de acordo com os produtos fabricados pela usina de açúcar e álcool. Assim, trata-se de um problema monoestágio, multiproduto e que combina decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

A suposição fundamental deste tipo de modelo é que em um período de análise só poderá ser utilizado um lote, ou seja, tem-se um modelo de produção *tudo ou nada* em períodos de análise semanais. Logo, só ocorre custo de preparação (ou custo de *setup*) quando a produção de um novo lote for iniciada. Entende-se que o tempo de *setup* é de segunda ordem em relação ao período de análise e, desta forma, pode ser desconsiderado.

A consideração de produção *tudo ou nada* se refere à necessidade de um período considerável de tempo para que o processo produtivo atinja índices de produtividade elevados; sendo assim, um grande número de trocas de processos durante um período menor que uma semana pode acarretar em perda de eficiência e, consequentemente, perda de rentabilidade da empresa. Portanto, utilizamos um, e somente um processo produtivo em toda a semana.

Quanto à formulação linear considerada no modelo, foram desconsideradas possíveis não linearidades nos custos de produção (por exemplo, quanto maior a qualidade da cana-de-açúcar fornecida, menores são os custos dos produtos químicos) e nos rendimentos dos processos (por exemplo, quanto maior a qualidade da cana-de-açúcar fornecida, maiores são os rendimentos dos processos). Neste modelo, considerou-se que os parâmetros de rendimento e os custos de produção podem ser admitidos como lineares para o nível de análise desejado.

É importante ressaltar, também, que os custos considerados no modelo proposto são custos variáveis e as receitas são valores líquidos, ou seja, foram desconsiderados impostos e custos de comercialização. Esta consideração está relacionada ao tipo de análise gerencial que está sendo feita. Num modelo deste tipo, os custos fixos, os impostos e os custos de comercialização não são influenciados pelo conjunto de decisões que o modelo pretende auxiliar. Portanto, segundo Paiva (2009), pode-se utilizar esta simplificação e retirar estes valores da análise.

O modelo matemático pretende determinar a moagem semanal (XK_{pt}) de forma que a margem de contribuição agroindustrial (etapa agrícola, CCT e industrial) seja maximizada e

as restrições de mercado, previsão de safra, capacidade de transporte das frotas, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e produção *tudo ou nada* sejam respeitadas. Este modelo é denominado como modelo de Determinação de Processo e Dimensionamento de Lotes aplicado ao Planejamento agregado da produção em Usinas de açúcar e álcool (DPDL/PU).

O modelo DPDL/PU considera a produção de $p = 1, \dots, P$ produtos, por meio de $k = 1$ processo, $m = 1, \dots, M$ fontes de suprimento de matéria prima, $s = 1, \dots, S$ tipos de transporte da matéria prima, $e = 1, \dots, E$ tipos de estoque, em todos os $t = 1, \dots, T$ períodos. No total tem-se $\{[m + m + s + p + (p \cdot e)] \cdot t\}$ variáveis.

Na formulação do problema de otimização considerou-se a seguinte função objetivo que visa maximizar a margem de contribuição agroindustrial:

$$\max F = Fr - Fc \quad (5.23)$$

Sendo,

$$Fr = \sum_t \left(\sum_{ps} VPS_{ps,t} \left(\frac{RIS_{ps,t}}{1000} \right) XK_{ps,t} \right) + \sum_t \left(\sum_{ph} VPH_{ph,t} \left(\frac{RIH_{ph,t}}{1000} \right) XK_{ph,t} \right) + \sum_t \left(\sum_{pa} VPA_{pa,t} \left(\frac{RIA_{pa,t}}{1000} \right) XK_{pa,t} \right) \quad (5.24)$$

e

$$Fc = \sum_t \left[\sum_m MCA_{mt} XC_{mt} + \sum_s CCCT_{st} XT_{st} + \sum_p MCI_{kt} XK_{pt} + \sum_p \sum_e CE_{pet} XE_{pet} + \sum_p \sum_e PU_{pe} XE_{p,e,t-1} \right] \quad (5.25)$$

A Eq. (5.23) apresenta a função objetivo que procura maximizar a margem de contribuição agroindustrial de produção dos produtos p , da matéria prima m , do tipo de transporte da matéria prima s e do tipo de estoque e , em todos os períodos t .

Equação (5.24) representa o cálculo da receita obtida pela venda de cada produto p , gerado pelo processo k , em cada período t , enquanto a Eq. (5.25) representa a somatória do custo de obtenção da matéria prima m (MCA_{mt}), com o custo de transporte da matéria prima s ($CCCT_{st}$), com o custo de utilização do processo k (MCI_{kt}), com o custo de estocagem de cada produto p produzido em cada tipo de estoque e (CE_{pet}), tudo isso computado em todos os períodos t e a penalização pela utilização do produto p em cada tipo de estoque e (PU_{pe}) no último período de análise t , ou seja, em $t-1$. Este parâmetro representa o custo de estocagem dos produtos na entressafra.

A notação adotada nas Eq. (5.23) a (5.25) é descrita a seguir:

- F – Função Objetivo.
- F_c – Função Custo.
- F_r – Função Receita.
- pa – Subconjunto de produtos da destilaria (AEHC, AEAC).
- ph – Subconjunto de resíduos da usina (Melaço).
- ps – Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar (Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara).
- $VPA_{pa,t}$ – Valor líquido do produto pa (álcool), em cada período t (u.m./ton ou m^3).
- $VPH_{ph,t}$ – Valor líquido do produto ph (melaço), em cada período t (u.m./ton ou m^3).
- $VPS_{ps,t}$ – Valor líquido do produto ps (açúcar), em cada período t (u.m./ton ou m^3).
- $RIA_{pa,k,t}$ - Rendimento industrial obtido na produção do álcool pa , pelo processo k , no período t .
 - $RIH_{ph,k,t}$ - Rendimento industrial obtido na produção do melaço ph , pelo processo k , no período t .
 - $RIS_{ps,k,t}$ - Rendimento industrial obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t .
 - $XK_{pa,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar por processo por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar processada pelo processo k para os produzir os produtos pa no período t .
 - $XK_{ph,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar por processo por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar processada pelo processo k para os produzir os produtos ph no período t .
 - $XK_{ps,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar por processo por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar processada pelo processo k para os produzir os produtos ps no período t .
- t – Períodos de análise: determinados pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar (semana 1, ... semana T). Número total de semanas da safra.
- m – Fonte de Suprimento das matérias primas: determinado de acordo com o tipo de fornecedor da qual a cana-de-açúcar é proveniente: (1) cana-de-açúcar própria; (2) cana-de-açúcar arrendada; (3) cana-de-açúcar de fornecedores; e (4) cana-de-açúcar de acionistas.
- s – Serviços de transporte: determinado de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado (transporte próprio, transporte terceirizado).
- p – Produtos fabricados: produtos que podem ser produzidos pela empresa, tanto na fábrica de açúcar quanto na destilaria de álcool.

- e – Locais de estoque: determinado de acordo com o local onde o estoque está sendo feito (estoque próprio, estoque terceirizado).
- MCA_{mt} – Matriz de custos agrícolas de cada fonte de suprimento de matéria prima m nos períodos t (u.m./ton).
- XC_{mt} - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida por semana (ton/sem). Quantidade obtida em cada fonte de suprimento m no período t .
- $CCCT_{st}$ – Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar pelo tipo de transporte s no período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
- XT_{st} - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar transportada por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar transportada pelo tipo de transporte s no período t .
- MCI_{kt} – Matriz de custos industriais de cada processo k , nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
- XK_{pt} - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar por processo por semana (ton/sem). Quantidade de cana-de-açúcar moída pelo processo k , para os produzir os produtos p , no período t .
- CE_{pet} - Custo variável de estocagem do produto p pelo tipo de estoque e , nos períodos t (u.m./ton ou m^3).
- XE_{pet} - Variável de estoque (ton ou m^3 /sem). Quantidade estocada no período t do produto p , pelo estoque tipo e .
- PU_{pe} – Penalização pelo uso do produto p pelo tipo de estoque e , na entressafra (u.m./ton ou m^3).
- $XE_{p,e,t-1}$ - Variável de estoque (ton ou m^3 /sem). Quantidade estocada no período $t-1$ do produto p , pelo estoque tipo e .

5.2.1. Função Receita da Etapa Industrial

Para o cálculo da Eq. (5.24), que define o total da receita, torna-se necessário a obtenção de vários parâmetros que serão mostrados a seguir:

Etapa 1: Para a obtenção dos valores líquidos de cada produto em cada período, deve-se executar as seguintes operações:

$$VPA_{pa,t} = \sum_{pa} VPD_{pa,t} \quad (5.26)$$

$$VPH_{ph,t} = \sum_{ph} VPD_{ph,t} \quad (5.27)$$

$$VPS_{ps,t} = \sum_{ps} VPD_{ps,t} \quad (5.28)$$

$$VPD_{pt} = VPA_{pa,t} + VPH_{ph,t} + VPS_{ps,t} \quad (5.29)$$

Sendo,

- $VPA_{pa,t}$ – Valor líquido do produto pa , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do álcool.
- $VPH_{ph,t}$ – Valor líquido do produto ph , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do melaço.
- $VPS_{ps,t}$ – Valor líquido do produto ps , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do açúcar.
- VPD_{pt} - valor líquido do produto p , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Este é o valor de mercado de cada produto.

Etapa 2: Para o cálculo do rendimento industrial obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t , será adotado o seguinte procedimento:

$$PUS_k = \frac{POS_k}{\left(1 - \frac{UMS_k}{100}\right)} \quad (5.30)$$

A Eq. (5.30) calcula a pureza dos açúcares produzidos (PUS_k) pelo processo k (%). A pureza do açúcar é um parâmetro determinante para a geração dos processos. Esta equação é obtida por meio de uma equação que relaciona a definição de pureza (POS_k/BH_k) e uma equação que determina o brix de cristais de açúcar ($BH_k = 1 - UMS_k$). A divisão por 100 é apenas a conversão de dados percentuais para valores unitários.

$$PUCD_t = PUC_t - 1 \quad (5.31)$$

A Eq. (5.31) calcula a pureza do caldo misto ($PUCD_t$) em cada semana t (%). Esta é uma fórmula empírica utilizada no setor para relacionar a pureza do caldo bruto da cana-de-açúcar (PUC_t) e o caldo extraído pela moenda e que está misturado com água ($PUCD_t$). Esta redução de pureza se deve à adição de água no processo de moagem (processo chamado de embebição).

$$RECS_{kt} = \frac{PUS_k \cdot (PUCD_t - MPUH)}{PUCD_t \cdot (PUS_k - MPUH)} \quad (5.32)$$

A Eq. (5.32) realiza o cálculo da recuperação de açúcares pelo processo k e em cada período t (%). Este parâmetro indica a quantidade de açúcar que será recuperada do xarope proveniente do processo de evaporação e a quantidade de melaço que será gerada. Esta equação é deduzida por meio de um balanço de *brix* utilizando o processo de cozimento da fábrica de açúcar como fronteira de controle.

$$RIS_{ps,k,t} = 10 \cdot POC_t \left(\frac{ESA_t}{100} \right) \cdot RECS_{kt} \cdot DECD_k \cdot MAS_{ps,k} \quad (5.33)$$

A Eq. (5.33) determina o rendimento industrial obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t .

Sendo,

- POS_k - polarização dos açúcares produzidos pelo processo k ($^{\circ}Z$). Parâmetro referente à qualidade do açúcar que se pretende produzir.
- UMS_k - umidade dos açúcares produzidos pelo processo k (%). Parâmetro referente à qualidade do açúcar que se pretende produzir.
- PUC_t - pureza da cana-de-açúcar em cada semana t (%). Este parâmetro se refere à qualidade da cana-de-açúcar que está sendo fornecida.
- $MPUH$ - meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%).
- POC_t - Pol da cana-de-açúcar em cada semana t (%). Varia com o tempo de safra.

Este parâmetro se refere à qualidade da cana-de-açúcar que está sendo fornecida.

- ESA_t - Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool (%). Varia com o tempo de safra. Entende-se por parte comum de produção as operações de Pesagem, Estocagem, Lavagem, Moagem e Clarificação do caldo, gerando um índice de eficiência que representa as perdas ocorridas na Lavagem, no Bagaço, na Torta e as Indeterminadas.
- $DECD_k$ - Determinação do desvio de caldo para a fábrica pelo processo k (valor unitarizado).
- $MAS_{ps,k}$ - Matriz auxiliar de determinação dos açúcares ps produzidos pelo processo k (valor unitarizado).

Etapa 3: Para o cálculo do rendimento industrial obtido na produção do melaço ph , pelo processo k , no período t , será adotado o seguinte procedimento:

$$SAH_k = \frac{BH_k \cdot MPUH_k}{100} \quad (5.34)$$

A Eq. (5.34) determina a quantidade de sacarose existente no melaço (%). Esta equação é apenas uma aplicação direta da definição de pureza de um fluido (PU = POS/BH), em que a *pol* do melaço foi definida como SAH_k , o *brix* do melaço foi definido como BH e a pureza do melaço foi definida como $MPUH$. A divisão por 100 é apenas a conversão para valores percentuais.

$$RIH_{ph,k,t} = \frac{100 \cdot POC_t \cdot ESA_t \cdot (1 - RECS_{kt}) \cdot DECD_k \cdot (1 - DEH_k)}{10 \cdot SAH_k} \quad (5.35)$$

A Eq. (5.35) determina o rendimento industrial obtido na produção do melaço ph , pelo processo k , na semana t . Esta equação é complementar à Eq. (5.33) para os casos em que $DEH_k = 0$. A partir dos valores obtidos, temos a quantidade de melaço ph (valores em kg) que será produzida por qualquer processo k em qualquer período t . Propiciando a geração de parâmetros de produção do melaço.

Sendo,

- BH_k - *brix* do mel final adotado pela fábrica ($^{\circ}$ brix).
- $MPUH_k$ - meta de pureza do mel final adotada pela fábrica (%).
- DEH_k - desvio de melaço para a destilaria pelo processo k (valor unitarizado).

Etapa 4: Para o cálculo do rendimento industrial obtido na produção do álcool pa , pelo processo k , no período t , será adotado o seguinte procedimento:

$$RECA_{pa,t} = \frac{REA_{pa} \cdot EFA_t}{100} \quad (5.36)$$

A Eq. (5.36) determina a recuperação teórica da destilaria para os álcoois pa , em cada semana t (%). A recuperação teórica é o valor de rendimento obtido em condições ideais descontado das perdas ocorridas no processo de produção.

$$RIA_{pa,k,t} = (Z_1 + Z_2) MDA_{pa,k} \quad (5.37)$$

Definindo,

$$Z_1 = \left(\frac{ESA_t}{10} \right) \left(\frac{RECA_{pa,t}}{100} \right) \left(\frac{POC_t}{0,95} \cdot (1 - RECS_{kt}) + AR_t \right) (DECD_k) (DEH_k) \quad (5.38)$$

$$Z_2 = \left(\frac{POC_t}{0,95} + AR_t \right) (1 - DECD_k) \quad (5.39)$$

A Eq. (5.37) determina o rendimento industrial obtido na produção do álcool *pa*, pelo processo *k*, no período *t*. Nesta equação, tem-se a quantidade de álcool *pa* (valores em litros) que será produzida por qualquer processo *k* em qualquer período *t*, propiciando a geração de parâmetros de produção dos álcoois. O valor 0,95 que aparece na equação representa a conversão da sacarose em açúcares redutores (AR), por meio da hidrólise da molécula de sacarose em glicose e frutose.

Sendo,

- REA_{pa} - rendimento estequiométrico dos álcoois *pa* que se pretende produzir (1/100 kg ART). Parâmetro referente ao tipo de álcool que se pretende produzir;
- EFA_t - eficiência de fermentação/centrifugação e destilação na produção de álcool (%). Este parâmetro representa as perdas ocorridas na destilaria de álcool durante as etapas de Fermentação e Destilação.
- AR_t - açúcares redutores contidos na cana-de-açúcar em cada semana *t* (%). Este parâmetro se refere à qualidade da cana-de-açúcar que está sendo fornecida;
- $MDA_{pa,k}$ - matriz de determinação dos álcoois *pa* produzidos pelo processo *k* (valor unitarizado);

Etapa 5: Para o cálculo da matriz de rendimentos industriais de cada produto *p*, pelo processo *k*, nos períodos *t* (ton ou m³), será utilizada a seguinte equação:

$$MRI_{pkt} = \left(\frac{RIS_{ps,k,t}}{1000}, \frac{RIH_{ph,k,t}}{1000}, \frac{RIA_{pa,k,t}}{1000} \right) \quad (5.40)$$

5.2.2. Função Custo da Etapa Industrial

Para o cálculo da Eq. (5.25), que define a função custo, torna-se necessário a obtenção de vários parâmetros que serão mostrados a seguir:

Etapa 1: Para a obtenção do custo agrícola da cana-de-açúcar própria em cada período *t*, deve-se executar as seguintes operações:

$$VC_t = PATR_t \cdot ATRC_t \quad (5.41)$$

A Eq. (5.41) calcula o valor da cana-de-açúcar para cada período t (u.m./ton cana-de-açúcar).

$$MCA1_t = VC_t + AVC1 \quad (5.42)$$

Equação (5.42) determina o custo agrícola da cana-de-açúcar própria em cada período t .

Sendo,

- $ATRC_t$ - ATR padrão para a cana-de-açúcar (kg/ton).
- $PATR_t$ - preço do ATR no período de fornecimento (u.m./kg).
- $AVC1$ - acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar própria (u.m./ton cana-de-açúcar).

Etapa 2: Para a obtenção do custo agrícola da cana-de-açúcar arrendada em cada período t , deve-se executar as seguintes operações:

$$VCA_t = PATR_t \cdot ATRCA \quad (5.43)$$

A Eq. (5.43) calcula o valor da cana-de-açúcar arrendada para cada período t (u.m./ton cana-de-açúcar).

$$MCA2_t = VC_t + AVC2 + \left(\frac{(VCA_t \cdot CA)}{PRA2_t} \right) \quad (5.44)$$

Equação (5.44) determina o custo agrícola da cana-de-açúcar arrendada em cada período t .

Sendo,

- $ATRCA$ - ATR padrão para a cana-de-açúcar arrendada (kg/ton).
- $AVC2$ - acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar arrendada (u.m./ton cana-de-açúcar).
- CA - custo de arrendamento (ton de cana-de-açúcar/ha). Média dos contratos de todas as fazendas arrendadas no período.

- $PRA2_t$ - produtividade agrícola da cana-de-açúcar arrendada em cada período t (ton/ha).

Etapa 3: Para a obtenção do custo agrícola da cana-de-açúcar dos fornecedores em cada período t , deve-se executar a seguinte operação:

$$MCA3_t = VC_t + AVC3 \quad (5.45)$$

Sendo,

- $AVC3$ - acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar dos fornecedores (u.m./ton cana-de-açúcar).

Etapa 4: Para a obtenção do custo agrícola da cana-de-açúcar dos acionistas em cada período t , deve-se executar a seguinte operação:

$$MCA4_t = VC_t + AVC4 \quad (5.46)$$

Sendo,

- $AVC4$ - acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana-de-açúcar dos acionistas (u.m./ton cana-de-açúcar).

Etapa 5: Para a obtenção da matriz de custos agrícolas de cada fonte de suprimento de matéria prima m , nos períodos t , deve-se realizar a seguinte equação:

$$MCA_{mt} = MCA1_t + MCA2_t + MCA3_t + MCA4_t \quad (5.47)$$

Sendo,

- MCA_{mt} - Matriz de custos agrícolas de cada fonte de suprimento de matéria prima m nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

Etapa 6: Para a obtenção do custo variável de corte, carregamento e transporte pelo tipo s no período t , deve-se realizar a seguinte operação:

$$CCCT_{st} = CCCT_{fpt} + CCCT_{ftt} \quad (5.48)$$

Sendo,

- $CCCT_{st}$ - Custo variável de corte, carregamento e transporte pelo tipo s no período t (u.m./ton).
- $CCCT_{fpt}$ - Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar pela frota própria no período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).
- $CCCT_{ftt}$ - Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar pela frota terceirizada no período t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

Etapa 7: Para a obtenção do parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente, pelo processo k e durante cada período t , deve-se realizar a seguinte operação:

$$CSSE_{ps,k,t} = RIS_{ps,k,t} \cdot \left(\frac{POS_k}{100} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{UMS_k}{100} \right) \right) \cdot MAS_{ps,k} \quad (5.49)$$

Equação (5.49) representa a conversão de todos os açúcares produzidos em sacarose pura (kg de sacarose).

Sendo,

- $MAS_{ps,k}$ - matriz auxiliar de determinação dos açúcares ps produzidos pelo processo k (valor unitarizado).

Os parâmetros POS_k , UMS_k e $MAS_{ps,k}$ são utilizados sempre em conjunto para determinar as características do tipo de açúcar ps produzido pelo processo k .

Etapa 8: Para a obtenção do parâmetro de conversão do melaço ph em ART equivalente, pelo processo k e durante cada período t , deve-se realizar a seguinte operação:

$$CHART_{ph,k,t} = \left(\frac{RIH_{ph,k,t} \cdot (SAH_k / 100)}{0,95} \right) + \left(RIH_{ph,k,t} \right) \left(\frac{ARH}{100} \right) \quad (5.50)$$

A Eq. (5.50) representa a conversão do melaço produzido em ART (kg ART).

Sendo,

- ARH - parâmetro que é o valor padrão que determina a quantidade de AR presente no melaço. Açúcares redutores contidos no mel final produzido pelo processo da usina (%).

Na Eq. (5.50), o primeiro termo que está sendo somado representa a conversão da sacarose presente no melaço em ART e o segundo termo representa os açúcares redutores

presentes no melaço (ARH). O valor 0,95 que aparece no numerador do primeiro termo da soma é o valor que converte a sacarose em AR.

Etapa 9: Para a obtenção do parâmetro de conversão de álcoois pa em etanol absoluto, pelo processo k e durante cada período t , deve-se realizar a seguinte operação:

$$CAEA_{pa,k,t} = RIA_{pa,k,t} \cdot FCAEA_{pa} \cdot MDA_{pa,k} \quad (5.51)$$

Equação (5.51) representa a conversão de todos os álcoois produzidos em etanol absoluto (litros de Etanol).

Sendo,

- $FCAEA_{pa}$ - fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (adimensionais).

Parâmetro que é dado de entrada do modelo para cada álcool pa produzido pelos processos k .

Etapa 10: Para a obtenção do valor total do ART produzido pelo processo k e durante todos os períodos t , deve-se realizar a seguinte operação:

$$VART_{kt} = \sum_p \left(\frac{CSSE_{ps,k,t}}{0,95} + CHART_{ph,k,t} + \frac{CAEA_{pa,k,t}}{0,6475} \right) \quad (5.52)$$

Na Eq. (5.48), o valor 0,95 é o valor que converte a sacarose em AR e o valor 0,6475 é o valor que converte etanol absoluto em AR. Valores em: kg ART.

Etapa 11: Para a obtenção da matriz de custos industriais pelo processo k nos períodos t , deve-se realizar a seguinte operação:

$$MCI_{kt} = VART_{kt} \cdot CPART \quad (5.53)$$

Sendo,

- MCI_{kt} - Matriz de custos industriais pelo processo k nos períodos t (u.m./ton de cana-de-açúcar).

- $CPART$ - custo de produção de cada kg de ART nos produtos finais pelo processo da usina (u.m./kg ART).

Etapa 12: Para a obtenção do custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e , deve-se realizar a seguinte operação:

$$CE_{pe} = CE_{pep} + CE_{pet} \quad (5.54)$$

Sendo,

- CE_{pe} - Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e (u.m./ton ou m^3).
- CE_{pep} - Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque próprio (u.m./ton ou m^3);
- CE_{pet} - Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque terceirizado (u.m./ton ou m^3).

Etapa 13: Para a obtenção da penalização pela utilização do estoque e , pelo produto p , na entressafra, deve-se realizar a seguinte operação:

$$PU_{pe} = PU_{pep} + PU_{pet} \quad (5.55)$$

Sendo,

- PU_{pe} - Custo de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e na entressafra (u.m./ton ou m^3).
- PU_{pep} - Custo de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque próprio na entressafra (u.m./ton ou m^3);
- PU_{pet} - Custo de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque terceirizado na entressafra (u.m./ton ou m^3).

5.2.3. Restrições do Problema – Etapa Industrial

A função objetivo apresentada na equação (5.23) está sujeita às seguintes restrições:

$$XD_{mt} \geq 0 \quad (5.56)$$

Sendo,

- XD_{mt} - variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima (ton ou m^3 /sem). Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período t .

$$XC_{mt} \geq 0 \quad (5.57)$$

$$XT_{st} \geq 0 \quad (5.58)$$

$$XK_{pt} \geq 0 \quad (5.59)$$

$$XE_{pet} \geq 0 \quad (5.60)$$

$$\sum_p \left(\frac{RIS_{ps,k,t}}{1000} + \frac{RIH_{ph,k,t}}{1000} + \frac{RIA_{pa,k,t}}{1000} \right) \cdot XK_{pt} - \sum_e XE_{pet} + \sum_e XE_{p,e,t-1} \geq DP_{pt} \quad (5.61)$$

Sendo,

- DP_{pt} – Demanda do produto p em cada período t (ton ou m^3 /sem).

$$\sum_p \left(\frac{RIS_{ps,k,t}}{1000} + \frac{RIH_{ph,k,t}}{1000} + \frac{RIA_{pa,k,t}}{1000} \right) \cdot XK_{pt} - \sum_e XE_{pet} + \sum_e XE_{p,e,t-1} \leq 1,05 \cdot DP_{pt} \quad (5.62)$$

$$\sum_p XK_{pt} \leq 0,95 \cdot \sum_m XC_{mt} \quad (5.63)$$

$$\sum_p XK_{pt} \leq 0,70 \cdot \sum_s XT_{st} \quad (5.64)$$

$$\sum_s XT_{st} \leq \sum_m XC_{mt} \quad (5.65)$$

$$\sum_p \sum_t XK_{pt} \leq 0,75 \cdot \sum_m XD_{m1} \quad (5.66)$$

Sendo,

- XD_{m1} - variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima na primeira semana da safra (ton ou m^3 /sem). Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período 1.

$$XC_{m,t-1} \leq 0,98 \cdot (XD_{m,t} - XD_{m,t-1}) \quad (5.67)$$

Sendo,

- $XC_{m,t-1}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida por semana (ton/sem). Quantidade obtida em cada fonte de suprimento m no período $t-1$.
- $XD_{m,t-1}$ - variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima (ton ou m^3 /sem). Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período $t-1$.

$$\sum_p XK_{pt} \geq \left(MMIC \cdot \frac{TEM_t}{100} \cdot \frac{TAI_t}{100} \right) \quad (5.68)$$

Sendo,

- MMIC – Moagem mínima de cana-de-açúcar (ton/sem).
- TEM_t – Porcentagem de tempo efetivo de moagem durante um período de análise t (%).
- TAI_t – Porcentagem de tempo aproveitado na indústria durante um período de análise t (%).

$$\sum_p XK_{pt} \leq \left(MMAC \cdot \frac{TEM_t}{100} \cdot \frac{TAI_t}{100} \right) \quad (5.69)$$

Sendo,

- MMAC – Moagem máxima de cana-de-açúcar (ton/sem).

$$XE_{pet} \leq CEAT_{pet} \quad (5.70)$$

Sendo,

- $CEAT_{pet}$ – Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques no período t (ton ou m^3).

$$\begin{aligned} & - \sum_p \sum_k ((RIS_{ps,k,t} \cdot VAC_{ps,t} + RIH_{ph,k,t} \cdot VAC_{ph,t} + RIA_{pa,k,t} \cdot VAC_{pa,t}) XK_{pt}) + \\ & + \sum_m MCA_{mt} \cdot XC_{mt} + \sum_s CCCT_{st} \cdot XT_{st} + \sum_p MCI_{kt} \cdot XK_{pt} + \sum_p \sum_e CE_{pe} \cdot XE_{pet} \leq CG_t \end{aligned} \quad (5.71)$$

Sendo,

- $VAC_{ps,t}$ – Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto ps em cada período t (u.m./ton).
- $VAC_{ph,t}$ – Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto ph em cada período t (u.m./ton).
- $VAC_{pa,t}$ – Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto pa em cada período t (u.m./m³).
- CG_t – Capital de giro disponível para cada período t (u.m.).

$$XD_{nt} - XC_{nt} \geq 0 \quad (5.72)$$

$$XC_{fom,t} + XC_{acio,t} \leq PCF_t \left(\sum_p XK_{pt} \right) \quad (5.73)$$

Sendo,

- $XC_{fom,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida dos fornecedores por semana (ton/sem).
- $XC_{acio,t}$ - Variável de decisão da quantidade de cana-de-açúcar colhida dos acionistas por semana (ton/sem).

$$XT_{prop,t} \leq \left(CTFP \left(\frac{DFP_t}{100} \right) \left(\frac{TEM_t}{100} \right) \right) \quad (5.74)$$

Sendo,

- DFP_t – Disponibilidade da frota própria em cada período de análise t (%).
- $CTFP$ – Capacidade de transporte da frota própria (ton/sem).

$$XT_{terc,t} \leq \left(CTFT \left(\frac{DFT_t}{100} \right) \left(\frac{TEM_t}{100} \right) \right)$$

(5.75)

Sendo,

- DFT_t – Disponibilidade da frota terceirizada em cada período de análise t (%).
- $CTFT$ – Capacidade de transporte da frota terceirizada (ton/sem).

Equações (5.56), (5.57), (5.58), (5.59) e (5.60) representam os limites de domínio das variáveis de decisão (restrições de não negatividade) XD_{mt} , XC_{mt} , XT_{st} , XK_{pt} e XE_{pet} deste modelo, respectivamente.

Equações (5.61) e (5.62) representam a restrição de balanceamento de estoque para cada produto p em cada período t .

A restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana-de-açúcar colhida (XC_{mt}) e a quantidade de cana-de-açúcar moída/processada (XK_{pt}) em todos os períodos t da safra é calculada na Eq. (5.63). Da mesma forma, a Eq. (5.64) representa a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana-de-açúcar transportada (XT_{st}) e a quantidade de cana-de-açúcar moída/processada (XK_{pt}), em todos os períodos t da safra.

A Eq. (5.65) também estabelece uma restrição de compatibilidade, porém, entre a quantidade de cana-de-açúcar transportada (XT_{st}) e a quantidade de cana-de-açúcar colhida (XC_{mt}) em todos os períodos t da safra.

A restrição dada pela Eq. (5.66) determina que a cana-de-açúcar disponível no início do primeiro período de análise da safra deve ser inteiramente processada durante a mesma.

Equações (5.67) e (5.72) determinam a disponibilidade de cada tipo de matéria-prima m no início de cada período de análise t .

É interessante notar que a Eq. (5.67) restringe a quantidade de cana-de-açúcar colhida do tipo m em todos os períodos t (XC_{mt}) para um valor menor ou igual à disponibilidade de cana-de-açúcar m no início do período t (XD_{mt}).

A restrição dada pela Eq. (5.68) considera a moagem mínima em cada período t . A quantidade de moagem mínima (MMIC) se deve ao estabelecimento de um balanço térmico adequado para a usina. Assim, a moenda deve fornecer uma quantidade mínima de combustível (bagaço de cana-de-açúcar) para que a usina não tenha problemas de pressão de vapor das caldeiras.

Similarmente, a Eq. (5.69) representa a restrição de moagem máxima em cada período t . A quantidade de moagem máxima (MMAC) se deve à regulagem, estabelecida no início da safra, que considera a abertura e velocidade de rotação dos rolos da moenda.

A restrição de capacidade de estoque para cada produto p em cada tipo de estoque e considerando os diferentes períodos de análise t é exibida na Eq. (5.70).

Equação (5.71) representa a restrição de fluxo de caixa em cada período t . Esta restrição estabelece que a receita líquida deve ser maior ou igual aos custos de produção e de estocagem em cada período t . O lucro líquido é calculado pela adição do adiantamento repassado pela cooperativa para a usina (devido à produção de p em cada período t) com o capital de giro que a empresa está disposta a disponibilizar para cada período t .

Equação (5.73) representa a restrição de quantidade de cana-de-açúcar não administrada (cana-de-açúcar fornecida ($XC_{forn,t}$) e cana-de-açúcar de acionistas ($XC_{acio,t}$) em cada período t . Esta restrição determina um limite máximo para a moagem de cana-de-açúcar não administrada em cada período t . Este limite é definido por meio de um valor percentual (PCF_t) arbitrado pelos tomadores de decisão e por meio da quantidade de cana-de-açúcar processada no período.

Equações (5.74) e (5.75) apresentam a restrição de capacidade de transporte com frota própria e frota terceirizada, respectivamente, em cada período de análise t . Esta restrição indica a quantidade de cana-de-açúcar que a frota é capaz de transportar em cada período t considerado. O parâmetro (DFP_t) e (DFT_t) podem ser utilizados, por exemplo, para indicar uma diminuição da disponibilidade da frota devido a problemas mecânicos nos caminhões no decorrer da safra.

Algumas equações descritas acima apresentam limites de compatibilidade. Estes limites foram definidos considerando as perdas que ocorrem no processo de produção de uma usina de açúcar e álcool. Adotaram-se esses valores mediante orientação do gerente industrial da usina visitada e após verificação em literatura da ocorrência de perdas no processo da cana-de-açúcar.

As perdas de matéria-prima são classificadas como visíveis e invisíveis. As perdas visíveis dizem respeito à cana-de-açúcar perdida ainda no campo (etapa agrícola de CCT), detectadas na forma de toco, tolete, pedaço de cana-de-açúcar e até cana-de-açúcar inteira (BENEDINI et al., 2011), e as perdas invisíveis são as perdas que ocorrem no processo do campo à indústria, inclusive. As perdas invisíveis recebem esta denominação, pois, segundo Benedini et al. (2011), são difíceis de serem identificadas e principalmente quantificadas.

De acordo com Rosa et al. (2009), na colheita manual as perdas raramente ultrapassam 5%, enquanto que na colheita mecânica, esse percentual passa para 15%, fato que se reflete diretamente na produtividade.

O modelo matemático genérico desenvolvido para a etapa industrial foi escrito em um código computacional, de forma a permitir simulações numéricas rápidas e eficientes, visando se tornar uma ferramenta útil para os gestores das usinas de açúcar e álcool.

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS - ETAPA TRANSPORTE

Para obtenção dos resultados do problema de programação linear, utilizou-se o código computacional desenvolvido pelo grupo de pesquisa e o *toolbox* Linprog do Matlab para a etapa de otimização.

A modelagem tem capacidade para ser aplicada a usinas com diferentes configurações e dimensões e o programa é bastante acessível ao usuário, visto que as principais variáveis podem ser definidas e/ou alteradas em um menu que é exibido automaticamente no início da execução do programa, fazendo com que não seja necessário que o usuário acesse um arquivo para realizar tais tarefas.

O número de variáveis do modelo é dado pela Eq. (6.1).

$$\text{Número de Variáveis} = nTV \cdot nTF \cdot lu \cdot mod \quad (6.1)$$

Onde, nTV corresponde ao número total de tipos de veículos considerados na modelagem; nTF é a quantidade de tipo de frota considerada na análise. Se for somente frota própria ou frota terceirizada o índice nTF assume o valor 1, se for frota mista (própria e terceirizada) o índice nTF recebe o valor 2; lu - número de possibilidades de transporte (combinação entre usinas i e frentes de corte j); e mod - tipo de modelagem considerada no problema de otimização. Se $mod = 1$, o problema considera como variáveis de projeto apenas quantidade de cana-de-açúcar a ser transportada. Se $mod = 2$, considera-se como variáveis de projeto a quantidade de cana-de-açúcar a ser transportada e o número de veículos necessários para realizar o transporte.

Através da Eq. (6.2) calcula-se o número de restrições do modelo.

$$\text{Número de Restrições} = pc + n + (nTV \cdot n) \quad (6.2)$$

Onde, pc corresponde ao número de usinas i ; n representa o número de frentes de corte j ; e nTV corresponde ao número total de tipos de veículos considerados na modelagem.

A Fig. 6.1 apresenta o menu exibido pelo programa.

Nesta caixa devem-se definir quais os veículos e seus tipos (próprio e/ou terceirizado) que serão considerados na análise. Para definição e/ou alteração dos dados principais das usinas e frentes de corte e também de alguns custos relacionados aos veículos, clique no ícone “alterar mais dados”.

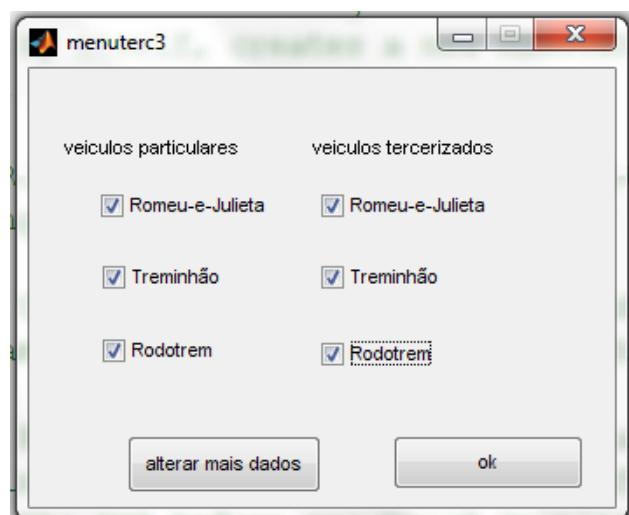


Figura 6.1 - Menu para definição e/ou atualização das principais variáveis

A Fig. 6.2 exibe a caixa que é exibida na tela quando o usuário solicita a atualização dos dados.

Nesta caixa deve-se definir primeiramente o número de usinas e de frentes de corte que estão sendo consideradas na análise em questão, pois desses valores serão criadas a matriz de distância (usinas *versus* frentes de corte) e os vetores de capacidade de moagem das usinas e de disponibilidade de cana-de-açúcar nas frentes de corte que compõem duas das três restrições impostas ao programa. Após a definição desses números, deve-se clicar sobre o ícone “redimensionar as matrizes”, para que a matriz e os vetores estejam relacionados aos valores definidos.

Nesta mesma caixa, pode-se ainda definir e/ou alterar valores para os preços e fretes dos veículos considerados. Ainda é possível realizar modificações no preço do diesel e do pneu novo e do salário do motorista.

menuterc4

número de usinas:	número de frentes de corte:														
1	6														
preço dos caminhões (R\$):	frete dos caminhões (R\$/km*ton):														
Romeu-e-Julietta: 269000	Romeu-e-Julietta: 161.97														
Treminhão: 404100	Treminhão: 115.89														
Rodotrem: 626100	Rodotrem: 91.03														
preço do diesel (R\$/litro):	salario do motorista (R\$):														
2.20	1250.00														
preço do pneu novo (R\$):															
869.04															
distâncias (usinas x frentes de corte):															
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>21</td> </tr> </table>			1	1	20	2	17	3	22	4	25	5	15	6	21
	1														
1	20														
2	17														
3	22														
4	25														
5	15														
6	21														
capacidade de moagem:															
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2140</td> </tr> </table>			1	1	2140										
	1														
1	2140														
disponibilidade de cana:															
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>301</td> <td>301</td> <td></td> </tr> </table>			1	2	3	1	301	301							
	1	2	3												
1	301	301													
<input type="button" value="redimensionar as matrizes"/> <input type="button" value="Ok"/>															

Figura 6.2 - Caixa para atualização de dados

Após todas as definições e/ou alterações realizadas, ao clicar em Ok, o programa retornará ao menu inicialmente exibido. Para executar a otimização basta que o usuário acione o ícone Ok do menu inicial.

O programa exibirá duas caixas que apresentam os resultados obtidos para a modelagem matemática do problema de otimização do transporte em usinas de cana-de-açúcar. Na Fig. 6.3 é apresentada a caixa menusaída4, onde são exibidos os seguintes dados: o custo total do processo de transporte (em R\$), a demanda total de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte (em toneladas) e o número e o tipo de veículos selecionados para o transporte da cana-de-açúcar das frentes de corte até a usina.

Na Fig. 6.4 é apresentada a caixa menusaída5, onde são exibidos os dados em forma de matriz. Para que os resultados sejam exibidos é preciso selecionar nos ícones o(s) tipo(s) de veículo(s) adotado(s) pelo programa, dessa forma, serão apresentados a demanda e o número de veículos para cada par de frente de corte e usina.

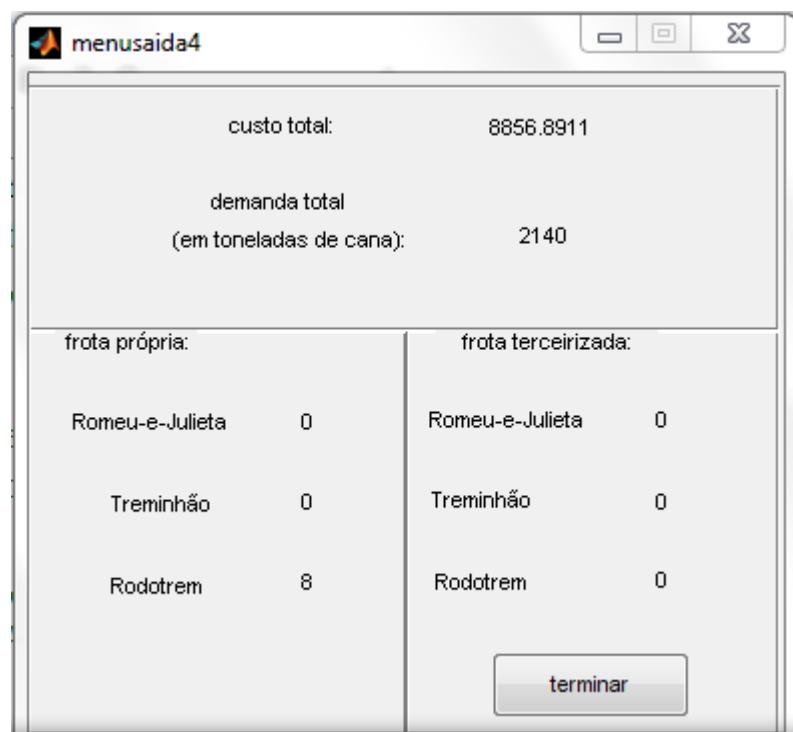


Figura 6.3 - Caixa de saída apresentando os resultados gerais

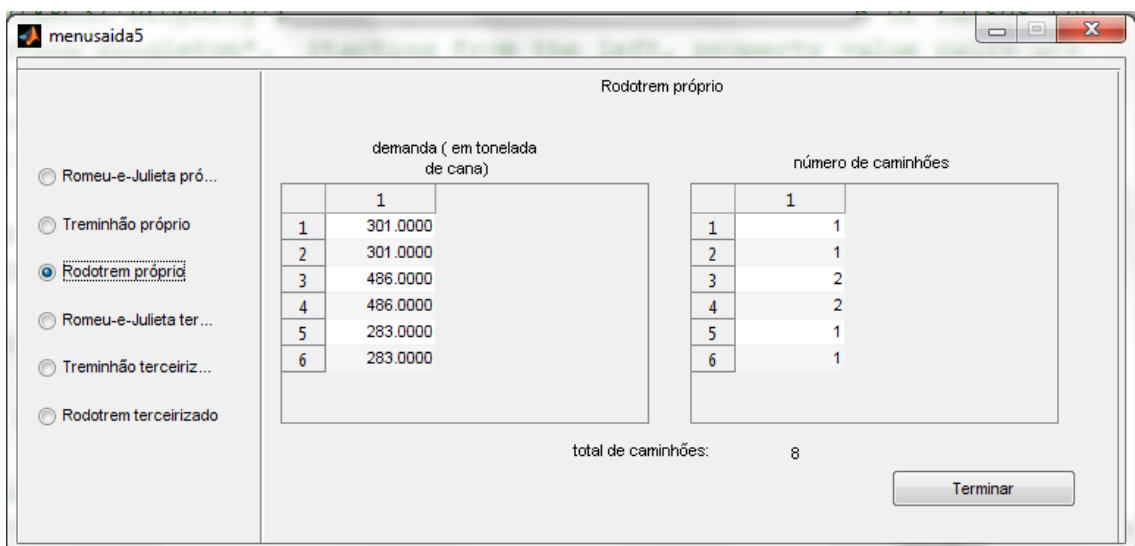


Figura 6.4 - Resultados obtidos para o veículo Rodotrem próprio

Para cada tipo de veículo considerado nesta pesquisa, a Tab. 6.1 exibe o valor calculado para o Custo Fixo Total (CFT) e Custo Variável Total (CVT) para a frota própria considerando o manual de cálculo de custos (NTC, 2001) e, também, o Custo do Frete Terceirizado (CFRTER) adotado para a frota terceirizada considerando as planilhas de fretes (GUIADOTRC, 2010). Nesta pesquisa, foram considerados casos apenas com a frota

própria, apenas com frota terceirizada e com ambos os tipos, para permitir a comparação das soluções ótimas encontradas.

No cálculo dos custos de transporte utilizou-se como referência para os cálculos do custo o Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas da NTC - Associação Nacional do Transporte de Cargas (NTC, 2001). E conforme pode ser observado na Fig. 6.2, os valores considerados para os cálculos são:

- Preço da composição Romeu e Julieta: R\$ 269.000,00;
- Preço da composição Treminhão: R\$ 404.100,00;
- Preço da composição Rodotrem: R\$ 626.100,00;
- Frete da composição Romeu e Julieta: R\$ 161,97/km.ton;
- Frete da composição Treminhão: R\$ 115,89/km.ton;
- Frete da composição Rodotrem: R\$ 91,03/km.ton;
- Preço do diesel: R\$ 2,20/litro;
- Preço do pneu novo: R\$ 869,04;
- Salário do motorista: R\$ 1.250,00.

Para o cálculo dos custos da frota terceirizada utilizou-se como referência planilhas de fretes da Central de Custos e Preços de Transportes, do Portal Guia do Transportador (GUIADOTRC, 2010).

Tabela 6.1 - Custos de transporte para as composições

	Custos das Frotas	Romeu e Julieta	Treminhão	Rodotrem
Frota Própria	Custo Fixo Total (R\$)	13.862,00	20.103,00	30.593,00
	Custo Variável Total (R\$/km)	0,8821	1,0410	1,4886
Frota Terceirizada	Custo Frete Terceirizado (R\$/ton*km)	0,1620	0,1159	0,0910

6.1. Estudo de Caso

6.1.1. Parâmetros Gerais de Entrada

A usina considerada como estudo de caso está situada no estado de Minas Gerais, onde atua na fabricação do açúcar VHP, dos álcoois AEAC e AEHC, de melaço e de energia, além de subprodutos como torta de filtro, bagaço e vinhaça.

A seguir tem-se uma conceituação dos principais produtos fabricados pela usina:

- Açúcar VHP (Very High Polarization): utilizado como matéria-prima para outros processos e destinado ao refino devido a sua alta polarização, podendo ser usado para o

consumo, mas geralmente é exportado a vários países do mundo para a produção do açúcar refinado. Trata-se de um açúcar bruto, que permite aos clientes transformá-lo em diferentes tipos de açúcar para o consumo;

- Etanol Anidro ou Álcool Etílico Anidro Carburante (AEAC): utilizado como aditivo na mistura com a gasolina. Também é conhecido como álcool absoluto e deve apresentar no mínimo 99,5% de pureza;
- Etanol Hidratado ou Álcool Etílico Hidratado Carburante (AEHC): utilizado como combustível para veículos com motores a álcool;
- Energia: biomassa proveniente do bagaço da cana-de-açúcar são fontes de coogeração de energia na usina para movimentação dos maquinários da produção industrial e o excedente é comercializado para a concessionária de energia elétrica.

Sua produção de açúcar VHP é bastante recente e dessa forma, ainda é destinada apenas para o mercado interno, porém já há negociação para iniciar a exportação. A produção dos álcoois é destinado ao mercado interno e externo desde o início da implantação da usina. A produção de energia da usina é consumida pela própria e seu excedente é vendido para a concessionária de energia elétrica. De acordo com informações do gerente industrial, a usina ainda não está aproveitando totalmente sua capacidade de coogeração de energia.

Como a usina está situada na sub-região Centro Sul, tem sua safra compreendida entre os meses de maio a dezembro, sendo assim, composta normalmente por 30 semanas de safra.

Em contato com um representante da usina, foram coletados alguns dados, os quais podem ser observados nas Tab. 6.2 e 6.3.

Tabela 6.2 – Dados do Estudo de Caso - Etapa transporte

Dados	
Distância das lavouras à usina	15 a 25 km (média de 20 km)
Quantidade de cana-de-açúcar moída	2.140 toneladas/dia
Quantidade de frentes de corte	6
Tipo de caminhão utilizado	Rodotrem
Capacidade do Rodotrem	65 toneladas
Velocidade do caminhão vazio	30 a 35 km/h
Velocidade do caminhão carregado	5 a 10 km/h
Tipo de Transporte	Terceirizado
Modalidade de transporte	Pista não pavimentada
Custo das operações de transporte	R\$ 5,25 por tonelada (média até 20 km)

Os veículos utilizados no transporte da cana-de-açúcar nesta pesquisa trabalham no sistema de “bate-volta”, onde os caminhões utilizam o sistema de desacoplamento e engate das carretas carregadas na usina e vazias na frente de corte, respectivamente. Estes

caminhões são monitorados via GPS e quando entram na usina acionam um sensor que os registra automaticamente. E apenas cana-de-açúcar picada é transportada das frentes de corte à usina.

Tabela 6.3 – Dados do Estudo de Caso - Etapa industrial

Dados	
Dias de safra	210
Quantidade disponível de cana-de-açúcar para rodar a safra	449.400 toneladas
Produção de etanol	25.262.741,88 litros
Produção de açúcar	416.185,74 sacas
Rendimento etanol/tonelada cana-de-açúcar	82,94 litros/tonelada de cana-de-açúcar
Rendimento açúcar/tonelada cana-de-açúcar	144,38 kg/tonelada de cana-de-açúcar
Eficiência industrial geral	87,27%
Eficiência global	84,18%

Na etapa industrial a usina possui um conjunto de três ternos de moenda, com separação do caldo misto. A produção de vapor é inteiramente suprida por meio da queima do bagaço processado pela usina, gerando vapor para o funcionamento da mesma.

As frentes de corte são consideradas como as fontes de suprimento que fornecem matéria-prima para a usina, e estas são 6 (seis), sendo 2 (duas) do tipo fornecedor, 2 (duas) arrendadas e 2 (duas) de acionistas.

Os dados apresentados na Tab. 6.3 para a produção de etanol correspondem a soma de etanol anidro (3.637.834,83 litros) e de etanol hidratado (21.624.907,05 litros), o que representa 14,40% de AEAC e de 85,60% de AEHC do total produzido.

De toda a cana-de-açúcar disponível para rodar a safra, 203.718 toneladas correspondem a fontes de suprimento de fornecedores, 126.270 toneladas são arrendadas e 118.732 toneladas estão disponíveis nas fontes de suprimento de acionistas. Observa-se, assim, que a usina não dispõe de cana-de-açúcar própria.

Tabelas 6.4 e 6.5 apresentam a matriz de distância da usina até as frentes de corte e a matriz de quantidade de cana-de-açúcar colhida em cada frente de corte, respectivamente.

Tabela 6.4 – Matriz de distância das fontes de suprimento até Usina Estudo de Caso

Fontes de Suprimento	Distância até a usina (km)
Arrendada 1	20
Arrendada 2	17
Fornecedor 1	22
Fornecedor 2	25
Acionista 1	15
Acionista 2	21

Tabela 6.5 – Matriz de quantidade de cana-de-açúcar colhida nas fontes de suprimento – Usina Estudo de Caso

Fontes de Suprimento	Quantidade cana-de-açúcar colhida (ton/dia)
Arrendada 1	301,0
Arrendada 2	301,0
Fornecedor 1	486,0
Fornecedor 2	486,0
Acionista 1	283,0
Acionista 2	283,0

Vale destacar que uma saca de açúcar corresponde a 50 quilos.

O custo total do processo de produção da usina é composto da etapa agrícola, que representa cerca de 60%, sendo que somente o transporte é responsável por 30% destes custos, da etapa industrial que corresponde a 30% do custo total e os restantes 10% do custo total é gasto com despesas administrativas.

O gerente industrial informou que uma matriz de produção “ideal”, ou seja, a relação da produção de álcool e de açúcar com a quantidade de cana-de-açúcar processada é de 60% de açúcar e 40% de etanol. É importante destacar que o ideal aqui está diretamente relacionado à um maior lucro pela venda dos produtos finais.

Verifica-se que, de acordo com o rendimento industrial da usina, a matriz de produção atualmente corresponde a 32,12% de açúcar e 67,88% de etanol. O que se mostra distante do considerado “ideal”, porém, existem justificativas para que a usina ainda não tenha alcançado sua matriz de produção desejada. A primeira é que a usina está em operação há pouco tempo (cerca de 3 anos) e o açúcar foi incorporado ao processo de produção apenas há cerca de 5 meses, logo, é necessário determinado tempo para que aconteçam ajustes nos parâmetros industriais de forma a se atingir a matriz “ideal”; e outra justificativa é que a usina ainda tem contratos a serem cumpridos, o que impossibilita a redução brusca na produção dos álcoois.

A Fig. 6.5 apresenta um resumo das operações da etapa industrial da usina em questão apresentada pelo gerente industrial da mesma.

O objetivo é minimizar o custo de transporte de 2.140 t/dia de cana-de-açúcar entre seis frentes de corte i ($i=1, 2, \dots, 6$) e a usina em estudo j ($j=1$), conforme os dados apresentados na Tab. 6.6.

A Tab. 6.6 também exibe as restrições de colheita (rco) em cada frente de corte e as restrições de moagem (rmo) na usina, e as distâncias das frentes de corte até a usina.

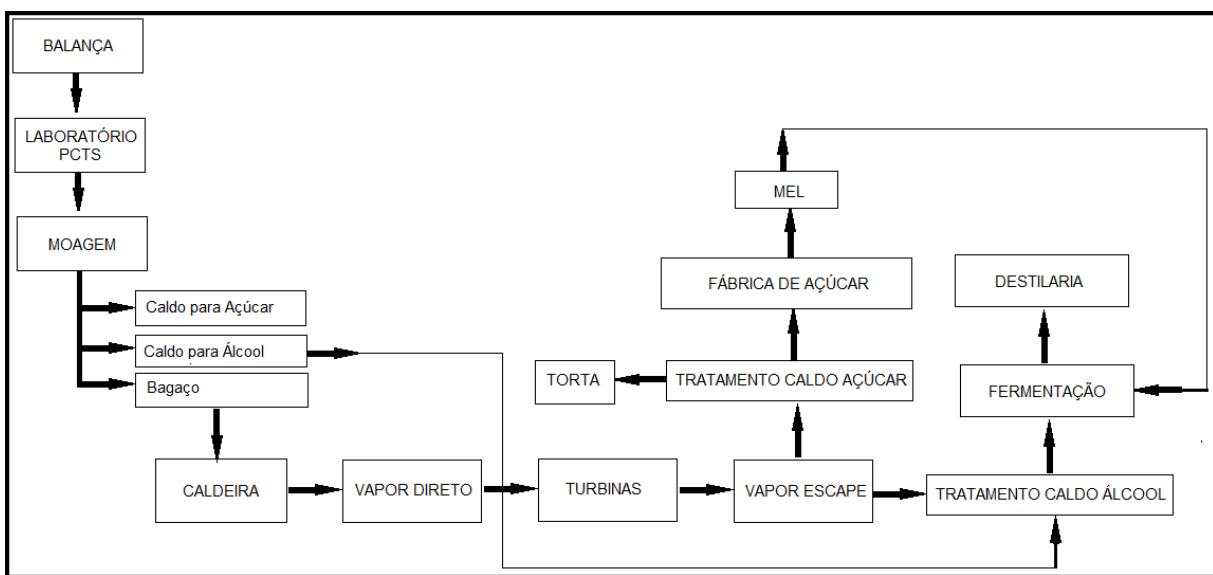


Figura 6.5 – Resumo das operações industriais da usina do Estudo de Caso

Velocidade média adotada para as composições é de 22,5 km/h. Para estabelecimento desse valor levou-se em conta a velocidade desempenhada com composições vazias (35 km/h) e carregadas (10 km/h) em rodovias não pavimentadas, conforme informado pelo gerente agrícola da usina.

Tabela 6.6 - Demanda entre as frentes de corte e a usina - Estudo de Caso

Frente de Corte	Usina	Restrições de colheita (rco)
Demandra (ton)	x_1	301,00
Distância (km)	20	
Demandra (ton)	x_2	301,00
Distância (km)	17	
Demandra (ton)	x_3	486,00
Distância (km)	22	
Demandra (ton)	x_4	486,00
Distância (km)	25	
Demandra (ton)	x_5	283,00
Distância (km)	15	
Demandra (ton)	x_6	283,00
Distância (km)	21	
Restrições de moagem (rmo)	2.140,00 (ton/dia)	2.140,00 (ton/dia)

6.1.2. Cenário 1

Este cenário foi desenvolvido considerando os três tipos de veículos na análise e frota mista (própria e terceirizada), dessa forma, tem-se 36 variáveis de projeto e 13 restrições.

A Tab. 6.7 apresenta os resultados para a demanda de cana-de-açúcar a ser colhida e o número de veículos necessário para cada tipo de veículo para realizar o transporte da demanda de cana-de-açúcar entre cada frente de corte e usina, dadas as considerações e parâmetros adotados na pesquisa.

De acordo com resultados exibidos na Tab. 6.7 pode-se afirmar que para a frota mista foram determinados 8 veículos Rodotrem do tipo próprio obtendo um custo total de R\$ 8.856,89 por dia para realizar o transporte de 2.140 toneladas de cana-de-açúcar entre as frentes de corte e a usina.

6.1.3. Cenário 2

Este cenário foi desenvolvido considerando os três tipos de veículos na análise e apenas a frota terceirizada, dessa forma, tem-se 18 variáveis de projeto e 13 restrições.

A Tab. 6.8 apresenta os resultados para a demanda de cana-de-açúcar a ser colhida e o número de veículos necessário para cada tipo de veículo para realizar o transporte da demanda de cana-de-açúcar entre cada frente de corte e usina dadas as considerações e parâmetros adotados na pesquisa.

Tabela 6.7 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota mista - Estudo de Caso – Cenário 1

Frentes de Corte	Romeu e Julietta Próprio	Treminhão Próprio	Rodotrem Próprio	Romeu e Julietta Terceirizado	Treminhão Terceirizado	Rodotrem Terceirizado
	Usina 1	Usina 1	Usina 1	Usina 1	Usina 1	Usina 1
1	Demanda (ton)	-	-	301,00	-	-
	Nº. veículos	-	-	1	-	-
2	Demanda (ton)	-	-	301,00	-	-
	Nº. veículos	-	-	1	-	-
3	Demanda (ton)	-	-	486,00	-	-
	Nº. veículos	-	-	2	-	-
4	Demanda (ton)	-	-	486,00	-	-
	Nº. veículos	-	-	2	-	-
5	Demanda (ton)	-	-	283,00	-	-
	Nº. veículos	-	-	1	-	-
6	Demanda (ton)	-	-	283,00	-	-
	Nº. veículos	-	-	1	-	-

Tabela 6. 8 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota terceirizada - Estudo de Caso – Cenário 2

Frentes de Corte	Romeu e Julieta Terceirizado	Treminhão Terceirizado	Rodotrem Terceirizado
	Usina	Usina	Usina
1 Demanda (ton)	-	-	301,00
Nº. veículos	-	-	1
2 Demanda (ton)	-	-	301,00
Nº. veículos	-	-	1
3 Demanda (ton)	-	-	486,00
Nº. veículos	-	-	2
4 Demanda (ton)	-	-	486,00
Nº. veículos	-	-	2
5 Demanda (ton)	-	-	283,00
Nº. veículos	-	-	1
6 Demanda (ton)	-	-	283,00
Nº. veículos	-	-	1

De acordo com resultados exibidos na Tab. 6.8 pode-se afirmar que para a frota terceirizada foram determinados 8 veículos Rodotrem obtendo um custo total de R\$ 10.017,30 por dia para realizar o transporte de 2.140 toneladas de cana-de-açúcar entre as frentes de corte e a usina. Verifica-se que o custo ao utilizar frota terceirizada foi 13,1% superior à frota própria para este caso.

6.2. Exemplo Ilustrativo

Neste exemplo, adotaram-se três usinas e oito frentes de corte que têm capacidade total de moagem e de colheita, respectivamente, de 36.000 t/dia. A Tab. 6.9 exibe as restrições de colheita (rco) nas frentes de corte e as restrições de moagem (rmo) nas usinas e as distâncias das frentes de corte até as usinas.

Velocidade média adotada para as composições é de 50 km/h. Nesse caso considerou-se que as distâncias a serem percorridas entre as usinas e as frentes de corte são em sua maioria em rodovias pavimentadas.

6.2.1. Cenário 1

Este cenário foi desenvolvido considerando os três tipos de veículos na análise para a frota própria ou a terceirizada, assim tem-se 144 variáveis de projeto e 35 restrições. Considerando as duas frotas, tem-se 288 variáveis de projeto e 35 restrições.

Tabela 6.9 - Demanda entre as frentes de corte e as usinas – Exemplo Ilustrativo

Frente de Corte		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Restrições de colheita (rco)
1	Demand (ton)	x_1	x_2	x_3	4.600
	Distância (km)	15	24	18	
2	Demand (ton)	x_4	x_5	x_6	5.000
	Distância (km)	5	17	26	
3	Demand (ton)	x_7	x_8	x_9	4.300
	Distância (km)	12	21	17	
4	Demand (ton)	x_{10}	x_{11}	x_{12}	4.900
	Distância (km)	23	19	30	
5	Demand (ton)	x_{13}	x_{14}	x_{15}	5.100
	Distância (km)	28	17	20	
6	Demand (ton)	x_{16}	x_{17}	x_{18}	4.500
	Distância (km)	15	39	17	
7	Demand (ton)	x_{19}	x_{20}	x_{21}	3.600
	Distância (km)	25	16	18	
8	Demand (ton)	x_{22}	x_{23}	x_{24}	4.000
	Distância (km)	15	11	34	
Restrições de moagem (rmo)		12.000	15.000	9.000	36.000 (ton/dia)

As Tab. 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam os resultados para a demanda de cana-de-açúcar a ser colhida e o número de veículos necessário para cada tipo de veículo para realizar o transporte da cana-de-açúcar entre cada frente de corte e usina, dadas as considerações e parâmetros adotados na pesquisa. Tabela 6.10 foi obtida considerando a frota própria, a Tab. 6.11 considerando a frota terceirizada e a Tab. 6.12 considerando frota própria e terceirizada.

De acordo com resultados exibidos na Tab. 6.10 pode-se afirmar que para a frota própria foram determinados 93 veículos Treminhão obtendo um custo total de R\$ 88.911,00 por dia para realizar o transporte de 36.000 toneladas de cana-de-açúcar entre as frentes de corte e as usinas. A Tab. 6.11 mostra que considerando a frota terceirizada, obteve-se o custo total de R\$ 107.020,00 por dia utilizando um total 78 veículos do tipo Rodotrem. Para a frota mista (própria e terceirizada) obteve-se o custo total de R\$ 84.255,00 por dia utilizando um total 70 veículos do tipo Treminhão próprio e 19 veículos do tipo Rodotrem terceirizado, de acordo com os dados apresentados na Tab. 6.12. Desta forma, a frota mista apresentou o melhor desempenho ao se considerar o custo de transporte.

Tabela 6.10 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota própria – Exemplo Ilustrativo – Cenário 1

		Romeu e Julieta			Treminhão			Rodotrem		
Frentes de Corte		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (ton)	-	-	-	2.700	-	1.900	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	7	-	5	-	-	-
2	Demanda (ton)	-	-	-	5.000	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	12	-	-	-	-	-
3	Demanda (ton)	-	-	-	4.300	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	10	-	-	-	-	-
4	Demanda (ton)	-	-	-	-	4.900	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
5	Demanda (ton)	-	-	-	-	5.100	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
6	Demanda (ton)	-	-	-	-	-	4.500	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	-	13	-	-	-
7	Demanda (ton)	-	-	-	-	1.000	2.600	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	3	6	-	-	-
8	Demanda (ton)t)	-	-	-	-	4.000	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	11	-	-	-	-

Tabela 6.11 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 1

Tabela 6.12 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando frota própria e terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 1

Frentes de Corte	Romeu e Julieta			Treminhão Próprio			Rodotrem Terceirizado		
	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1 Demanda (ton)	-	-	-	2.700	-	1.900	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	7	-	5	-	-	-
2 Demanda (ton)	-	-	-	-	-	-	5.000	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	-	-	10	-	-
3 Demanda (ton)	-	-	-	4.300	-	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	10	-	-	-	-	-
4 Demanda (ton)	-	-	-	-	4.900	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
5 Demanda (ton)	-	-	-	-	5.100	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
6 Demanda (ton)	-	-	-	-	-	4.500	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	-	13	-	-	-
7 Demanda (ton)	-	-	-	-	1.000	2.600	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	3	6	-	-	-
8 Demanda (ton)	-	-	-	-	-	-	-	4.000	-
Nº. veículos	-	-	-	-	-	-	-	9	-

6.2.2. Cenário 2

Este cenário foi desenvolvido considerando dois tipos de veículos em cada análise. Considerando-se apenas a frota própria ou a terceirizada tem-se um modelo com 96 variáveis de projeto e 27 restrições, enquanto que para a frota mista tem-se 192 variáveis de projeto e 27 restrições.

Comparando as composições do tipo Romeu e Julieta e Treminhão, considerando apenas a frota própria e apenas a frota terceirizada foram obtidos os mesmos resultados do Cenário 1 para o exemplo ilustrativo (dados exibidos na Tab. 6.10), porém o valor do custo final obtido para a frota terceirizada é de R\$ 133.210,00. A Tab. 6.13 apresenta os resultados calculados para as frotas própria e terceirizada. De acordo com esta tabela, verifica-se que são necessários 81 veículos tipo Treminhão próprios e 12 veículos tipo Treminhão terceirizado para realizar o transporte entre as frentes de corte e as usinas, sendo que o custo total ótimo é de R\$ 86.009,00 por dia.

As Tab. 6.14 e 6.15 apresentam os resultados obtidos analisando as composições Romeu e Julieta e Rodotrem. A Tab. 6.14 exibe os resultados obtidos para a frota própria e a Tab. 6.15 apresenta os resultados calculados com a aplicação da frota própria e terceirizada.

Tabela 6.13 - Resultados ótimos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Treminhão para frota própria e terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 2

Frentes de Corte	Romeu e Julieta			Treminhão Próprio			Treminhão Terceirizado		
	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1 Demanda (ton)	-	-	-	2.700	-	1.900	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	7	-	5	-	-	-
2 Demanda (ton)	-	-	-	-	-	-	5.000	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	-	-	12	-	-
3 Demanda (ton)	-	-	-	4.300	-	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	10	-	-	-	-	-
4 Demanda (ton)	-	-	-	-	4.900	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
5 Demanda (ton)	-	-	-	-	5.100	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
6 Demanda (ton)	-	-	-	-	-	4.500	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	-	13	-	-	-
7 Demanda (ton)	-	-	-	-	1.000	2.600	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	3	6	-	-	-
8 Demanda (ton)	-	-	-	-	4.000	-	-	-	-
Nº. veículos	-	-	-	-	11	-	-	-	-

De acordo com a Tab. 6.14, observa-se que para a frota própria foram determinados somente veículos Romeu e Julieta. Neste caso, obteve-se um custo total de R\$ 97.243,00 por dia utilizando 125 veículos. Considerando a frota terceirizada, obteve-se o custo total de R\$ 107.020,00 por dia utilizando um total 78 veículos do tipo Rodotrem como apresentado no Cenário 1 do exemplo ilustrativo (Tab. 6.11). Por outro lado, para a frota própria e terceirizada resultou em um custo total de R\$ 91.943,00 por dia utilizando um total de 94 veículos Romeu e Julieta próprio e 19 veículos Rodotrem terceirizado de acordo com dados exibidos na Tab. 6.15.

Comparando as composições do tipo Treminhão e Rodotrem, analisando a frota própria, foram calculados os mesmos resultados do Cenário 1 do exemplo ilustrativo – Tab. 6.10 – onde foram gerados 93 veículos Treminhão obtendo o custo total de R\$ 88.911,00 por dia. Considerando as composições do tipo Treminhão e Rodotrem para a frota terceirizada, os resultados gerados foram os mesmos obtidos no Cenário 1 do exemplo ilustrativo (exibidos na Tab. 6.11), onde obteve-se o custo total de R\$ 107.020,00 por dia utilizando o total de 78 veículos do tipo Rodotrem. Verifica-se que, considerando a frota mista, obtiveram-se os mesmos valores apresentados no Cenário 1 do exemplo ilustrativo – Tab. 6.12 – onde foi gerado o custo total de R\$ 84.255,00 por dia utilizando 70 veículos do tipo Treminhão próprios e 19 veículos terceirizados do tipo Rodotrem. Este continua sendo o melhor valor encontrado ao se minimizar o custo de transporte.

Tabela 6.14 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Rodotrem e frota própria – Exemplo Ilustrativo – Cenário 2

		Romeu e Julieta			Rodotrem		
Frentes de Corte		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demandas (ton)	2.700	-	1.900	-	-	-
	Nº. veículos	9	-	6	-	-	-
2	Demandas (ton)	5.000	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	16	-	-	-	-	-
3	Demandas (ton)	4.300	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	13	-	-	-	-	-
4	Demandas (ton)	-	4.900	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	17	-	-	-	-
5	Demandas (ton)	-	5.100	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	17	-	-	-	-
6	Demandas (ton)	-	-	4.500	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	19	-	-	-
7	Demandas (ton)	-	1.000	2.600	-	-	-
	Nº. veículos	-	4	9	-	-	-
8	Demandas (ton)	-	4.000	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	15	-	-	-	-

Tabela 6.15 - Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Rodotrem e frota própria e terceirizada – Exemplo Ilustrativo – Cenário 2

		Romeu e Julieta Próprio			Rodotrem Terceirizado		
Frentes de Corte		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demandas (ton)	2.700	-	1.900	-	-	-
	Nº. veículos	9	-	6	-	-	-
2	Demandas (ton)	-	-	-	5.000	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	10	-	-
3	Demandas (ton)	4.300	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	13	-	-	-	-	-
4	Demandas (ton)	-	4.900	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	17	-	-	-	-
5	Demandas (ton)	-	5.100	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	17	-	-	-	-
6	Demandas (ton)	-	-	4.500	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	19	-	-	-
7	Demandas (ton)	-	1.000	2.600	-	-	-
	Nº. veículos	-	4	9	-	-	-
8	Demandas (ton)	-	-	-	-	4.000	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	9	-

6.3. Discussão

Através da análise do estudo de caso, pode-se concluir que o resultado obtido no Cenário 1 apresenta a melhor opção para realizar o transporte de 2.140 toneladas da cana-de-açúcar por dia entre as frentes de corte e a usina considerando as especificações adotadas para o modelo. Neste cenário foi definido frota mista para a realização da otimização, porém o modelo selecionou apenas veículos do Tipo Rodotrem próprio.

De acordo com os dados obtidos na usina, atualmente é pago à empresa terceirizada que realiza as operações de transporte R\$ 5,25 por tonelada de cana-de-açúcar transportada, o que contabiliza um total de R\$ 11.235,00/dia. Realizando uma comparação com o resultado obtido no Cenário 2 (frota terceirizada), verifica-se que o modelo selecionou o veículo do Tipo Rodotrem a um custo de R\$ 10.017,30/dia para o transporte de 2.140 toneladas de cana-de-açúcar por dia. Este resultado mostra que o modelo conseguiu otimizar o dimensionamento da frota gerando uma redução de 10,84% no custo das operações de transporte, o que acarretará uma redução total de R\$ 255.717,00 em toda a safra.

É interessante notar que o modelo selecionou o veículo do tipo Rodotrem para os dois cenários analisados, sendo que este veículo é o mesmo utilizado pela usina nas suas operações de transporte.

Analizando os cenários para o exemplo ilustrativo, observa-se que a frota mista, composta por veículos próprios e terceirizados, é a melhor opção para realizar o transporte da cana-de-açúcar entre as frentes de corte e as usinas considerando as especificações adotadas para o modelo. A frota mista composta de veículos do tipo Treminhão próprio e Rodotrem terceirizado (Tab. 6.12) apresentou um valor 2,04% inferior em relação a frota mista de veículos do tipo Treminhão próprio e terceirizado (Tab. 6.13).

A segunda melhor opção é a frota mista composta de veículos do tipo Treminhão. Esta apresentou um valor 3,3% inferior em relação a frota própria composta do mesmo tipo de veículo (Tab. 6.10).

CAPÍTULO VII

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS - ETAPA INDUSTRIAL

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação do modelo descrito no Capítulo 5 (Equações 5.23 a 5.75).

A modelagem tem capacidade para ser aplicada a usinas de açúcar e álcool com diferentes configurações e dimensões. Dessa forma, o número de variáveis do modelo é dado pela Eq. (7.1) e o número de restrições pode ser calculado pela Eq. (7.2).

$$\text{Número de Variáveis} = \{[m + m + s + p + (p.e)]t\} \quad (7.1)$$

$$\text{Número de Restrições} = \{[m + s + p + m + (p.e)]t\} + t + t + (p.e.t) + (s.t) + t + t + t + (m.t) + 1 + t + t + (m.t) + (p.t) + (p.t) + t \quad (7.2)$$

Onde, m corresponde ao número total de fontes de suprimento considerados no modelo; s é a quantidade de tipo de frota considerada na análise; p corresponde ao número de produtos fabricados pela usina; e é a quantidade de tipo de estoque utilizado para estocar os produtos finais; e t representa os períodos de tempo da análise.

De forma similar à etapa de transporte, foram realizados dois cenários: Estudo de Caso – este cenário foi elaborado com os dados de uma usina localizada no Estado de Minas Gerais; Exemplo Ilustrativo – este segundo cenário foi criado com o intuito de mostrar que a modelagem matemática é genérica, ou seja, pode ser utilizada para representar o processo de produção agregado de qualquer usina produtora de açúcar e álcool.

Além destes dois cenários, foram definidas três situações: (1) Aplicação 1 - Planejamento agregado da produção de uma usina instalada; (2) Aplicação 2 - Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pelo usuário do modelo; (3) Aplicação 3 - Planejamento

agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo.

Para obtenção dos resultados do problema de programação linear, utilizou-se o código computacional desenvolvido pelo grupo de pesquisa e o *toolbox* Linprog do Matlab durante a etapa de otimização.

A pesquisa se apoiou em dados secundários, obtidos de diversas fontes, e em dados primários, coletados a partir de visitas na usina em questão e conversas com o gerente agrícola e o gerente industrial da usina visitada.

Todos os dados utilizados no método de geração de parâmetros ($RIS_{ps,k,t}$, $RIH_{ph,k,t}$, $RIA_{pa,k,t}$; MCI_{kt} e MCA_{mt}) e no modelo matemático são listados aqui.

7.1. Estudo de Caso

Este cenário considera a existência de seis fontes de matéria prima ($m \rightarrow$ duas fontes de cana-de-açúcar arrendada, duas fontes de cana-de-açúcar de fornecedor e duas fontes de cana-de-açúcar de acionista); uma forma de transportar esta matéria prima para a indústria ($s \rightarrow$ frota terceirizada); uma forma de estocar os produtos finais ($e \rightarrow$ estoque próprio); quatro produtos finais ($p \rightarrow$ açúcar VHP, melaço, álcool AEHC e álcool AEAC); um processo de produção ($k \rightarrow$ processo 1); com um horizonte de planejamento de trinta períodos semanais ($t \rightarrow$ semana 1 a semana 30).

Nas Tab. (7.1) e (7.2) são apresentados os dados de entrada do estudo de caso.

Tabela 7.1 - Dados de entrada constantes do Estudo de Caso

Parâmetros	Valores
ARH (%)	18
CPART (u.m./kg de ART)	0,087
CA (t de cana-de-açúcar/ha)	9
AVC2 (u.m./t de cana-de-açúcar)	0
AVC3 (u.m./t de cana-de-açúcar)	3
AVC4 (u.m./t de cana-de-açúcar)	4
ATRCA (kg/t)	114
CG (u.m.)	1.000.000,00
MMIC (t/sem)	12150
MMAC (t/sem)	14980
CTFP (t/sem)	23000
CTFT (t/sem)	110% MMAC

A capacidade de moagem mínima e máxima de cana-de-açúcar é 12.150 toneladas/semana e 14.980 toneladas/semana, respectivamente. A capacidade de transporte da frota terceirizada é considerada como 110% da capacidade de moagem

máxima de cana-de-açúcar da usina (MMAC), logo, é de 16.478 toneladas/semana. Ou seja, a usina dispõe de uma capacidade bastante superior do que a necessária, caso haja imprevistos.

Tabela 7.2 - Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto

FCAEA _{pa}	Valores (Adimensionais)
AEHC	0.95415
AEAC	0.99577

Uma das decisões mais influentes nos resultados é a escolha do(s) processo(s), pois os produtos finais são determinados pelo processo de produção. De acordo com informações obtidas com o gerente industrial da usina visitada, esta pré-determina sua matriz de produção, ou seja, a usina estabelece o processo de produção que contemple a produção dos produtos finais que deseja produzir. Dessa forma, não há necessidade do processo de produção constituir uma variável do modelo.

Assim, a usina em questão considera apenas um processo de produção para toda a safra e este é definido pelo gerente e administradores industriais.

O processo de produção e seus produtos finais compõem a matriz de produção. A matriz de produção define o quanto produzir de açúcar e de álcool. Esta matriz é determinada de acordo com a necessidade de cumprimento dos contratos de venda dos produtos finais e, consequentemente, baseados no valor de mercado destes produtos.

A Tab. 7.3 exibe os dados constantes do processo escolhido e seus dados correspondentes são apresentados na Tab. 7.4.

Tabela 7.3 - Dados constantes do processo escolhido - Estudo de Caso

Constantes	R _{"AEHC"} (1/100 kg ART)	R _{"AEAC"} (1/100 kg ART)	BH	MPUH
	67,87	65,03	85%	40%

Tabela 7.4 - Dados correspondentes ao processo escolhido - Estudo de Caso

Processo	Características técnicas do processo						
	DEC _{D_{kp}} (Unit)	DEH _{D_{kp}} (Unit)	POS _{D_{kp}} (%)	UMS _{D_{kp}} (%)	MAS _{D_{kp,ps}} (Unit)	MDA _{D_{kp,pa}} (Unit)	
					VHP	AEHC	AEAC
	0,9	0,33	99,3	0,1	1	0,5	0,5

Os dados $MAS_{kp,ps}$ e $MDA_{kp,pa}$ apresentam a representatividade (ou porcentagem) de cada tipo de açúcar e álcool produzido na matriz de produção, respectivamente. Como pode ser observado na Tab. 7.4, a soma dos tipos de açúcar deve ser igual a 100% e a soma dos tipos de álcool também deve ser igual a 100%.

Os parâmetros do processo industrial que variam no tempo estão apresentados na Tab.7.5.

A Tab. 7.6 apresenta os dados de corte, carregamento e transporte (CCT) para o estudo de caso: disponibilidade da frota terceirizada (DFT_t) e custo da etapa CCT ($CCCT_{st}$).

Tabela 7.5 - Dados de entrada com variação em t - Estudo de Caso

Semanas	POC_t (%)	PUC_t (%)	AR_t (%)	ESA_t (%)	EFA_t (%)	$ATRC_t$ (kg/t)	$PATR_t$ (u.m./t)	PCF_t (%)	TAI_t (%)	TEM_t (%)
Sem 1	12,0	83,4	1,1	88,0	88,0	120,9	0,2912	0	96	65
Sem 2	12,1	83,6	1,2	88,6	89,1	125,4	0,2912	0	96	65
Sem 3	12,4	84,1	1,0	89,2	89,2	127,9	0,2969	0	96	100
Sem 4	12,4	84,4	1,1	89,4	89,6	128,4	0,2969	55	96	100
Sem 5	12,8	84,4	1,0	89,6	90,0	129,1	0,2969	55	96	100
Sem 6	12,8	84,9	1,0	89,6	90,1	130,8	0,2969	55	96	94
Sem 7	12,8	85,6	1,0	89,6	90,3	131,6	0,3128	55	96	100
Sem 8	13,0	85,0	1,0	89,7	90,4	132,9	0,3128	55	96	100
Sem 9	13,4	85,5	1,0	89,6	90,4	133,5	0,3128	55	96	100
Sem 10	13,6	85,5	1,0	89,6	90,5	134,5	0,3128	55	96	94
Sem 11	13,8	85,6	1,0	89,8	90,6	136,1	0,3128	55	96	100
Sem 12	14,2	85,9	1,0	89,9	90,4	138,8	0,3030	55	96	100
Sem 13	14,4	85,8	1,0	89,8	90,2	140,9	0,3030	55	96	100
Sem 14	14,7	85,8	0,9	89,6	90,1	144,2	0,3030	55	96	100
Sem 15	15,2	85,8	0,9	89,7	89,7	143,5	0,3030	55	96	100
Sem 16	15,2	85,8	1,0	89,3	89,4	142,3	0,3030	55	96	94
Sem 17	15,2	85,1	1,0	89,2	89,3	142,0	0,3041	55	96	100
Sem 18	15,4	84,5	1,1	89,2	89,1	141,1	0,3041	55	96	94
Sem 19	14,7	84,0	1,0	88,8	88,8	138,5	0,3041	55	96	94
Sem 20	14,7	83,4	1,0	88,5	88,8	137,4	0,2955	55	96	94
Sem 21	14,7	83,9	1,0	88,3	88,7	133,3	0,2955	55	96	100
Sem 22	14,0	82,5	1,1	88,0	88,5	131,2	0,2955	55	96	100
Sem 23	13,0	82,0	1,0	87,7	88,0	130,2	0,3002	55	96	100
Sem 24	14,7	82,5	1,1	87,8	88,6	130,1	0,3002	55	96	100
Sem 25	14,7	82,0	1,1	88,3	88,4	130,0	0,3002	55	96	100
Sem 26	14,7	82,5	1,0	88,2	88,1	129,9	0,3002	55	96	94
Sem 27	14,0	82,0	1,0	88,3	88,7	129,8	0,3002	55	96	100
Sem 28	13,0	82,5	1,0	88,0	88,5	129,7	0,3002	0	96	100
Sem 29	14,0	82,0	1,0	87,6	88,6	129,6	0,3002	0	96	94
Sem 30	13,0	82,3	1,0	87,8	88,7	129,5	0,3002	0	96	65

Tabela 7.6 - Dados de CCT - Estudo de Caso

Semanas	DFT_t (%)	$CCCT_{st}$ (u.m./t)	Semanas	DFT_t (%)	$CCCT_{st}$ (u.m./t)
		FT			FT
Sem 1	100	10,94	Sem 16	100	10,94
Sem 2	100	10,94	Sem 17	100	10,94
Sem 3	100	10,94	Sem 18	100	10,94
Sem 4	100	10,94	Sem 19	100	10,94
Sem 5	100	10,94	Sem 20	100	10,94
Sem 6	100	10,94	Sem 21	100	10,94
Sem 7	100	10,94	Sem 22	100	10,94
Sem 8	100	10,94	Sem 23	100	10,94
Sem 9	100	10,94	Sem 24	100	10,94

Continuação Tab. 7.6 - Dados de CCT - Estudo de Caso

Sem 10	100	10,94	Sem 25	100	10,94
Sem 11	100	10,94	Sem 26	100	10,94
Sem 12	100	10,94	Sem 27	100	10,94
Sem 13	100	10,94	Sem 28	100	10,94
Sem 14	100	10,94	Sem 29	100	10,94
Sem 15	100	10,94	Sem 30	100	10,94

Na Tab. 7.7 são apresentados os dados da produtividade agrícola da cana-de-açúcar arrendada considerada neste cenário.

Tabela 7.7 - Produtividade agrícola da cana-de-açúcar arrendada - Estudo de Caso

Semanas	PRA _{mt} (t/ha)	Semanas	PRA _{mt} (t/ha)
	CAR		CAR
Sem 1	60,0	Sem 16	63,1
Sem 2	60,5	Sem 17	63,0
Sem 3	61,5	Sem 18	62,3
Sem 4	62,0	Sem 19	61,1
Sem 5	62,5	Sem 20	60,5
Sem 6	62,5	Sem 21	59,9
Sem 7	63,0	Sem 22	59,3
Sem 8	64,0	Sem 23	58,5
Sem 9	64,0	Sem 24	58,5
Sem 10	64,5	Sem 25	58,0
Sem 11	65,5	Sem 26	59,3
Sem 12	65,0	Sem 27	59,5
Sem 13	64,0	Sem 28	59,5
Sem 14	63,8	Sem 29	59,0
Sem 15	63,5	Sem 30	59,0

Tabela 7.8 apresenta os valores líquidos dos produtos adotados para este modelo.

Tabela 7.8 - Valor dos produtos - Estudo de Caso

Semanas	VPD _{pt} (u.m./t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Sem 1	567,30	187,80	664,50	693,10
Sem 2	568,60	188,80	665,80	694,40
Sem 3	569,60	189,20	665,90	694,50
Sem 4	568,60	189,20	666,10	694,70
Sem 5	568,00	189,10	665,40	694,00
Sem 6	567,60	189,50	667,50	696,20
Sem 7	567,90	189,10	668,50	696,00
Sem 8	568,30	189,20	669,30	695,00
Sem 9	569,10	189,40	670,10	694,30
Sem 10	569,80	190,10	668,70	691,40
Sem 11	570,00	190,50	668,30	694,20
Sem 12	570,30	190,70	667,50	696,20
Sem 13	570,40	190,50	667,90	696,60
Sem 14	570,80	190,50	667,40	696,10
Sem 15	571,30	191,10	665,70	694,30
Sem 16	571,60	191,70	665,40	694,00

Continuação Tab. 7.8 - Valor dos produtos - Estudo de Caso

Sem 17	572,00	191,00	666,00	694,60
Sem 18	571,80	190,90	666,10	694,70
Sem 19	571,80	189,40	666,00	694,60
Sem 20	572,00	188,40	667,40	696,10
Sem 21	572,30	188,40	668,50	697,20
Sem 22	572,40	187,80	670,90	699,80
Sem 23	572,10	187,50	670,50	700,50
Sem 24	572,00	191,70	665,40	694,30
Sem 25	571,80	191,00	666,00	694,00
Sem 26	571,80	190,90	666,10	694,60
Sem 27	572,00	189,40	666,00	694,70
Sem 28	572,30	188,40	667,40	694,60
Sem 29	572,40	188,40	668,50	696,10
Sem 30	572,10	187,80	670,90	697,20

A Tab. 7.9 apresenta os valores semanais relativos ao adiantamento pago pela cooperativa à usina pela produção semanal para a usina em estudo.

Tabela 7.9 - Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal - Estudo de Caso

Semanas	VAC _{pt} (u.m/t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Sem 1	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 2	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 3	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 4	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 5	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 6	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 7	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 8	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 9	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 10	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 11	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 12	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 13	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 14	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 15	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 16	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 17	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 18	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 19	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 20	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 21	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 22	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 23	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 24	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 25	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 26	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 27	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 28	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 29	231,4	120,07	368,0	384,0
Sem 30	231,4	120,07	368,0	384,0

A demanda para o açúcar VHP é de 46.000 toneladas, para o melaço é de 2.150 toneladas, e para os álcoois AEHC e AEAC são de 2.650 e 2.600 m³, respectivamente. Essa demanda está distribuída nas 30 semanas da safra. Estes valores estão apresentados na Tab. 7.10 de acordo com a demanda semanal de cada produto considerado.

Tabela 7.10 - Demanda semanal de cada produto - Estudo de Caso

Semanas	DP _{pt} (t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Sem 1	0	0	0	0
Sem 2	3.300	150	0	0
Sem 3	0	160	0	375
Sem 4	0	0	0	215
Sem 5	5.000	0	600	0
Sem 6	0	270	0	0
Sem 7	0	0	0	0
Sem 8	0	0	0	0
Sem 9	6.100	160	0	320
Sem 10	0	0	0	0
Sem 11	0	0	0	0
Sem 12	3.000	0	450	0
Sem 13	2.900	0	0	255
Sem 14	0	260	0	0
Sem 15	3.000	0	0	0
Sem 16	0	0	0	0
Sem 17	0	150	0	0
Sem 18	4.300	0	410	0
Sem 19	0	0	0	390
Sem 20	0	0	0	0
Sem 21	0	210	0	0
Sem 22	0	0	270	0
Sem 23	4.400	0	0	0
Sem 24	0	0	0	330
Sem 25	0	220	0	0
Sem 26	7.000	0	0	0
Sem 27	0	0	370	135
Sem 28	0	0	0	0
Sem 29	0	240	0	0
Sem 30	7.000	330	550	580
Total	46.000	2.150	2.650	2.600

Para este Estudo de Caso os dados referentes ao custo de estocagem são apresentados nas Tab. 7.11 a 7.14, sendo que: a Tab. 7.11 exibe o custo de estocar cada produto no estoque próprio (estoque da própria usina); a Tab. 7.12 exibe a capacidade de estocagem do estoque próprio para cada produto analisado; a Tab. 7.13 mostra que não considerou-se a existência de estoque inicial dos produtos; a Tab. 7.14 apresenta o custo de estocagem dos produtos na entressafra para o estudo de caso. Pode-se observar que os valores apresentados na Tab. 7.14 são dez vezes o custo de estocagem semanal

(apresentados na Tab. 7.11), dado que o período de estocagem média dos produtos na entressafra é de dez semanas.

Tabela 7.11 - Custo de estocagem de cada produto - Estudo de Caso

Estoques	CE _{pe} (u.m./t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	0,50	0,30	1,50	1,50

Tabela 7.12 - Capacidade de estocagem de cada produto - Estudo de Caso

Estoques	CEAT _{pe} (t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	78750	2800	5000	9000

Tabela 7.13 - Estoque inicial dos produtos - Estudo de Caso

Estoques	EI _{pe} (t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	0	0	0	0

Tabela 7.14 - Penalização pela estocagem de entressafra - Estudo de Caso

Estoques	PU _{pe} (u.m./t ou m ³)			
	VHP	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	5	3	15	15

De posse dos dados mencionados acima e das equações apresentadas no Capítulo 5 (Eq. 5.26 a 5.53) foi possível realizar o cálculo da Matriz de Rendimento Industrial da produção do açúcar ($RIS_{ps,k,t}$), Matriz de Rendimento Industrial da produção do melaço ($RIH_{ph,k,t}$), Matriz de Rendimento Industrial da produção do álcool ($RIA_{pa,k,t}$), Matriz de Custo Agrícola (MCA_{mt}) e da Matriz de Custo Industrial (MCI_{kt}) que são exibidos no próximo item.

7.1.1. Matrizes de Rendimento - Estudo de Caso

A matriz de rendimentos de produtos da indústria sucroalcooleira é composta das matrizes apresentadas nas Tab. 7.15, 7.16 e 7.17. Para estabelecer estes rendimentos é necessário conhecer vários parâmetros que estão relacionados com a qualidade da matéria-prima, com as eficiências industriais e com a configuração estabelecida para o funcionamento da usina (processo de produção). Isto se deve ao fato de tratarmos de um sistema agroindustrial e, portanto, inteiramente relacionado a variáveis climáticas, sazonais e de manejo de campo, que influenciam diretamente nas características da matéria-prima e, consequentemente, no rendimento industrial obtido.

Estas peculiaridades são consideradas pelo próprio setor sucroalcooleiro no momento de determinar o valor a ser pago pela matéria-prima.

A Tab.7.15 apresenta a matriz de rendimentos da produção do açúcar, em cada processo k e em cada período t ($RIS_{ps,k,t}$).

Tabela 7.15 - Matriz de rendimentos industriais da produção do açúcar - Estudo de Caso

Semanas	RIS_{ps,k,t} (ton)	Semanas	RIS_{ps,k,t} (ton)
	VHP		VHP
Sem 1	81,8364	Sem 16	107,9994
Sem 2	83,2708	Sem 17	107,0768
Sem 3	86,3987	Sem 18	107,7786
Sem 4	86,8815	Sem 19	101,8509
Sem 5	89,8847	Sem 20	100,8193
Sem 6	90,3784	Sem 21	101,1638
Sem 7	91,0598	Sem 22	94,4812
Sem 8	91,9927	Sem 23	86,9133
Sem 9	95,2270	Sem 24	98,9798
Sem 10	96,6483	Sem 25	98,9512
Sem 11	98,3930	Sem 26	99,4307
Sem 12	101,6789	Sem 27	94,2392
Sem 13	102,8881	Sem 28	87,7325
Sem 14	104,7977	Sem 29	93,4922
Sem 15	108,4832	Sem 30	87,3256

A Tab. 7.16 apresenta a matriz de rendimentos da produção do melaço, em cada processo k e em cada período t ($RIH_{ph,k,t}$).

Tabela 7.16 - Matriz de rendimentos industriais da produção do melaço - Estudo de Caso

Semanas	RIH_{ph,k,t} (ton)	Semanas	RIH_{ph,k,t} (ton)
	Melaço		Melaço
Sem 1	26,0188	Sem 16	27,9094
Sem 2	26,0405	Sem 17	29,4580
Sem 3	25,9104	Sem 18	31,2389
Sem 4	25,3988	Sem 19	30,8032
Sem 5	26,2768	Sem 20	32,0541
Sem 6	25,3039	Sem 21	30,8538
Sem 7	23,9612	Sem 22	32,3153
Sem 8	25,5315	Sem 23	30,9299
Sem 9	25,2837	Sem 24	33,8539
Sem 10	25,6611	Sem 25	35,2138
Sem 11	25,8908	Sem 26	34,0082
Sem 12	26,0379	Sem 27	33,5370
Sem 13	26,5885	Sem 28	30,0070
Sem 14	27,0820	Sem 29	33,2711
Sem 15	28,0344	Sem 30	30,3478

A Tab. 7.17 apresenta a matriz de rendimentos da produção do álcool, em cada processo k e em cada período t ($RIA_{pa,k,t}$).

Para o cálculo da matriz de custos agrícolas apresentada na Tab. 7.18 foi necessário determinar o custo agrícola de obtenção de cada tipo de matéria-prima m em cada período t . (u.m./tonelada de cana-de-açúcar) e o valor que será pago pela cana-de-açúcar (u.m./ton).

A Tab. 7.18 apresenta os dados de custo de obtenção da matéria-prima por fonte de suprimento m em cada semana t (MCA_{mt}).

Tabela 7.17 - Matriz de rendimentos industriais da produção do álcool - Estudo de Caso

Semanas	RIA _{Pa,k,t} (ton)		Semanas	RIA _{Pa,k,t} (ton)	
	AEHC	AEAC		AEHC	AEAC
Sem 1	2,9148	2,8215	Sem 16	3,1472	3,0511
Sem 2	3,0395	2,9415	Sem 17	3,2264	3,1270
Sem 3	2,8871	2,7957	Sem 18	3,4117	3,3051
Sem 4	2,9570	2,8629	Sem 19	3,2547	3,1530
Sem 5	2,9511	2,8579	Sem 20	3,3185	3,2141
Sem 6	2,9011	2,8100	Sem 21	3,2502	3,1486
Sem 7	2,8334	2,7452	Sem 22	3,3660	3,2583
Sem 8	2,9321	2,8402	Sem 23	3,1402	3,0395
Sem 9	2,9389	2,8475	Sem 24	3,4854	3,3742
Sem 10	2,9723	2,8799	Sem 25	3,5562	3,4421
Sem 11	2,9995	2,9065	Sem 26	3,3991	3,2913
Sem 12	3,0245	2,9313	Sem 27	3,3557	3,2482
Sem 13	3,0589	2,9647	Sem 28	3,1077	3,0084
Sem 14	3,0106	2,9189	Sem 29	3,3325	3,2259
Sem 15	3,0791	2,9856	Sem 30	3,1294	3,0292

Tabela 7.18 - Custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período - Estudo de Caso

Semanas	MCA _{mt} (u.m./ton)					
	MCA _{1t}	MCA _{2t}	MCA _{3t}	MCA _{4t}	MCA _{5t}	MCA _{6t}
Sem 1	40,1856	40,1856	38,2061	38,2061	39,2061	39,2061
Sem 2	41,4548	41,4548	39,5165	39,5165	40,5165	40,5165
Sem 3	42,9267	42,9267	40,9735	40,9735	41,9735	41,9735
Sem 4	43,0352	43,0352	41,1220	41,1220	42,1220	42,1220
Sem 5	43,2037	43,2037	41,3298	41,3298	42,3298	42,3298
Sem 6	43,7084	43,7084	41,8345	41,8345	42,8345	42,8345
Sem 7	46,2587	46,2587	44,1645	44,1645	45,1645	45,1645
Sem 8	46,5857	46,5857	44,5711	44,5711	45,5711	45,5711
Sem 9	46,7734	46,7734	44,7588	44,7588	45,7588	45,7588
Sem 10	47,0473	47,0473	45,0716	45,0716	46,0716	46,0716
Sem 11	47,4718	47,4718	45,5721	45,5721	46,5721	46,5721
Sem 12	46,8391	46,8391	45,0564	45,0564	46,0564	46,0564
Sem 13	47,5502	47,5502	45,6927	45,6927	46,6927	46,6927
Sem 14	48,5653	48,5653	46,6926	46,6926	47,6926	47,6926
Sem 15	48,3762	48,3762	46,4805	46,4805	47,4805	47,4805
Sem 16	48,0437	48,0437	46,1169	46,1169	47,1169	47,1169
Sem 17	48,1347	48,1347	46,1822	46,1822	47,1822	47,1822
Sem 18	47,9166	47,9166	45,9085	45,9085	46,9085	46,9085
Sem 19	47,2243	47,2243	45,1178	45,1178	46,1178	46,1178
Sem 20	45,6130	45,6130	43,6017	43,6017	44,6017	44,6017
Sem 21	44,4516	44,4516	42,3901	42,3901	43,3901	43,3901
Sem 22	43,8823	43,8823	41,7696	41,7696	42,7696	42,7696
Sem 23	44,3511	44,3511	42,0860	42,0860	43,0860	43,0860
Sem 24	44,3211	44,3211	42,0560	42,0560	43,0560	43,0560
Sem 25	44,3364	44,3364	42,0260	42,0260	43,0260	43,0260
Sem 26	44,1900	44,1900	41,9960	41,9960	42,9960	42,9960
Sem 27	44,1425	44,1425	41,9660	41,9660	42,9660	42,9660

Continuação Tab. 7.18 - Custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período - Estudo de Caso

Sem 28	44,1125	44,1125	41,9359	41,9359	42,9359	42,9359
Sem 29	44,1263	44,1263	41,9059	41,9059	42,9059	42,9059
Sem 30	44,0963	44,0963	41,8759	41,8759	42,8759	42,8759

A matriz de custos industriais apresentada na Tab. 7.19 adota um custo unitário por kg de ART produzido e determina o custo industrial a partir da multiplicação deste custo unitário de produção pela quantidade de ART produzido no processo. Assim, cada produto deve ser convertido para esta mesma unidade de medida (ART), proporcionando o cálculo do custo industrial do processo. Na Tab. 7.19 são apresentados os dados de custo de cada processo k em cada período t (MCI_{kt}).

Tabela 7.19 - Custo de cada processo em cada período - Estudo de Caso

Semanas	$MCI_{k,t}$ (u.m./ton)	Semanas	$MCI_{k,t}$ (u.m./ton)
	Processo 1		Processo 1
Sem 1	9,0278	Sem 16	11,5233
Sem 2	9,1751	Sem 17	11,5221
Sem 3	9,4337	Sem 18	11,6930
Sem 4	9,4626	Sem 19	11,1139
Sem 5	9,7758	Sem 20	11,0869
Sem 6	9,7687	Sem 21	11,0533
Sem 7	9,7591	Sem 22	10,5293
Sem 8	9,9300	Sem 23	9,7479
Sem 9	10,2132	Sem 24	11,0254
Sem 10	10,3643	Sem 25	11,0955
Sem 11	10,5370	Sem 26	11,0625
Sem 12	10,8457	Sem 27	10,5632
Sem 13	10,9857	Sem 28	9,7749
Sem 14	11,1762	Sem 29	10,4799
Sem 15	11,5644	Sem 30	9,7567

7.1.2. Aplicação 1: Planejamento agregado da produção de uma usina instalada

Neste modelo, não tem uma matriz de produção definida, apenas os parâmetros e equações estabelecidos até o momento. Dessa forma, apenas as matrizes auxiliares de açúcar e álcool, $MAS_{kp,ps}$ e $MDA_{kp,pa}$, respectivamente, são controladas pelo usuário. Ao final do programa ter-se-á a matriz de produção (x% açúcar e y% álcool) de acordo com a maximização da margem agroindustrial.

O problema tem 630 variáveis e 1.621 restrições. Apesar do elevado número de restrições, o tempo computacional requerido para executar um problema do tipo DPDL/PU desta situação é muito pequeno, cerca de 10 segundos.

É importante observar que existe uma diferença nos valores totais das variáveis consideradas no modelo, em virtude dos limites de compatibilidade estabelecidos nas Eq.

5.61 a 5.67. Verificou-se que estes limites estabeleceram um percentual de perda de matéria-prima de cerca de 10,39% entre a cana-de-açúcar disponível e colhida, de aproximadamente 15,35% entre a cana-de-açúcar colhida e transportada, e de 2,25% entre a cana-de-açúcar transportada e processada. Fato este que será notado nas Fig. 7.7 e 7.8.

O Anexo I apresenta as tabelas com os valores de saída para cada uma das variáveis inseridas no modelo.

As figuras (7.1) a (7.5) mostram os resultados obtidos para a quantidade de cana-de-açúcar disponível, colhida, transportada, moída/processada, e a quantidade dos produtos finais estocados durante o horizonte de planejamento considerado na análise e para o tipo de transporte utilizado. Ainda são exibidos a matriz de produção, o total semanal das variáveis do modelo e o total da safra para o estudo de caso.

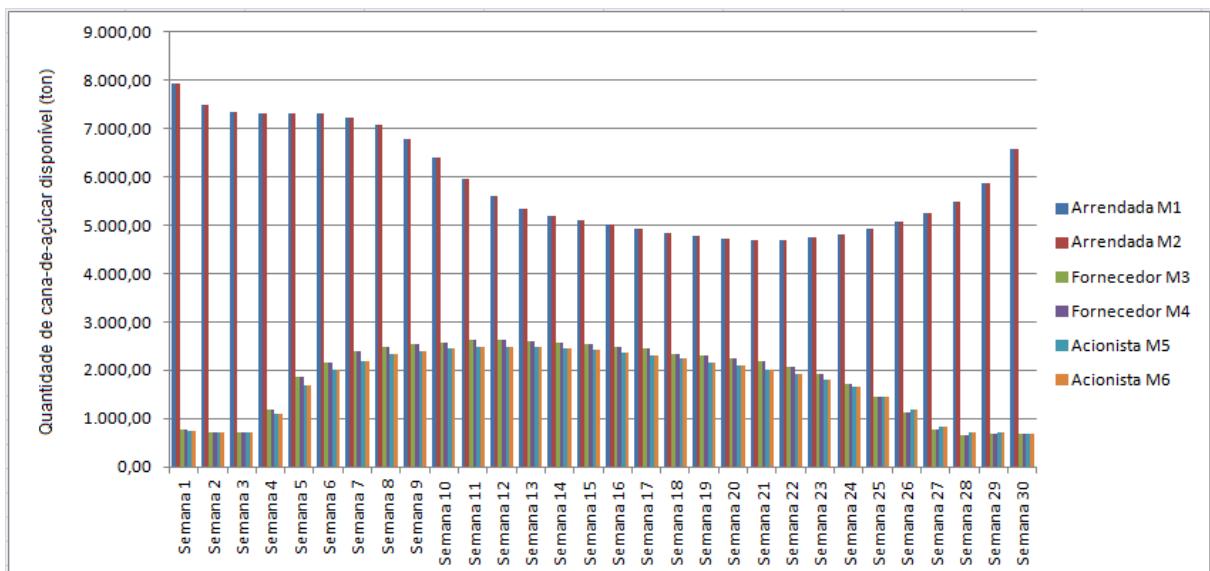


Figura 7.1 – Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 1

Verifica-se pela Fig. 7.1 que as fontes de suprimento de cana-de-açúcar arrendada apresentam uma disponibilidade de matéria-prima superior às demais. Observa-se que estes valores diferem do que hoje é executado pela usina, onde as fontes de suprimento de cana-de-açúcar dos fornecedores apresentam disponibilidade superior à arrendada e de acionistas, conforme apresentado no Capítulo 6 na Tab. 6.2.

Outra observação é que no decorrer da safra, a disponibilidade de cana-de-açúcar arrendada foi diminuindo e das outras fontes aumentando, e na semana 24 esse cenário foi se alterando novamente.

Pode-se constatar na Fig. 7.1 que o modelo buscou atender ao parâmetro de porcentagem de cana-de-açúcar de fornecedor durante toda a safra (PCF_i) na Tab. 7.5, ou seja, nas semanas 1, 2, 3, 28, 29 e 30 houve uma disponibilidade inferior de cana-de-açúcar de fornecedor.

Observa-se pela Fig. 7.2 que a semana cinco foi o período em que houve uma maior quantidade de cana-de-açúcar colhida. A fonte de suprimento de arrendamento (M1) teve uma maior quantidade de cana-de-açúcar colhida nas três primeiras semanas, e no restante da safra a maior quantidade de cana-de-açúcar colhida foi da fonte de suprimento de fornecedores.

Importante destacar que apesar da quantidade de cana-de-açúcar colhida por semana em cada fonte de suprimento ser superior à estabelecida pela usina (Capítulo 6 - Tab. 6.2), houve uma relação na porcentagem de acordo com o tipo de fonte de suprimento. Dessa forma, para a usina, eram colhidas 63.210 toneladas de cana-de-açúcar de cada arrendamento, 102.060 toneladas de cana-de-açúcar de cada fornecedor e 59.430 toneladas de cana-de-açúcar de cada acionista e o modelo respeitou essa ordem em relação à quantidade de cana-de-açúcar colhida de cada fonte de fornecimento (71.596,30 toneladas de cana-de-açúcar do tipo arrendada, 115.545,80 toneladas de cana-de-açúcar do tipo fornecedor e 67.363,70 toneladas de cana-de-açúcar do tipo acionista).

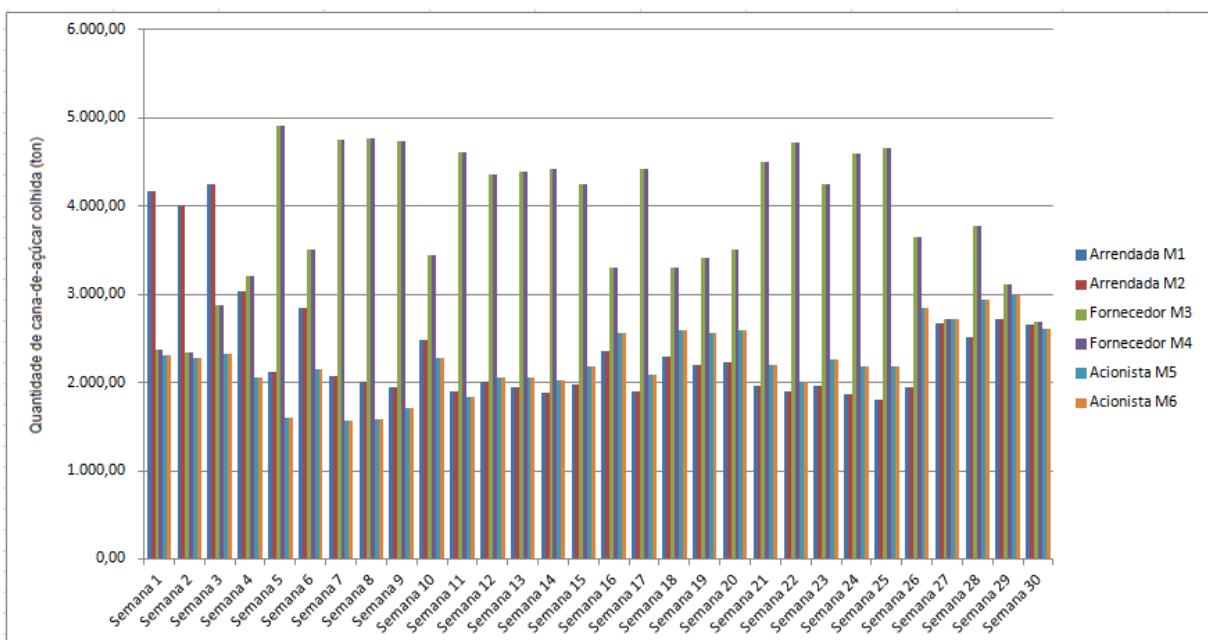


Figura 7.2 – Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 1

Pela Fig. 7.3 nota-se que o transporte ocorreu de uma forma praticamente homogênea durante toda a safra, exceto nas semanas três e 28. Esta característica mostra que a operação de transporte conseguiu atingir o objetivo de atendimento contínuo de cana-de-açúcar na usina para moagem. Em todas as semanas, a capacidade de transporte da frota terceirizada considerada foi mais do que suficiente para atender ao transporte de matéria-prima das frentes de corte até a usina.

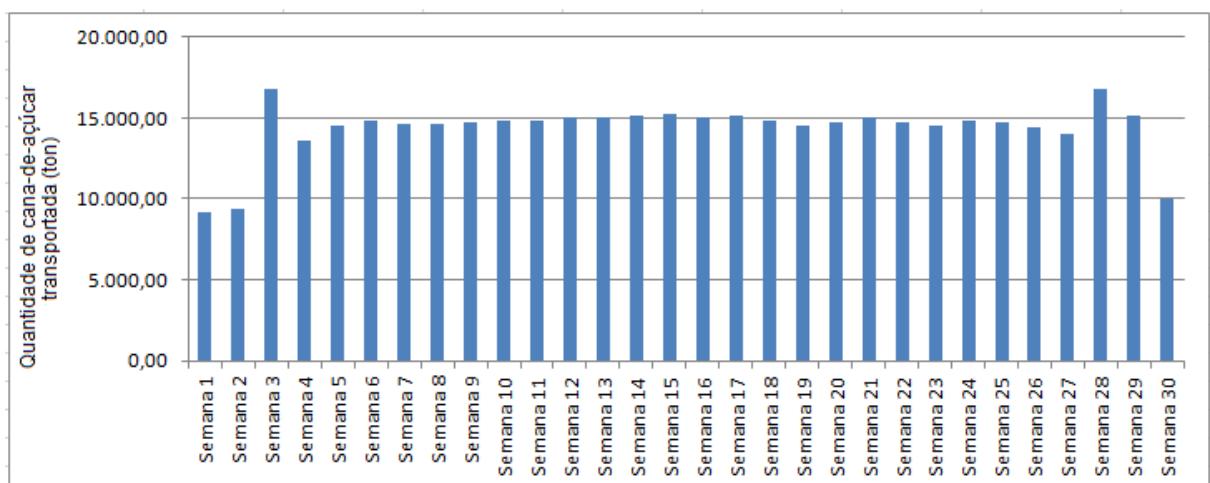


Figura 7.3 – Quantidade de cana-de-açúcar transportada das frentes de corte para a usina no Estudo de Caso – Aplicação 1

Verifica-se pela Fig. 7.4 que em todas as semanas a quantidade de cana-de-açúcar moída/processada para produzir o açúcar, o melaço e os álcoois se manteve uniforme, exceto nas quatro primeiras e nas quatro últimas semanas da safra, fato que pode ser justificado pela necessidade de alta quantidade de cana-de-açúcar processada no início da safra porque o estoque de matéria-prima e de produtos finais é nulo e existe a necessidade de alcance da produção necessária para cumprir com a demanda dos produtos.

Observa-se ainda na Fig. 7.4 que o modelo teve dificuldade em atender à restrição de moagem máxima por semana. Isto pode ser verificado nas semanas 1, 2, 3, 28, 29 e 30.

A quantidade de cana-de-açúcar produzida para a produção do açúcar obteve um total de 327.222,31 toneladas, para a produção do melaço foram necessárias 32.898,25 toneladas de cana-de-açúcar, para o álcool hidratado (AEHC) a quantidade de cana-de-açúcar processada atingiu 30.518,42 toneladas, e para a produção do álcool anidro (AEAC) utilizou-se 30.526,02 toneladas de cana-de-açúcar.

Observa-se na Fig. 7.5 que a quantidade de produtos finais produzidos pela usina está compatível com a quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção de cada produto, conforme mostra a Fig. 7.4. Verifica-se também que há estoque no último período

de análise da safra, fato que é considerado nas restrições com a utilização da penalização pelo uso do estoque no período entressafra.

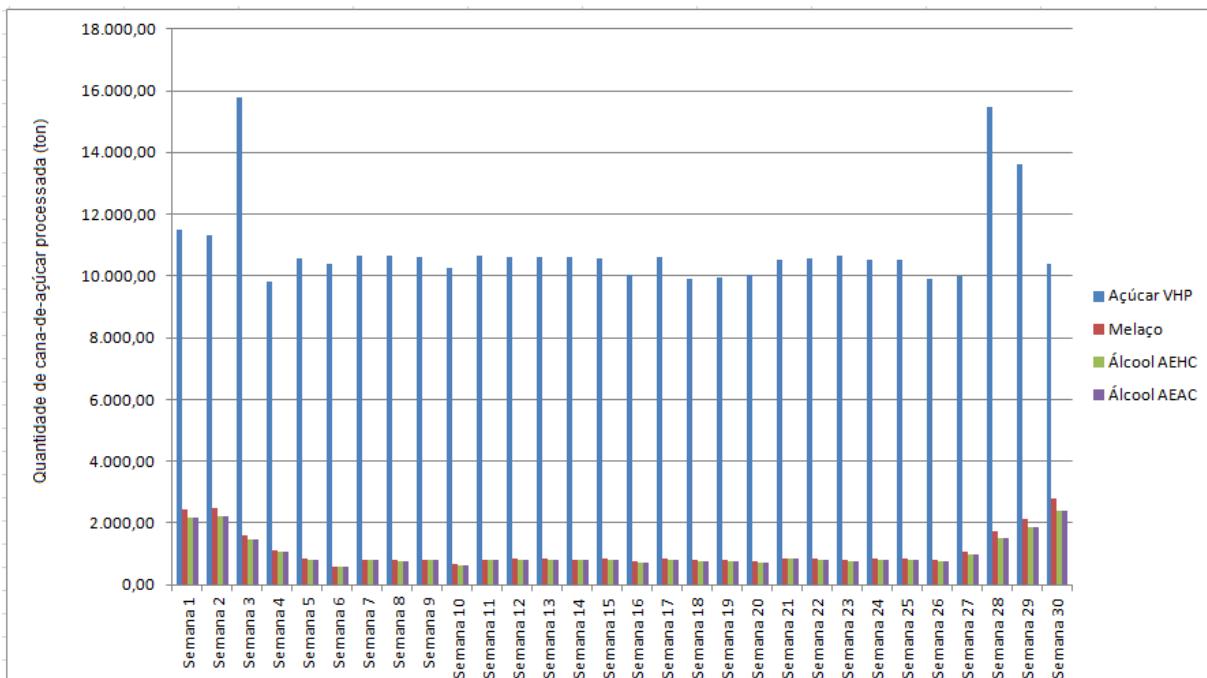


Figura 7.4 – Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 1

Obteve-se um total de 47.716 toneladas de açúcar VHP, 1.440,94 toneladas de melaço, 2.713 m³ de álcool hidratado (AEHC) e 2.630 m³ de álcool anidro (AEAC). Esses valores comprovam o atendimento à demanda de cada produto estabelecida na Tab. 7.10 considerando a restrição apresentada pelas Eq. 5.61 e 5.62. Verifica-se também que a capacidade de estoque por tipo de produto foi suficiente para esta situação.

O rendimento industrial obtido foi de 145,82 kg/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção do açúcar e de 87,53 litros/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção dos álcoois. Estes valores são superiores aos valores conseguidos pela usina, 144,38 kg/tonelada de cana-de-açúcar e de 82,94 litros/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção do açúcar e dos álcoois, respectivamente.

Pode ser observado na Fig. 7.6 que a matriz de produção é composta apenas pelo açúcar e álcoois. Este fato é justificado porque o melaço é um subproduto, ou seja, sua fabricação é consequência da produção dos produtos principais da usina e o custo envolvido na produção é diretamente relacionado à quantidade de açúcar e álcool produzida.

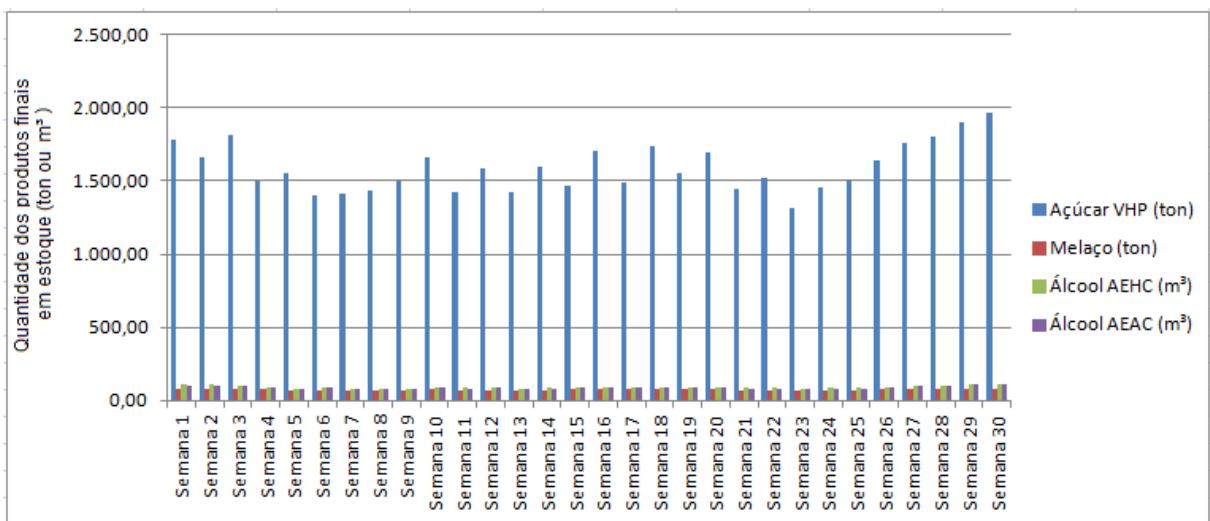


Figura 7.5 – Quantidade dos produtos finais no estoque próprio nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 1

A matriz de produção foi composta por 84,28% de açúcar e 15,72% de álcool, valores muito diferentes do que é praticado na usina do estudo de caso (32,12% de açúcar e 67,88% de álcool). Verifica-se ainda pela Fig. 7.6 que a determinação da matriz auxiliar de produção dos álcoois foi atendida, pois a produção do álcool anidro e do álcool hidratado foi de 50% para cada.

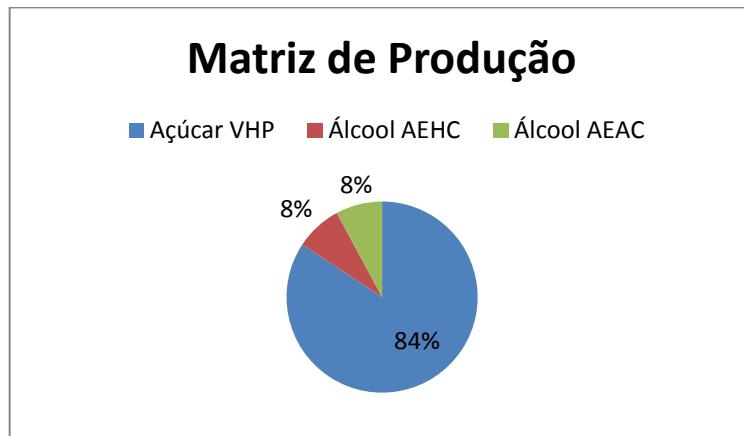


Figura 7.6 – Matriz de produção do Estudo de Caso – Aplicação 1

Verifica-se pela Fig. 7.7 que nas semanas 3 e 23 a 29 as restrições de compatibilidade entre a variável XD_{mt} e XC_{mt} não foram obedecidas, e o mesmo aconteceu nas semanas 1, 2, 3, 28, 29 e 30 para as variáveis XT_{st} e XK_{pt} . É muito importante lembrar que os parâmetros e dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos em várias fontes, logo, pode ser que haja uma incompatibilidade técnica e/ou numérica entre os valores considerados e que

são diretamente relacionados. Dessa forma, o modelo teve dificuldade em obedecer à todas as restrições.

Verifica-se pela Fig. 7.8 o atendimento do modelo aos limites de compatibilidade estabelecidos. Assim, o modelo gerou um total de 568.056,94 toneladas de cana-de-açúcar para a variável de disponibilidade de matéria-prima (XD_{mt}), de 509.011,60 toneladas de cana-de-açúcar para a quantidade de cana-de-açúcar colhida (XC_{mt}), 430.858,00 toneladas de cana-de-açúcar transportadas (XT_{st}) e o total de 421.165,00 toneladas de cana-de-açúcar processadas (XK_{pt}).

Finalmente, vale ressaltar que o valor ótimo encontrado para a margem de contribuição agroindustrial foi de R\$ 5.583.500,00 para a safra considerando os parâmetros adotados.

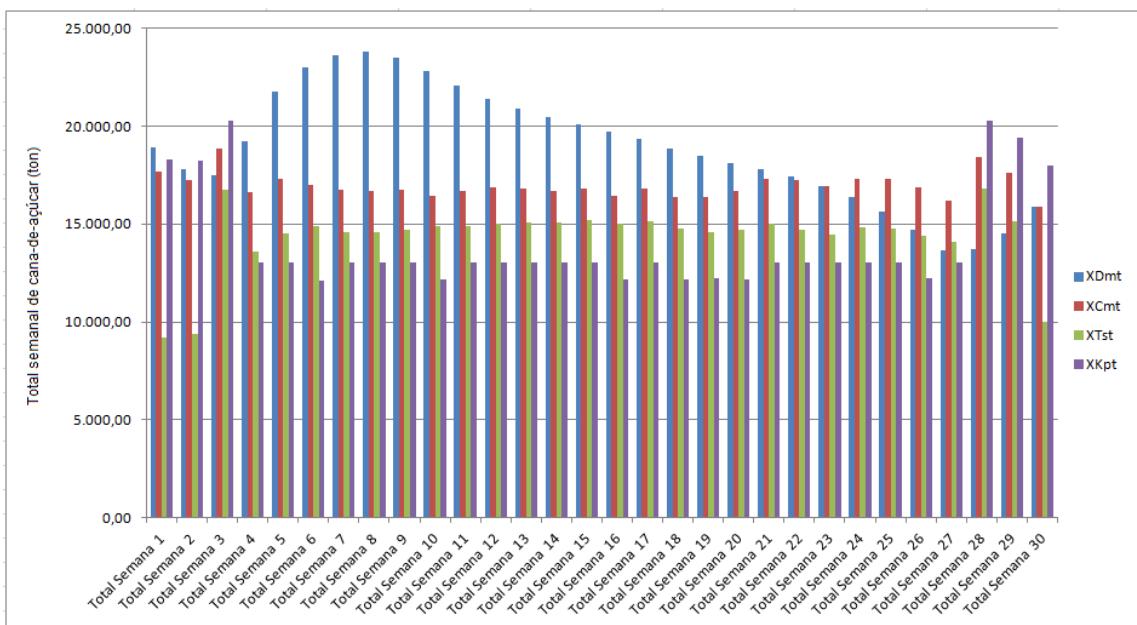


Figura 7.7 – Total semanal para as variáveis do Estudo de Caso – Aplicação 1

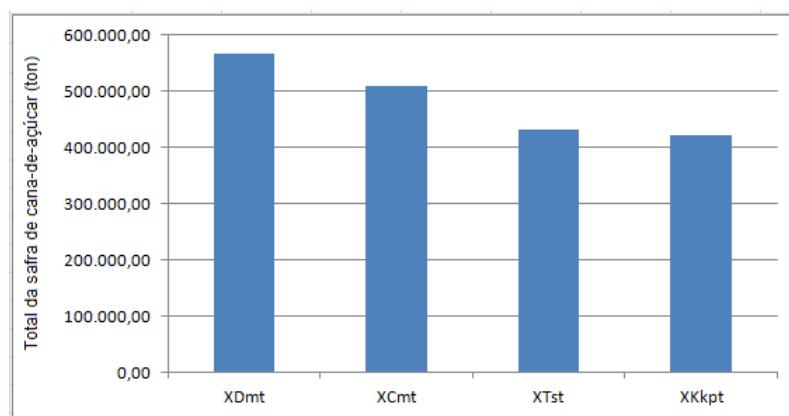


Figura 7.8 – Total da safra para o Estudo de Caso – Aplicação 1

7.1.3. Aplicação 2: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pelo usuário do modelo

Este modelo é definido pelos parâmetros e equações estabelecidos até o momento, porém foram acrescentadas ao modelo matemático duas restrições relacionadas à matriz de produção. Assim, além das matrizes auxiliares de açúcar e álcool, $MAS_{kp,ps}$ e $MDA_{kp,pa}$, respectivamente, tem-se dois parâmetros *alfa* e *beta* que são definidos pelo usuário. Esses parâmetros definem a matriz de produção (x% açúcar (*alfa*) e y% álcool (*beta*)), ou seja, a porcentagem de açúcar e de álcool que será produzida. Obviamente deve-se impor que a soma de *alfa* e *beta* deve ser igual a um (*alfa* + *beta*=100%).

As restrições acrescentadas estão apresentadas pelas Eq. (7.3) e (7.4).

$$\text{beta} \sum_{ps} XK_{ps} - \text{alfa} \sum_{pa} XK_{pa} = 0 \quad (7.3)$$

$$\text{alfa} \sum_{pa} XK_{pa} - \text{beta} \sum_{ps} XK_{ps} = 0 \quad (7.4)$$

A Eq. (7.3) representa a restrição para a produção do açúcar, e a Eq. (7.4) representa a restrição para a produção do álcool de acordo com a matriz de produção estabelecida. Dessa forma, o parâmetro *alfa* é a porcentagem que se pretende obter de açúcar e o parâmetro *beta* corresponde à porcentagem de álcool na matriz de produção.

Se *alfa*=*beta*, as Eq. (7.3) e (7.4) serão equivalentes.

Sendo assim, o número de variáveis permanece inalterado, mas o número de restrições desta situação pode ser calculado pela Eq. (7.5).

$$\begin{aligned} \text{Número de Restrições} = & \{[m + s + p + m + (p.e)]t\} + t + t + (p.e.t) + (s.t) + \\ & + t + t + t + (m.t) + 1 + t + t + (m.t) + (p.t) + (p.t) + t + 2 \end{aligned} \quad (7.5)$$

O problema tem 630 variáveis e 1.623 restrições. Apesar do elevado número de restrições, o tempo computacional requerido para executar esta situação é 11,3 segundos.

Os resultados foram gerados considerando os valores estabelecidos pelo gerente industrial como a matriz de produção “ideal”, de forma a compararmos os resultados. Sendo assim, *alfa* recebeu o valor de 60% e *beta* teve seu valor definido em 40%. A matriz auxiliar de açúcar, $MAS_{kp,ps}$, e a matriz auxiliar de álcool, $MDA_{kp,pa}$, mantiveram seus valores, conforme apresentado na Tab. 7.4.

Em virtude dos limites de compatibilidade estabelecidos nas Eq. 5.61 a 5.67 pode-se verificar que estes limites estabeleceram um percentual de perda de matéria-prima de cerca

de 11,50% entre a cana-de-açúcar disponível e colhida, de aproximadamente 22,10% entre a cana-de-açúcar colhida e transportada, e de 8,49% entre a cana-de-açúcar transportada e processada. Fato este que será notado nas Fig. 7.15 e 7.16.

O Anexo II apresenta as tabelas com os valores de saída para cada uma das variáveis inseridas no modelo.

As figuras (7.9) a (7.13) mostram os resultados obtidos para a quantidade de cana-de-açúcar disponível, colhida, transportada, moída/processada, e a quantidade dos produtos finais estocados durante o horizonte de planejamento considerado na análise e para o tipo de transporte utilizado. Ainda são exibidos a matriz de produção, o total semanal das variáveis do modelo e o total da safra para esta situação.

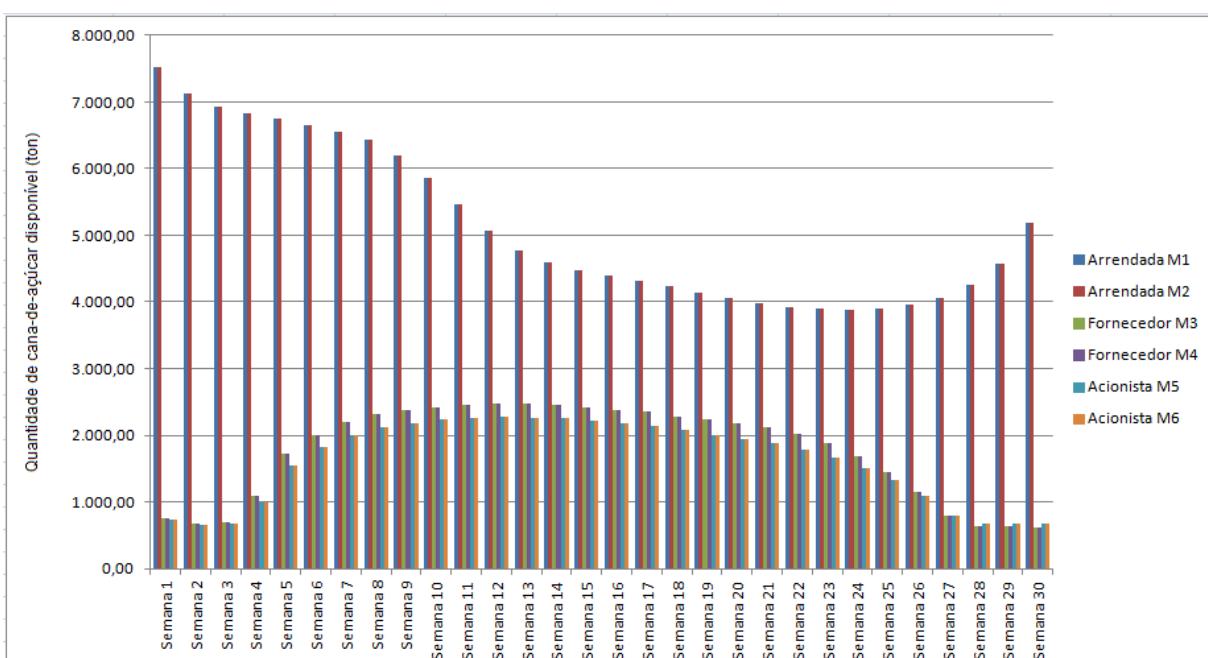


Figura 7.9 – Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 2

Observa-se na Fig. 7.9 que as fontes de suprimento de cana-de-açúcar arrendada apresentam uma disponibilidade de matéria-prima superior às demais. Na semana 4 a disponibilidade de cana-de-açúcar de fornecedor e de acionista começou a aumentar e se manteve até a semana 21, quando a quantidade disponível de cana-de-açúcar arrendada tornou a aumentar.

Observa-se pela Fig. 7.10 que a semana 23 foi o período em que houve uma maior quantidade de cana-de-açúcar colhida. As fontes de suprimento de fornecedores (M3 e M4) tiveram uma maior quantidade de cana-de-açúcar colhida em toda a safra, seguidas pelas canas-de-açúcar dos acionistas e, por fim, das canas-de-açúcar de arrendamento.

Pela Fig. 7.11 nota-se que nas duas primeiras semanas o transporte utilizou aproximadamente 36% da capacidade utilizada na semana 14, onde ocorreu o transporte da maior quantidade de matéria-prima (13.395 toneladas). Em todas as semanas, a capacidade de transporte da frota terceirizada considerada foi mais do que suficiente para atender ao transporte de matéria-prima das frentes de corte até a usina.

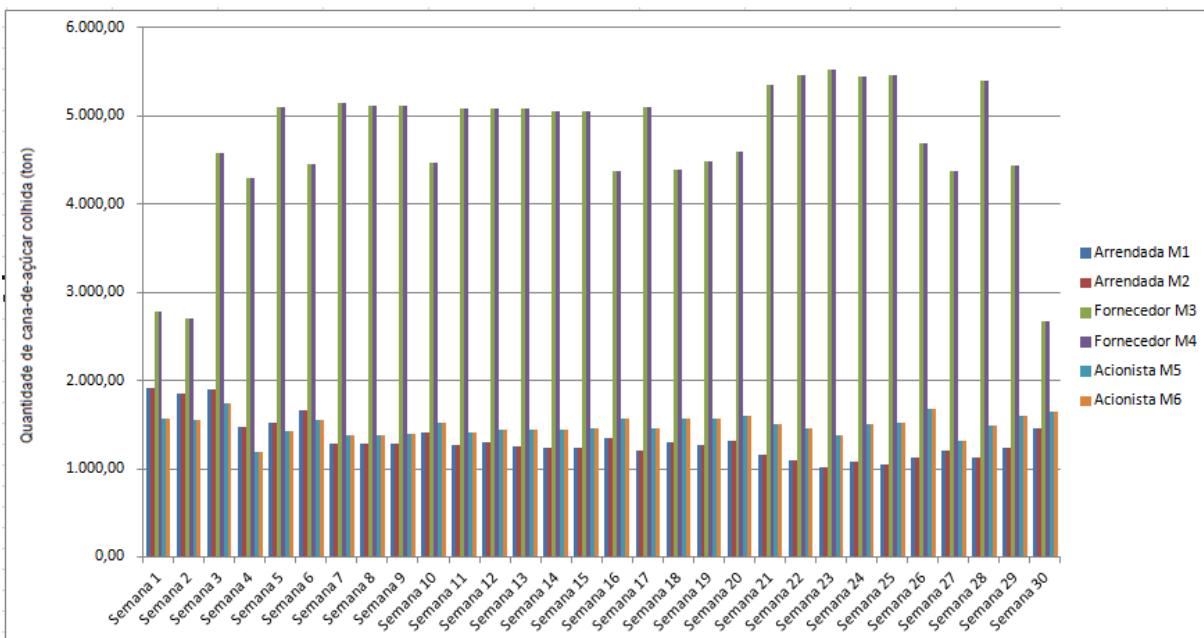


Figura 7.10 – Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 2

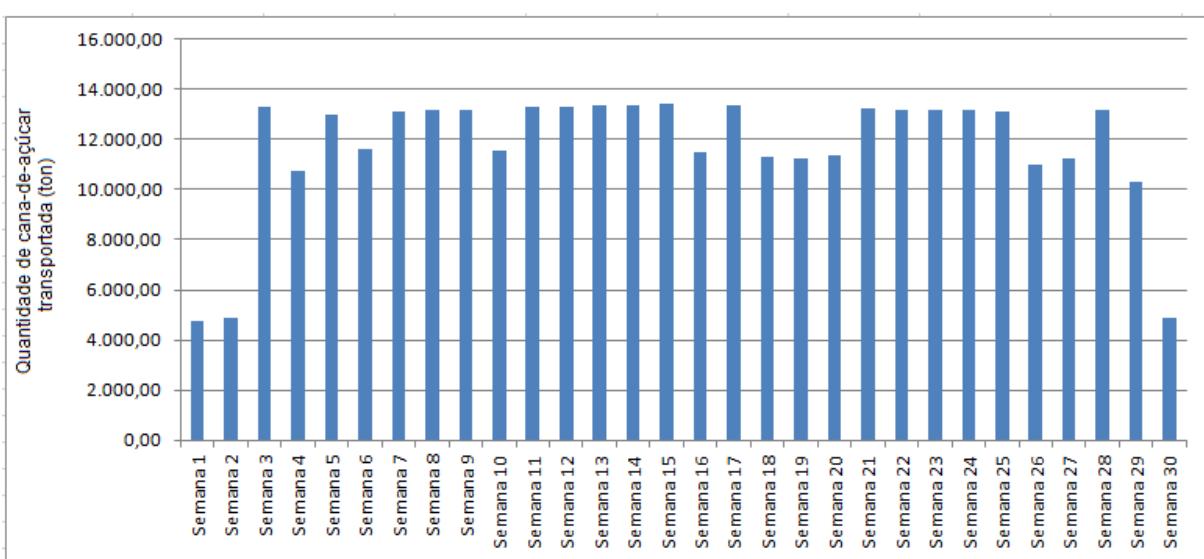


Figura 7.11 – Quantidade de cana-de-açúcar transportada das frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 2

Verifica-se pela Fig. 7.12 que a quantidade total de cana-de-açúcar moída/processada em toda a safra se manteve uniforme, exceto nas três primeiras e nas três últimas semanas, exatamente nas semanas onde ocorreu o não atendimento pelo modelo à restrição de moagem máxima por semana.

Outra observação pode ser feita com relação às semanas 3 e 28 onde houve um processamento de cana-de-açúcar superior aos demais para a produção de açúcar e nas semanas 1, 2, 29 e 30 para a produção dos álcoois, principalmente para o álcool anidro (AEAC).

A quantidade de cana-de-açúcar produzida para a produção do açúcar obteve um total de 154.852,63 toneladas, para a produção do melaço foram necessárias 16.946,67 toneladas de cana-de-açúcar, para o álcool hidratado (AEHC) a quantidade de cana-de-açúcar processada atingiu 68.638,78 toneladas, e para a produção do álcool anidro (AEAC) utilizou-se 81.155,92 toneladas de cana-de-açúcar, totalizando 321.594,00 toneladas de cana-de-açúcar processada em toda a safra.

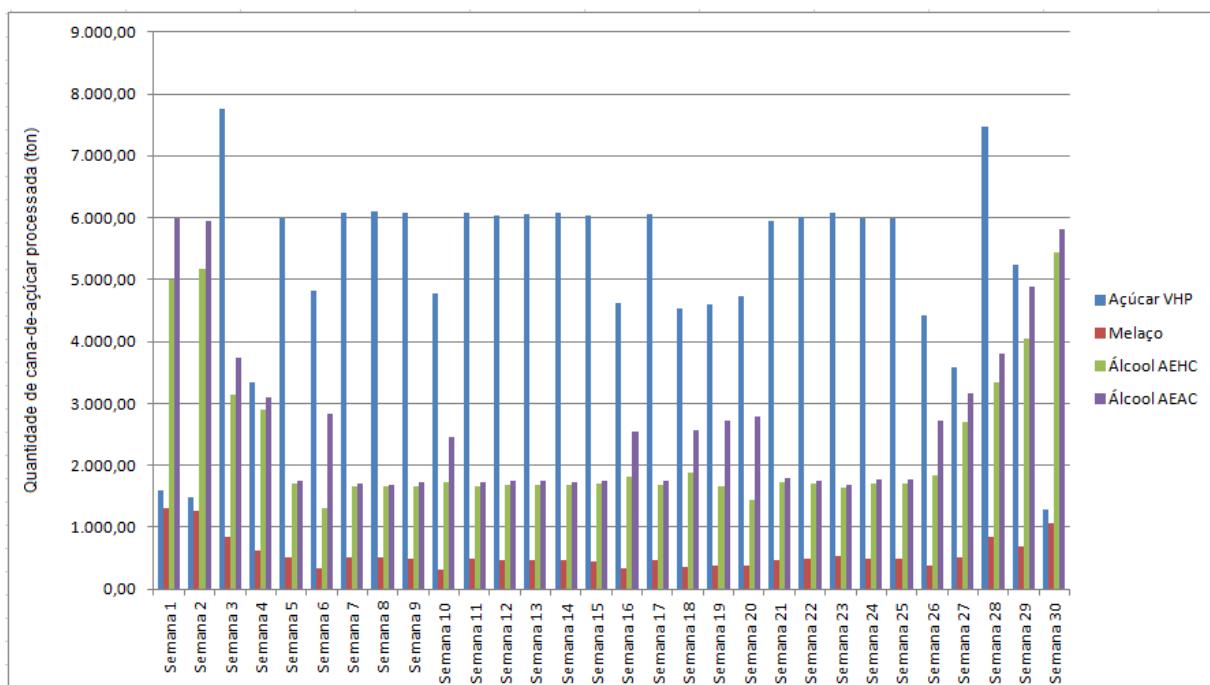


Figura 7.12 – Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais nas frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 2

Observa-se na Fig. 7.13 que a quantidade de produtos finais produzidos pela usina está compatível com a quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção de cada produto, conforme mostrado na Fig. 7.12. Verifica-se também que há estoque no último período de análise da safra, principalmente para os álcoois.

Obteve-se um total de 22.626 toneladas de açúcar VHP, 1.046 toneladas de melaço, 5.522 m³ de álcool hidratado (AEHC) e 6.735 m³ de álcool anidro (AEAC). Como se está realizando um planejamento para implantação de uma usina verifica-se que não há uma obrigatoriedade de atender à demanda de cada produto estabelecida na Tab. 7.10. Estes dados refletem a determinação de uma capacidade de atendimento à demanda futura necessária. Assim, os contratos de vendas dos produtos (definição da demanda a ser atendida) podem ser estabelecidos de acordo com a quantidade de produtos fabricados por semana.

O rendimento industrial obtido foi de 146,11 kg/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção do açúcar e de 81,72 litros/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção dos álcoois.

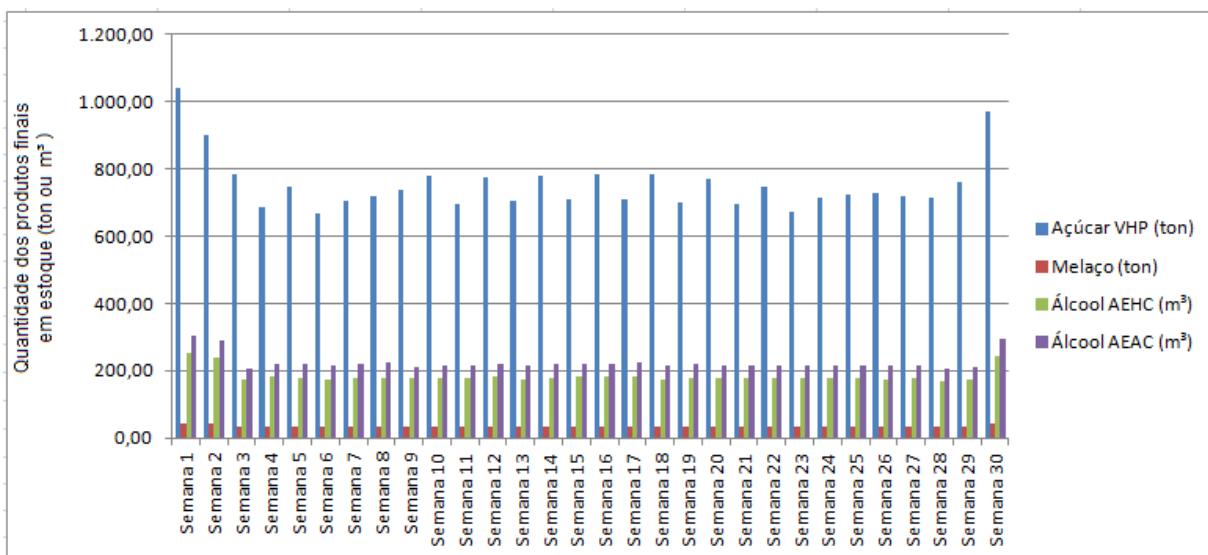


Figura 7.13 – Quantidade dos produtos finais no estoque próprio nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 2

Observa-se na Fig. 7.14 que a matriz de produção foi composta por 50,83% de açúcar e 49,17% de álcool, ou seja, apesar de termos inicialmente definido a matriz de produção em 60% de açúcar e 40% de álcool, para atender à função objetivo (maximização da margem de contribuição agroindustrial) e as restrições impostas ao problema, o modelo alterou estes valores. Porém, é possível notar que o modelo tentou se limitar aos parâmetros inicialmente estabelecidos. Verifica-se ainda que a determinação da matriz auxiliar de produção dos álcoois foi estabelecida como 54% de álcool anidro (AEAC) e 46% de álcool hidratado (AEHC).

Verifica-se pela Fig. 7.15 que esta aplicação apresentou comportamento similar ao observado na Fig. 7.7 da Aplicação 1.

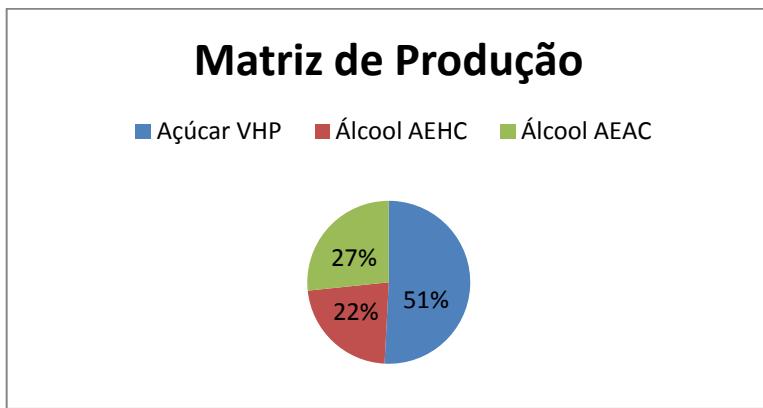


Figura 7.14 – Matriz de produção do Estudo de Caso – Aplicação 2

Realizando-se um comparativo entre as Fig. 7.6 e 7.14 pode-se constatar que quando o modelo tem liberdade para criar a matriz de produção, este consegue obter uma produção mais rentável para a usina do Estudo de Caso.

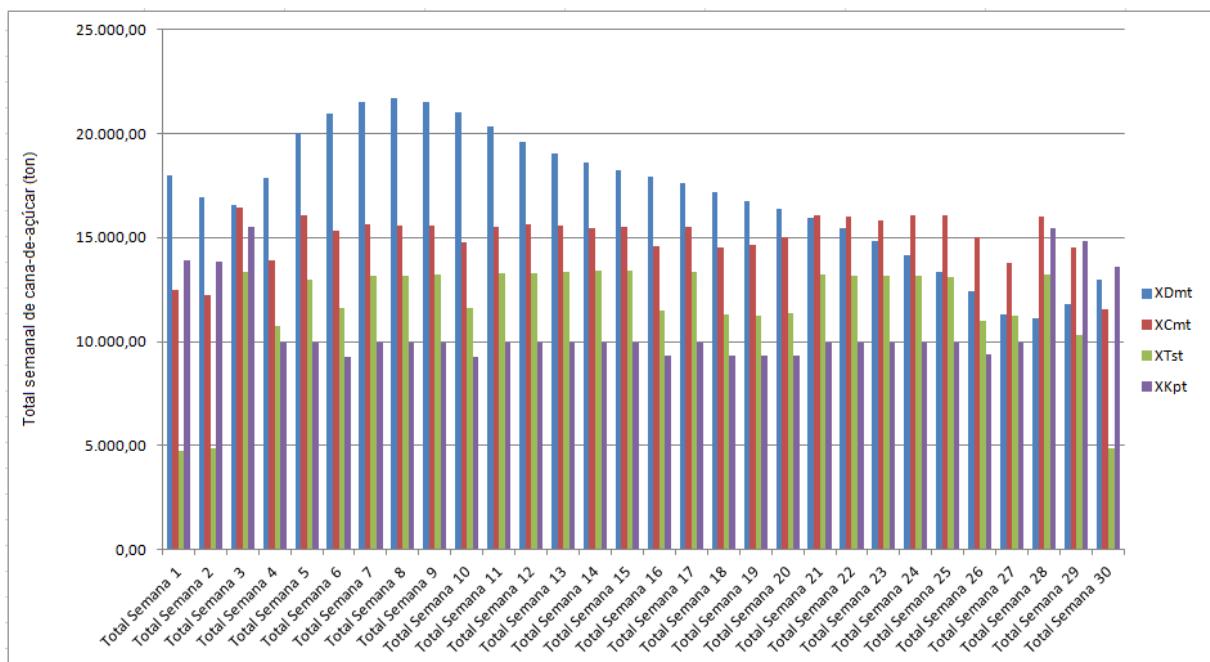


Figura 7.15 – Total semanal para as variáveis do Estudo de Caso – Aplicação 2

Verifica-se pela Fig. 7.16 que, apesar de em algumas semanas ter havido o não atendimento à algumas restrições, em uma análise global da safra houve o atendimento do modelo aos limites de compatibilidade estabelecidos. Assim, o modelo gerou um total de 511.268,70 toneladas de cana-de-açúcar para a variável de disponibilidade de matéria-prima (XD_{mt}), de 450.854,20 toneladas de cana-de-açúcar para a quantidade de cana-de-açúcar

colhida (XC_{mt}), 351.400,00 toneladas de cana-de-açúcar transportadas (XT_{st}) e o total de 321.594,00 toneladas de cana-de-açúcar processadas (XK_{pt}).

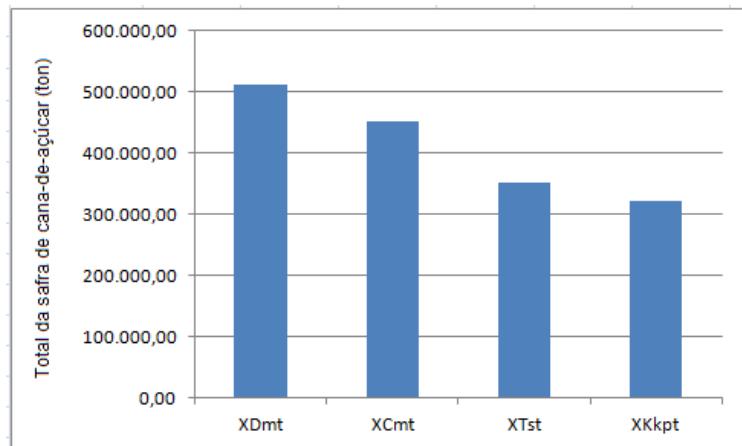


Figura 7.16 – Total da safra do Estudo de Caso – Aplicação 2

O valor ótimo encontrado para a margem de contribuição agroindustrial foi de R\$ 6.144.000,00 para a safra considerando os parâmetros adotados.

7.1.4. Aplicação 3: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo

Este modelo se diferencia do anterior porque os parâmetros *alfa* e *beta* e os dados das matrizes auxiliares de açúcar e álcool, $MAS_{kp,ps}$ e $MDA_{kp,pa}$, respectivamente, serão otimizados pelo programa.

Deve-se observar que a quantidade de produtos finais continua a mesma, definindo que: y_1 representa o açúcar VHP, y_2 representa o álcool hidratado e y_3 o álcool anidro.

Na Aplicação 3 os parâmetros correspondentes à escolha do processo serão considerados como variáveis a serem otimizadas. Desta forma, os dados da Tab. 7.4 serão substituídos pela Tab. 7.20.

Tabela 7.20 - Dados correspondentes ao processo escolhido - Estudo de Caso – Aplicação 3

Processo	Características técnicas do processo						
	DECD _{kp} (Unit)	DEH _{kp} (Unit)	POS _{kp} (%)	UMS _{kp} (%)	MAS _{kp,ps} (Unit)	MDA _{kp,pa} (Unit)	
					VHP	AEHC	AEAC
	0,9	0,33	99,3	0,1	y_1	y_2	y_3

De forma similar às outras aplicações, deve-se considerar que a soma dos tipos de açúcar deve ser igual a 100% e a soma dos tipos de álcool também deve ser igual a 100%.

As restrições que foram acrescentadas na Aplicação 2, dadas pelas Eq. (7.3) e (7.4) serão reescritas como:

$$y_5 \sum_{ps} XKps - y_4 \sum_{pa} XKpa = 0 \quad (7.6)$$

$$y_4 \sum_{pa} XKpa - y_5 \sum_{ps} XKps = 0 \quad (7.7)$$

$$y_4 + y_5 = 1 \quad (7.8)$$

$$y_2 + y_3 = 1 \quad (7.9)$$

$$y_1 = 1 \quad (7.10)$$

A variável y_1 refere-se ao parâmetro de composição da matriz auxiliar de açúcar e as variáveis y_2 e y_3 referem-se aos parâmetros de composição da matriz auxiliar de álcool, que nesta situação, serão considerados como variáveis a serem otimizadas conforme exibido na Tab. 7.20.

As variáveis y_4 e y_5 correspondem, respectivamente, aos parâmetros constantes *alfa* e *beta* adotados na Aplicação 1. Se $y_4 = y_5$, as Eq. (7.6) e (7.7) serão equivalentes.

Para a Aplicação 3 tornou-se necessário utilizar um método híbrido de otimização conforme esquematizado na Fig. 7.17.

Para a execução deste modelo foi necessário realizar um laço externo, devido a não linearidade introduzida no problema, utilizando o *toolbox* fmincon do Matlab. Este código computacional encontra o mínimo de uma função multivariável sujeita a restrições não lineares. Assim, conforme pode ser observado na Fig. 7.17, este modelo vai gerando valores para as novas variáveis y_i de forma a obedecer às novas restrições impostas e ao mesmo tempo maximizar a função objetivo - margem de contribuição agroindustrial - do programa principal. Foram necessárias 141 iterações e um tempo computacional de cerca de 1380 segundos (23 minutos) para obter a melhor solução para esta situação.

Como mencionado anteriormente foram definidos limites de compatibilidade estabelecidos nas Eq. 5.61 a 5.67 que representam as perdas de matéria-prima ocorridas no processo, os quais estabeleceram um percentual de perda de matéria-prima de cerca de 12,67% entre a cana-de-açúcar disponível e colhida, de aproximadamente 16,33% entre a

cana-de-açúcar colhida e transportada, e de 13,5% entre a cana-de-açúcar transportada e processada. Fato este que será notado nas Fig. 7.24 e 7.25.

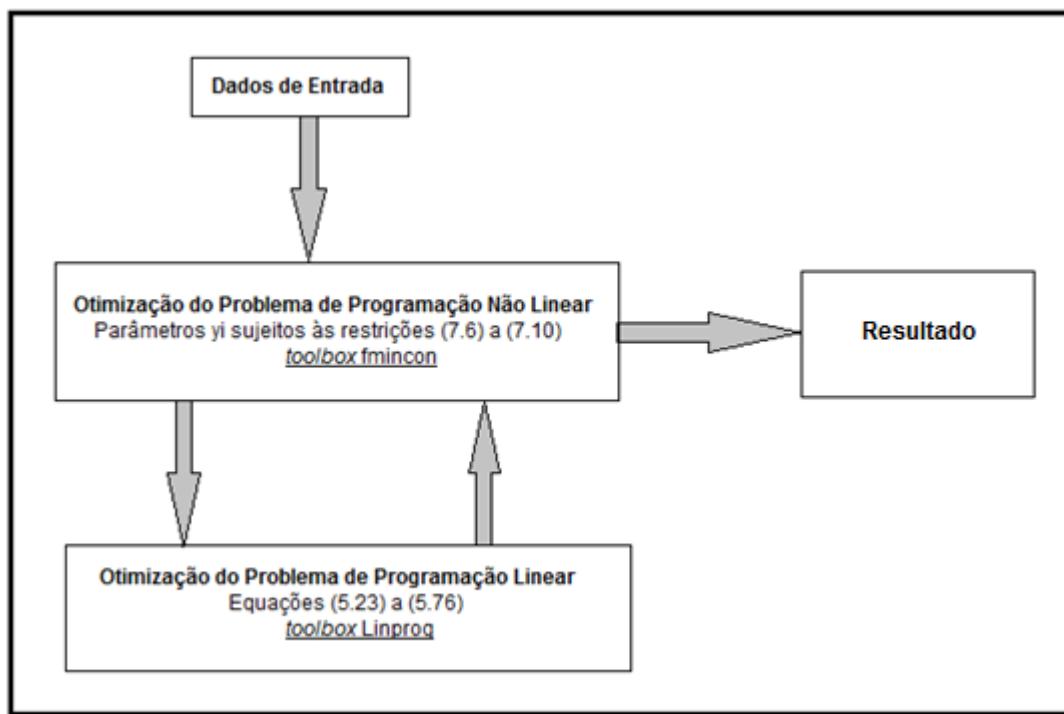


Figura 7.17 – Otimização Híbrida – Estudo de Caso – Aplicação 3

O Anexo III apresenta as tabelas com os valores de saída para cada uma das variáveis inseridas no modelo.

As figuras (7.18) a (7.22) mostram os resultados obtidos para a quantidade de cana-de-açúcar disponível, colhida, transportada, moída/processada, e a quantidade dos produtos finais estocados durante o horizonte de planejamento considerado na análise e para o tipo de transporte utilizado. Ainda são exibidos a matriz de produção, o total semanal das variáveis do modelo e o total da safra para o estudo de caso.

Observa-se na Fig. 7.18 que as fontes de suprimento de cana-de-açúcar arrendada apresentam uma disponibilidade de matéria-prima superior às demais. Na semana 4 a disponibilidade de cana-de-açúcar de fornecedor e de acionista começou a aumentar e se manteve até a semana 19, quando a quantidade disponível de cana-de-açúcar arrendada tornou a aumentar.

Observa-se pela Fig. 7.19 que a semana 23 foi o período em que houve uma maior quantidade de cana-de-açúcar colhida. Somente nas cinco primeiras semanas a quantidade de cana-de-açúcar colhida das fontes de suprimento do tipo arrendada foi superior à quantidade de cana-de-açúcar dos fornecedores.

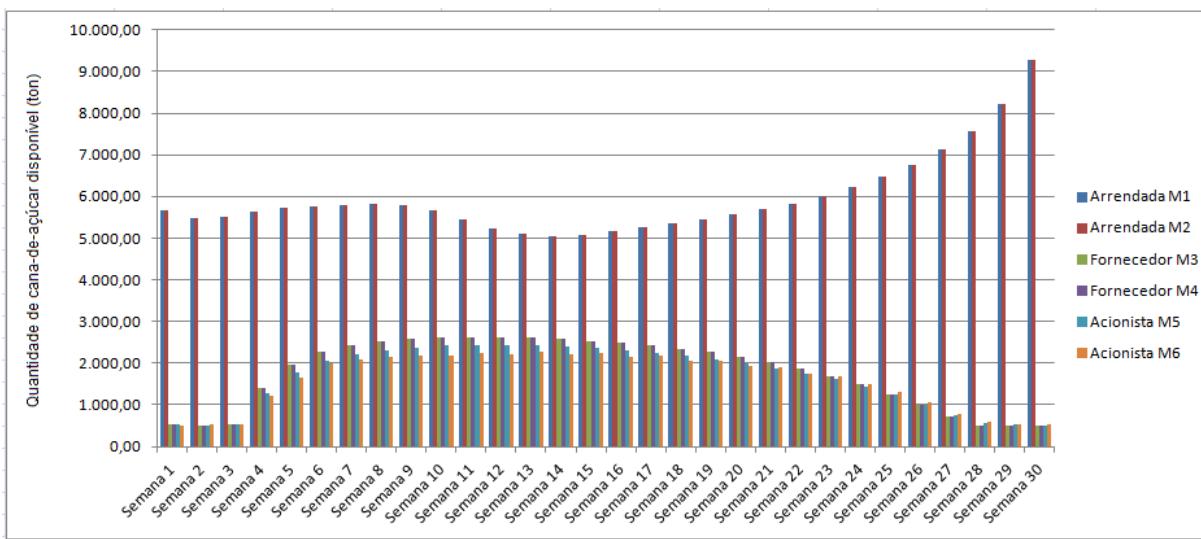


Figura 7.18 – Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 3

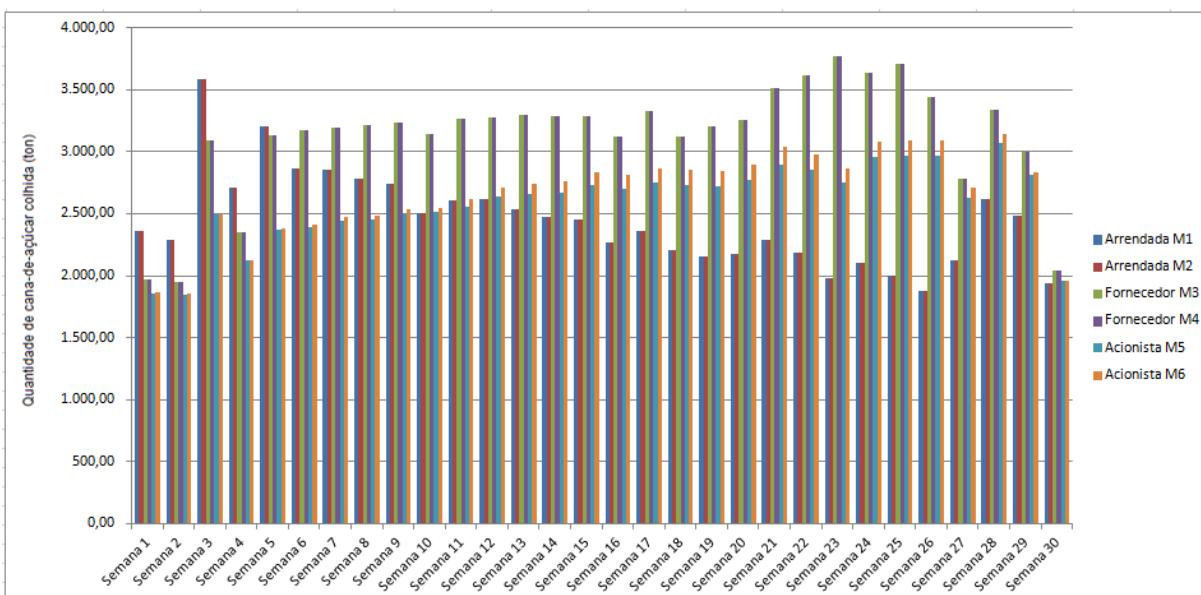


Figura 7.19 – Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Estudo de Caso – Aplicação 3

A Fig. 7.20 mostra que nas duas primeiras e na última semana o transporte utilizou aproximadamente 40% da capacidade utilizada na semana 28, onde ocorreu o transporte da maior quantidade de matéria-prima (16.110 toneladas). Em todas as semanas, a capacidade de transporte da frota terceirizada considerada foi mais do que suficiente para atender ao transporte de matéria-prima das frentes de corte até a usina.



Figura 7.20 – Quantidade de cana-de-açúcar transportada das frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 3

Observa-se na Fig. 7.21 que a quantidade total de cana-de-açúcar moída/processada em toda a safra se manteve praticamente uniforme das semanas 5 a 26. Nas semanas 3, 28 e 29 o modelo não obedeceu à restrição de moagem máxima por semana.

Outra observação pode ser feita com relação às semanas 3 e 28, é que nessas semanas houve um processamento de cana-de-açúcar superior aos demais para a produção de açúcar. E verifica-se que nas semanas 1, 2 e 30 houve um processamento de cana-de-açúcar superior aos demais para a produção dos álcoois, principalmente para o álcool anidro (AEAC).

A quantidade de cana-de-açúcar produzida para a produção do açúcar obteve um total de 254.217,92 toneladas, para a produção do melaço foram necessárias 25.638,05 toneladas de cana-de-açúcar, para o álcool hidratado (AEHC) a quantidade de cana-de-açúcar processada atingiu 28.516,55 toneladas, e para a produção do álcool anidro (AEAC) utilizou-se 47.547,48 toneladas de cana-de-açúcar, totalizando 355.920,00 toneladas de cana-de-açúcar processada em toda a safra.

A Fig. 7.22 mostra que aconteceu uma uniformidade durante toda a safra da quantidade de cada produto produzido. Pode-se observar, mais uma vez, a existência de estoque no último período de análise da safra, principalmente de açúcar.

Obteve-se um total de 36.700 toneladas de açúcar VHP, 1.455 toneladas de melaço, 2.400 m³ de álcool hidratado (AEHC) e 3.910 m³ de álcool anidro (AEAC). Como esta situação considera o planejamento para implantação de uma usina verifica-se que não há uma obrigatoriedade de atendimento à demanda de cada produto estabelecida na Tab. 7.10.

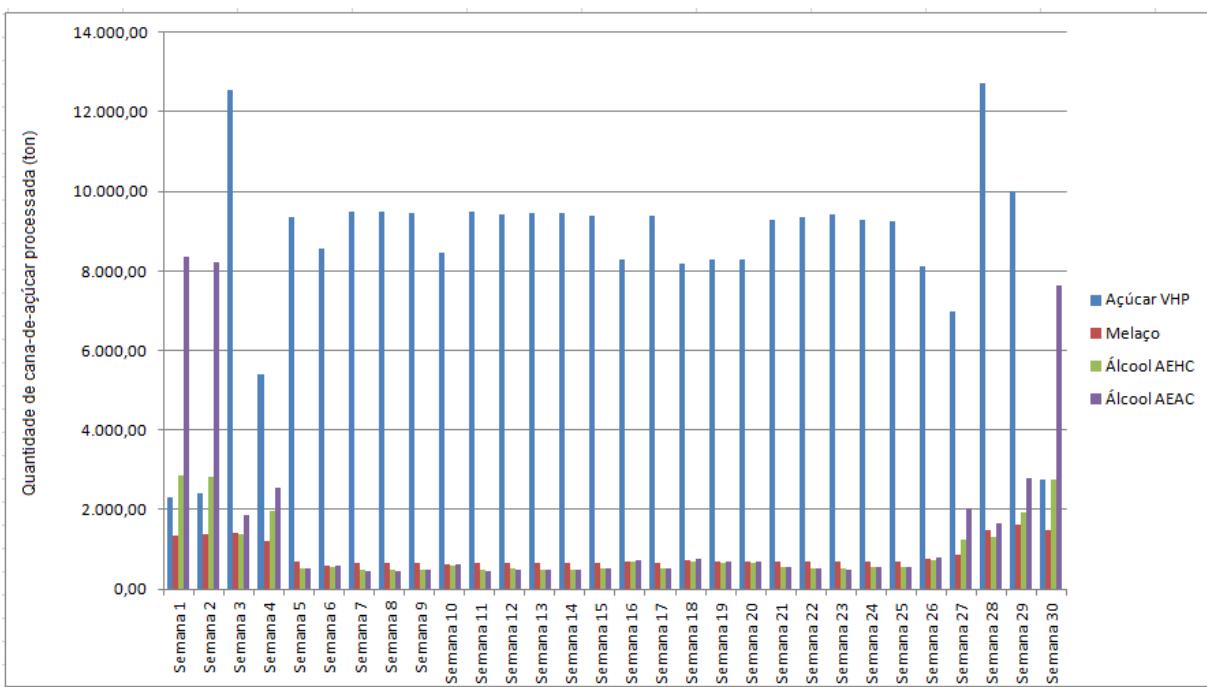


Figura 7.21 – Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais nas frentes de corte até a usina do Estudo de Caso – Aplicação 3

O rendimento industrial obtido foi de 144,36 kg/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção do açúcar e de 83,19 litros/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção dos álcoois.

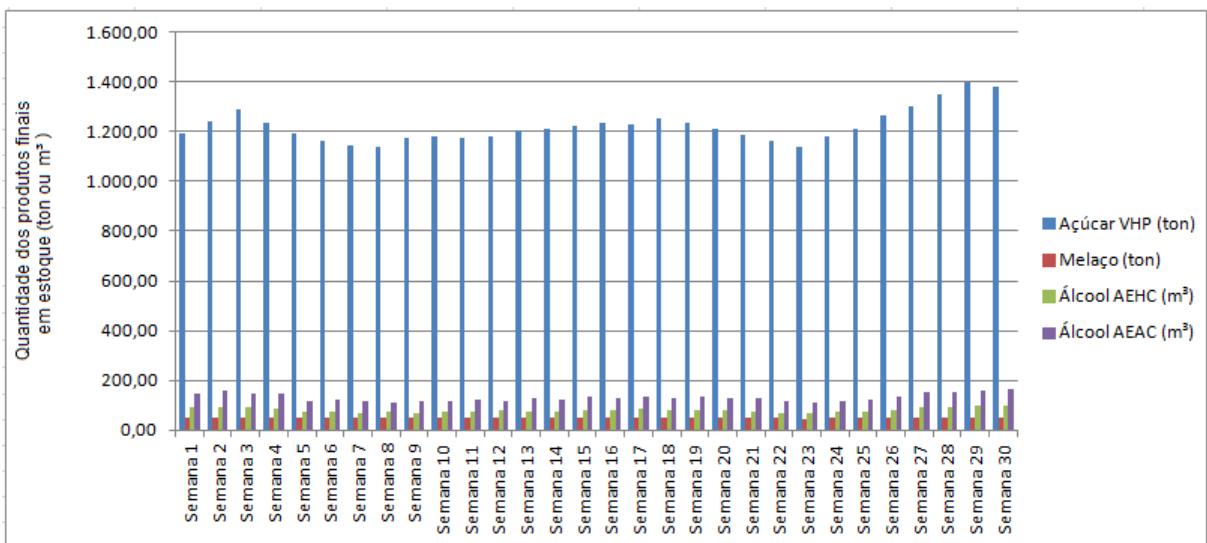


Figura 7.22 – Quantidade dos produtos finais no estoque próprio nas frentes de corte no Estudo de Caso – Aplicação 3

Na Fig. 7.23 pode-se constatar que a matriz de produção foi composta por 76,97% de açúcar e 23,03% de álcool, sendo que a determinação da matriz auxiliar de produção dos álcoois foi estabelecida como 62% de álcool anidro (AEAC) e 38% de álcool hidratado (AEHC). Observa-se que os valores encontrados para a matriz de produção da Aplicação 3 estão próximos dos valores obtidos para a matriz de produção da Aplicação 1, porém, pode-se verificar na matriz auxiliar de determinação do álcool ($MDA_{kp,pa}$) que a participação do álcool anidro (AEAC) aumentou de 50% na Aplicação 1 para 62% na Aplicação 2.

Verifica-se pela Fig. 7.24 que nas semanas 3 e 28 as restrições de compatibilidade entre as variáveis XD_{mt} e XC_{mt} não foram obedecidas, e o mesmo aconteceu nas semanas 1, 2, 3, 28, 29 e 30 para as variáveis XT_{st} e XK_{pt} . Porém, pode-se observar na Fig. 7.25 que houve o atendimento global do modelo aos limites de compatibilidade estabelecidos.

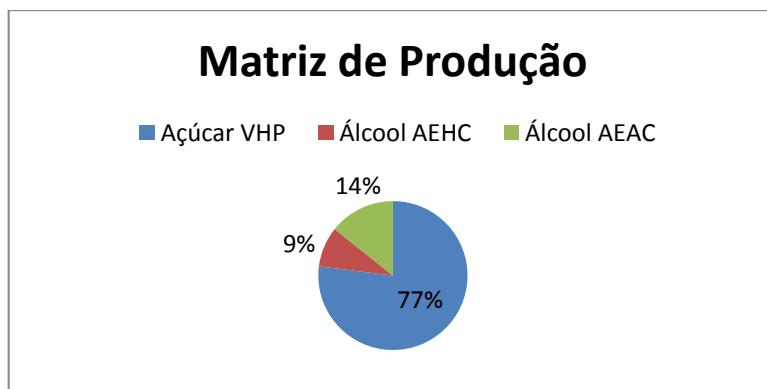


Figura 7.23 – Matriz de produção do Estudo de Caso – Aplicação 3

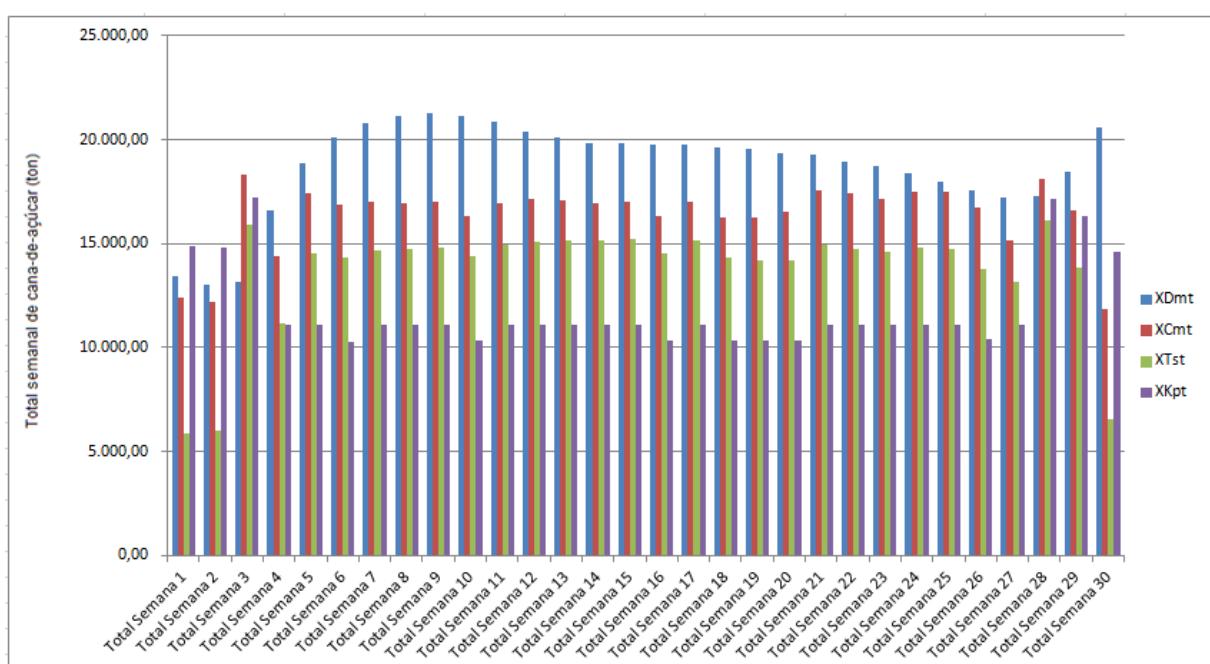


Figura 7.24 – Total semanal para as variáveis do Estudo de Caso – Aplicação 3

Assim, o modelo gerou um total de 563.179,70 toneladas de cana-de-açúcar para a variável de disponibilidade de matéria-prima (XD_{mt}), de 491.860,00 toneladas de cana-de-açúcar para a quantidade de cana-de-açúcar colhida (XC_{mt}), 411.500,00 toneladas de cana-de-açúcar transportadas (XT_{st}) e o total de 355.920,00 toneladas de cana-de-açúcar processadas (XK_{pt}).

O valor ótimo encontrado para a margem de contribuição agroindustrial foi de R\$ 6.755.300,00 para a safra considerando os parâmetros adotados.

Através dos valores ótimos obtidos para a margem de contribuição das aplicações realizadas, verifica-se que a matriz de produção apresenta uma relação direta com este resultado. Pois, apesar do custo de produzir açúcar ser superior ao custo de produzir álcool, o lucro obtido da produção do açúcar é maior do que o lucro de produzir álcool, devido ao valor de sua receita. Porém, como pode ser observado nos valores obtidos para as Aplicações 1 e 3, uma maior participação do açúcar na matriz de produção, não significa uma maior margem de contribuição agroindustrial.

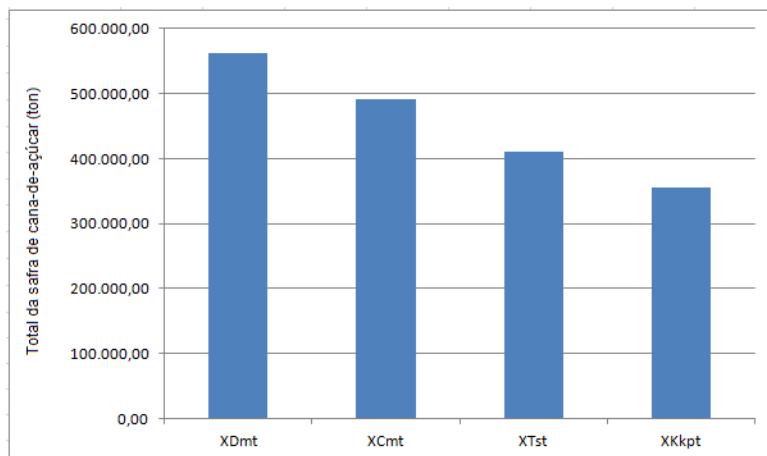


Figura 7.25 – Total da safra do Estudo de Caso – Aplicação 3

7.2. Exemplo Ilustrativo

O Exemplo Ilustrativo considera a existência de seis fontes de matéria prima ($m \rightarrow$ duas fontes de cana-de-açúcar própria, uma fonte de cana-de-açúcar arrendada e três fontes de cana-de-açúcar de fornecedor); duas formas de transportar esta matéria prima para a indústria ($s \rightarrow$ frota própria e frota terceirizada); duas formas de estocar os produtos finais ($e \rightarrow$ estoque próprio e estoque terceirizado); seis produtos finais ($p \rightarrow$ açúcar VHP, açúcar Especial, açúcar Demerara, melaço, álcool AEHC e álcool AEAC); um processo de

produção ($k \rightarrow$ processo 1); com um horizonte de planejamento de trinta períodos semanais ($t \rightarrow$ semana 1 a semana 30).

Como este cenário surgiu da necessidade de apresentarmos a generalidade do modelo matemático desenvolvido para a produção agregada de uma usina, será apresentado aqui apenas a Aplicação 3 para o Exemplo Ilustrativo. Dessa forma, será considerado o planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo.

As Tab. 7.21 e 7.22 apresentam os dados de entrada do Exemplo Ilustrativo.

Tabela 7.21 - Dados de entrada constantes para o Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

Parâmetros	Valores
ARH (%)	18
CPART (u.m./kg de ART)	0,087
CA (t de cana-de-açúcar/ha)	9
AVC1 (u.m./t de cana-de-açúcar)	0
AVC2 (u.m./t de cana-de-açúcar)	0
AVC3 (u.m./t de cana-de-açúcar)	3
AVC4 (u.m./t de cana-de-açúcar)	4
ATRCA (kg/t)	114
CG (u.m.)	1.000.000,00
MMIC (t/sem)	15000
MMAC (t/sem)	35000
CTFP (t/sem)	23000
CTFT (t/sem)	110% MMAC

A capacidade de moagem mínima e máxima de cana-de-açúcar é 15.000 toneladas/semana e 35.000 toneladas/semana, respectivamente. A capacidade de transporte da frota própria é de 23.000 toneladas/semana e da frota terceirizada é de 38.500 toneladas/semana. Ou seja, a usina dispõe de uma capacidade bastante superior do que a necessária, caso haja imprevistos. O valor adotado para a capacidade de transporte da frota terceirizada foi calculado considerando 110% da capacidade de moagem máxima de cana-de-açúcar (MMAC).

Os fatores de conversão dos álcoois em etanol absoluto serão os mesmos apresentados na Tab. 7.2, assim como os dados constantes do processo mostrados na Tab. 7.3. As características técnicas do processo adotado para o Exemplo Ilustrativo podem ser vistas nas Tab. 7.22 e 7.23.

Os dados $MDA_{kp,pa}$ e $MAS_{kp,ps}$ apresentam a representatividade de cada tipo de açúcar e álcool na matriz de produção, onde constam as variáveis y_i ($i=1, \dots, 5$) a serem otimizadas. Esta tabela é similar à Tab. 7.20, onde foram consideradas 3 variáveis.

Tabela 7.22 - Dados correspondentes ao processo escolhido para o Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

Processo	Características técnicas do processo			
	DECD _{kp} (Unit)	DEH _{kp} (Unit)	POS _{kp} (%)	UMS _{kp} (%)
	0,9	0,33	99,3	0,1

Tabela 7.23 - Matriz auxiliar de determinação dos açúcares e álcoois produzidos - Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

Processo	Características técnicas do processo				
	MAS _{kp,ps} (Unit)			MDA _{kp,pa} (Unit)	
	VHP	Especial	Demerara	AEHC	AEAC
	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅

Os dados que variam no tempo estão apresentados na Tab. 7.24.

Tabela 7.24 - Dados de entrada com variação em t - Exemplo Ilustrativo

Semanas	POC _t (%)	PUC _t (%)	AR _t (%)	ESA _t (%)	EFA _t (%)	ATRC _t (kg/t)	PATR _t (u.m./t)	PCF _t (%)	TAI _t (%)	TEM _t (%)
Sem 1	12,0	83,4	1,1	88,0	88,0	120,9	0,2912	0	96	65
Sem 2	12,1	83,6	1,2	88,6	89,1	125,4	0,2912	0	96	65
Sem 3	12,4	84,1	1,0	89,2	89,2	127,9	0,2969	0	96	100
Sem 4	12,4	84,4	1,1	89,4	89,6	128,4	0,2969	55	96	100
Sem 5	12,8	84,4	1,0	89,6	90,0	129,1	0,2969	55	96	100
Sem 6	12,8	84,9	1,0	89,6	90,1	130,8	0,2969	55	96	94
Sem 7	12,8	85,6	1,0	89,6	90,3	131,6	0,3128	55	96	100
Sem 8	13,0	85,0	1,0	89,7	90,4	132,9	0,3128	55	96	100
Sem 9	13,4	85,5	1,0	89,6	90,4	133,5	0,3128	55	96	100
Sem 10	13,6	85,5	1,0	89,6	90,5	134,5	0,3128	55	96	94
Sem 11	13,8	85,6	1,0	89,8	90,6	136,1	0,3128	55	96	100
Sem 12	14,2	85,9	1,0	89,9	90,4	138,8	0,3030	55	96	100
Sem 13	14,4	85,8	1,0	89,8	90,2	140,9	0,3030	55	96	100
Sem 14	14,7	85,8	0,9	89,6	90,1	144,2	0,3030	55	96	100
Sem 15	15,2	85,8	0,9	89,7	89,7	143,5	0,3030	55	96	100
Sem 16	15,2	85,8	1,0	89,3	89,4	142,3	0,3030	55	96	94
Sem 17	15,2	85,1	1,0	89,2	89,3	142,0	0,3041	55	96	100
Sem 18	15,4	84,5	1,1	89,2	89,1	141,1	0,3041	55	96	94
Sem 19	14,7	84,0	1,0	88,8	88,8	138,5	0,3041	55	96	94
Sem 20	14,7	83,4	1,0	88,5	88,8	137,4	0,2955	55	96	94
Sem 21	14,7	83,9	1,0	88,3	88,7	133,3	0,2955	55	96	100
Sem 22	14,0	82,5	1,1	88,0	88,5	131,2	0,2955	55	96	100
Sem 23	13,0	82,0	1,0	87,7	88,0	130,2	0,3002	55	96	100
Sem 24	14,7	82,5	1,1	87,8	88,6	130,1	0,3002	55	96	100
Sem 25	14,7	82,0	1,1	88,3	88,4	130,0	0,3002	55	96	100
Sem 26	14,7	82,5	1,0	88,2	88,1	129,9	0,3002	55	96	94
Sem 27	14,0	82,0	1,0	88,3	88,7	129,8	0,3002	55	96	100
Sem 28	13,0	82,5	1,0	88,0	88,5	129,7	0,3002	0	96	100
Sem 29	14,0	82,0	1,0	87,6	88,6	129,6	0,3002	0	96	94
Sem 30	13,0	82,3	1,0	87,8	88,7	129,5	0,3002	0	96	65

Uma informação importante que foi obtida é que a disponibilidade da frota própria não deve ser considerada em sua totalidade após três semanas do início da safra, em virtude da grande ocorrência de manutenção dos veículos. Deve-se considerar de 85 a 90% de disponibilidade. Dessa forma, adotou-se o valor de 90% da semana 4 até a semana 27, e nas últimas três semanas considerou-se 85% de disponibilidade da frota própria. Alguns dados adotados para este cenário são apresentados nas Tab. 7.25 a 7.28.

Tabela 7.25 - Dados de CCT - Exemplo Ilustrativo

Semanas	DFP _t (%)	DFT _t (%)	CCCT _{st} (u.m./t)	
			FP	FT
Sem 1	100	100	4,13	10,94
Sem 2	100	100	4,13	10,94
Sem 3	100	100	5,49	10,94
Sem 4	90	100	5,49	10,94
Sem 5	90	100	5,49	10,94
Sem 6	90	100	5,98	10,94
Sem 7	90	100	5,98	10,94
Sem 8	90	100	5,98	10,94
Sem 9	90	100	5,98	10,94
Sem 10	90	100	5,98	10,94
Sem 11	90	100	5,62	10,94
Sem 12	90	100	5,62	10,94
Sem 13	90	100	5,62	10,94
Sem 14	90	100	5,62	10,94
Sem 15	90	100	5,62	10,94
Sem 16	90	100	5,81	10,94
Sem 17	90	100	5,81	10,94
Sem 18	90	100	5,81	10,94
Sem 19	90	100	5,81	10,94
Sem 20	90	100	6,05	10,94
Sem 21	90	100	6,05	10,94
Sem 22	90	100	6,05	10,94
Sem 23	90	100	6,05	10,94
Sem 24	90	100	6,05	10,94
Sem 25	90	100	6,05	10,94
Sem 26	90	100	6,05	10,94
Sem 27	90	100	6,05	10,94
Sem 28	85	100	6,05	10,94
Sem 29	85	100	6,05	10,94
Sem 30	85	100	6,05	10,94

Tabela 7.26 - Produtividade agrícola da cana-de-açúcar própria e arrendada - Exemplo Ilustrativo

Semanas	PRA _{mt} (t/ha)		Semanas	PRA _{mt} (t/ha)	
	CP	CAR		CP	CAR
Sem 1	61,0	60,0	Sem 16	62,1	63,1
Sem 2	61,5	60,5	Sem 17	62,0	63,0
Sem 3	61,5	61,5	Sem 18	62,0	62,3
Sem 4	62,0	62,0	Sem 19	61,0	61,1
Sem 5	62,0	62,5	Sem 20	60,5	60,5

Continuação Tab. 7.26 - Produtividade agrícola da cana-de-açúcar própria e arrendada - Exemplo Ilustrativo

Sem 6	62,5	62,5	Sem 21	60,0	59,9
Sem 7	62,5	63,0	Sem 22	59,5	59,3
Sem 8	63,0	64,0	Sem 23	59,0	58,5
Sem 9	63,0	64,0	Sem 24	59,0	58,5
Sem 10	63,5	64,5	Sem 25	59,5	58,0
Sem 11	63,5	65,5	Sem 26	59,0	59,3
Sem 12	64,0	65,0	Sem 27	59,5	59,5
Sem 13	63,0	64,0	Sem 28	59,5	59,5
Sem 14	62,8	63,8	Sem 29	59,0	59,0
Sem 15	62,5	63,5	Sem 30	59,0	59,0

Tabela 7.27 - Valor dos produtos - Exemplo Ilustrativo

Semanas	VPD _{pt} (u.m./t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem 1	567,30	568,40	563,40	187,80	664,50	693,10
Sem 2	568,60	569,20	564,70	188,80	665,80	694,40
Sem 3	569,60	569,40	564,90	189,20	665,90	694,50
Sem 4	568,60	570,00	565,70	189,20	666,10	694,70
Sem 5	568,00	570,20	564,70	189,10	665,40	694,00
Sem 6	567,60	570,60	564,40	189,50	667,50	696,20
Sem 7	567,90	570,70	564,10	189,10	668,50	696,00
Sem 8	568,30	572,40	563,70	189,20	669,30	695,00
Sem 9	569,10	574,00	563,50	189,40	670,10	694,30
Sem 10	569,80	574,00	564,00	190,10	668,70	691,40
Sem 11	570,00	574,20	564,40	190,50	668,30	694,20
Sem 12	570,30	574,90	565,20	190,70	667,50	696,20
Sem 13	570,40	575,00	565,70	190,50	667,90	696,60
Sem 14	570,80	575,30	565,90	190,50	667,40	696,10
Sem 15	571,30	575,80	566,10	191,10	665,70	694,30
Sem 16	571,60	581,00	566,40	191,70	665,40	694,00
Sem 17	572,00	581,50	566,50	191,00	666,00	694,60
Sem 18	571,80	581,30	566,90	190,90	666,10	694,70
Sem 19	571,80	581,20	567,40	189,40	666,00	694,60
Sem 20	572,00	582,10	567,70	188,40	667,40	696,10
Sem 21	572,30	582,60	568,10	188,40	668,50	697,20
Sem 22	572,40	582,30	567,90	187,80	670,90	699,80
Sem 23	572,10	582,60	567,90	187,50	670,50	700,50
Sem 24	572,00	583,10	567,80	191,70	665,40	694,30
Sem 25	571,80	583,20	568,10	191,00	666,00	694,00
Sem 26	571,80	583,80	568,40	190,90	666,10	694,60
Sem 27	572,00	583,90	568,40	189,40	666,00	694,70
Sem 28	572,30	584,00	568,50	188,40	667,40	694,60
Sem 29	572,40	584,20	568,50	188,40	668,50	696,10
Sem 30	572,10	584,70	568,50	187,80	670,90	697,20

Tabela 7.28 - Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal - Exemplo Ilustrativo

Semanas	VAC _{pt} (u.m./t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem 1	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 2	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0

Continuação Tab. 7.28 - Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal - Exemplo Ilustrativo

Sem 3	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 4	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 5	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 6	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 7	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 8	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 9	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 10	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 11	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 12	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 13	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 14	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 15	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 16	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 17	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 18	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 19	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 20	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 21	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 22	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 23	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 24	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 25	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 26	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 27	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 28	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 29	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0
Sem 30	231,4	232,0	230,0	120,07	368,0	384,0

A demanda para o açúcar VHP é de 4.800 toneladas, para o açúcar Especial é de 4.500 toneladas, para o açúcar Demerara é de 35.500, para o melaço é de 1.550 toneladas, e para os álcoois AEHC e AEAC são de 9.600 e 10.500 m³, respectivamente. Essa demanda está distribuída nas 30 semanas da safra. Estes valores estão apresentados na Tab. 7.29 de acordo com a demanda semanal de cada produto considerado.

Tabela 7.29 - Demanda semanal de cada produto - Exemplo Ilustrativo

Semanas	DP _{pt} (t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem 1	0	0	0	0	0	0
Sem 2	200	0	0	0	0	0
Sem 3	0	0	0	130	0	0
Sem 4	300	0	2500	0	0	0
Sem 5	0	500	0	0	1600	0
Sem 6	300	0	0	120	0	0
Sem 7	0	0	3000	0	0	0
Sem 8	0	300	0	0	0	0
Sem 9	0	0	2500	0	0	2800
Sem 10	0	0	0	140	0	0
Sem 11	500	0	0	0	0	0

Continuação Tab. 7.29 - Demanda semanal de cada produto - Exemplo Ilustrativo

Sem 12	0	700	0	110	0	0
Sem 13	0	0	0	0	2400	1850
Sem 14	0	0	7500	0	0	0
Sem 15	500	0	0	100	0	0
Sem 16	0	600	0	0	0	0
Sem 17	600	0	0	220	0	0
Sem 18	0	0	5500	0	2750	1650
Sem 19	0	0	0	130	0	0
Sem 20	0	400	0	0	0	0
Sem 21	700	0	0	0	0	1150
Sem 22	0	400	0	150	0	0
Sem 23	0	0	0	0	900	0
Sem 24	0	700	8700	0	0	0
Sem 25	0	0	0	0	0	1000
Sem 26	700	0	0	250	0	0
Sem 27	0	0	0	0	0	0
Sem 28	0	600	0	0	0	0
Sem 29	0	0	0	0	0	0
Sem 30	1000	300	5800	200	1950	2050
Total	4800	4500	35500	1550	9600	10500

Para o Exemplo Ilustrativo os dados referentes ao estoque são apresentados nas Tab. 7.30 a 7.33.

Tabela 7.30 - Custo de estocagem de cada produto - Exemplo Ilustrativo

Estoques	CE _{pe} (u.m./t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	0,50	0,50	0,50	0,30	1,50	1,50
Estoque Terceirizado	1,50	1,50	1,50	1,30	2,50	2,50

Tabela 7.31 - Capacidade de estocagem de cada produto - Exemplo Ilustrativo

Estoques	CEAT _{pe} (t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	78750	50000	50000	2800	7000	9000
Estoque Terceirizado	10000	17500	17500	2000	5000	5000

Tabela 7.32 - Estoque inicial dos produtos - Exemplo Ilustrativo

Estoques	EI _{pe} (t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	0	0	0	0	0	0
Estoque Terceirizado	0	0	0	0	0	0

Tabela 7.33 - Penalização pela estocagem de entressafra - Exemplo Ilustrativo

Estoques	PU _{pe} (t ou m ³)					
	VHP	Especial	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Estoque Próprio	5	10	5	3	15	15
Estoque Terceirizado	15	50	50	13	25	25

De posse dos dados mencionados acima e das Eq. 5.26 a 5.53 foi possível realizar o cálculo da Matriz de Rendimento Industrial da produção do açúcar ($RIS_{ps,k,t}$), Matriz de Rendimento Industrial da produção do melaço ($RIH_{ph,k,t}$), Matriz de Rendimento Industrial da produção do álcool ($RIA_{pa,k,t}$), Matriz de Custo Agrícola (MCA_{mt}) e da Matriz de Custo Industrial (MCI_{kt}) para o exemplo ilustrativo que são exibidos no próximo item.

7.2.1. Matrizes de Rendimento - Exemplo Ilustrativo

As Tab. 7.34 a 7.36 apresentam as matrizes de rendimentos da produção dos diversos produtos, pelo processo k e em cada período t .

Tabela 7.34 - Matriz de rendimentos industriais da produção do açúcar - Exemplo Ilustrativo

Semanas	RIS _{PS,k,t} (ton)		
	VHP	Especial	Demerara
Sem 1	40,9182	24,5509	16,3673
Sem 2	41,6354	24,9812	16,6542
Sem 3	43,1993	25,9196	117,2797
Sem 4	43,4407	26,0644	17,3763
Sem 5	44,9424	26,9654	17,9769
Sem 6	45,1892	27,1135	18,0757
Sem 7	45,5299	27,3179	18,2120
Sem 8	45,9964	27,5978	18,3985
Sem 9	47,6135	28,5681	19,0454
Sem 10	48,3242	28,9945	19,3297
Sem 11	49,1965	29,5179	19,6786
Sem 12	50,8395	30,5037	20,3358
Sem 13	51,4441	30,8664	20,5776
Sem 14	52,3988	31,4393	20,9595
Sem 15	54,2416	32,5450	21,6966
Sem 16	53,9997	32,3998	21,5999
Sem 17	53,5384	32,1230	21,4154
Sem 18	53,8893	32,3336	21,5557
Sem 19	50,9255	30,5553	20,3702
Sem 20	50,4096	30,2458	20,1639
Sem 21	50,5819	30,3491	20,2328
Sem 22	47,2406	28,3444	18,8962
Sem 23	43,4566	26,0740	17,3827
Sem 24	49,4899	29,6939	19,7960
Sem 25	49,4756	29,6854	19,7902
Sem 26	49,7154	29,8292	19,8861
Sem 27	47,1196	28,2718	18,8478
Sem 28	43,8663	26,3198	17,5465
Sem 29	46,7461	28,0476	18,6984
Sem 30	43,6628	26,1977	17,4651

Tabela 7.35 - Matriz de rendimentos industriais da produção do melaço - Exemplo Ilustrativo

Semanas	R _{IH} _{ph,k,t} (ton)	Semanas	R _{IH} _{ph,k,t} (ton)
	Melaço		Melaço
Sem 1	26,0188	Sem 16	27,9094
Sem 2	26,0405	Sem 17	29,4580
Sem 3	25,9104	Sem 18	31,2389

Continuação Tab. 7.35 - Matriz de rendimentos industriais da produção do melaço - Exemplo Ilustrativo

Sem 4	25,3988	Sem 19	30,8032
Sem 5	26,2768	Sem 20	32,0541
Sem 6	25,3039	Sem 21	30,8538
Sem 7	23,9612	Sem 22	32,3153
Sem 8	25,5315	Sem 23	30,9299
Sem 9	25,2837	Sem 24	33,8539
Sem 10	25,6611	Sem 25	35,2138
Sem 11	25,8908	Sem 26	34,0082
Sem 12	26,0379	Sem 27	33,5370
Sem 13	26,5885	Sem 28	30,0070
Sem 14	27,0820	Sem 29	33,2711
Sem 15	28,0344	Sem 30	30,3478

Tabela 7.36 - Matriz de rendimentos industriais da produção do álcool - Exemplo Ilustrativo

Semanas	RIA _{Pa,k,t} (ton)		Semanas	RIA _{Pa,k,t} (ton)	
	AEHC	AEAC		AEHC	AEAC
Sem 1	2,9148	2,8215	Sem 16	3,1472	3,0511
Sem 2	3,0395	2,9415	Sem 17	3,2264	3,1270
Sem 3	2,8871	2,7957	Sem 18	3,4117	3,3051
Sem 4	2,9570	2,8629	Sem 19	3,2547	3,1530
Sem 5	2,9511	2,8579	Sem 20	3,3185	3,2141
Sem 6	2,9011	2,8100	Sem 21	3,2502	3,1486
Sem 7	2,8334	2,7452	Sem 22	3,3660	3,2583
Sem 8	2,9321	2,8402	Sem 23	3,1402	3,0395
Sem 9	2,9389	2,8475	Sem 24	3,4854	3,3742
Sem 10	2,9723	2,8799	Sem 25	3,5562	3,4421
Sem 11	2,9995	2,9065	Sem 26	3,3991	3,2913
Sem 12	3,0245	2,9313	Sem 27	3,3557	3,2482
Sem 13	3,0589	2,9647	Sem 28	3,1077	3,0084
Sem 14	3,0106	2,9189	Sem 29	3,3325	3,2259
Sem 15	3,0791	2,9856	Sem 30	3,1294	3,0292

A Tab. 7.37 apresenta os dados de custo de obtenção da matéria-prima por fonte de suprimento m em cada semana t (MCA_{mt}), enquanto que a Tab. 7.38 mostra os dados do custo do processo k em cada período t (MCI_{kt}).

Tabela 7.37 - Custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período - Exemplo Ilustrativo

Semanas	MCA _{mt} (u.m./ton)					
	MCA _{1t}	MCA _{2t}	MCA _{3t}	MCA _{4t}	MCA _{5t}	MCA _{6t}
Sem 1	35,2061	35,2061	40,1856	38,2061	38,2061	38,2061
Sem 2	36,5165	36,5165	41,4548	39,5165	39,5165	39,5165
Sem 3	37,9735	37,9735	42,9267	40,9735	40,9735	40,9735
Sem 4	38,1220	38,1220	43,0352	41,1220	41,1220	41,1220
Sem 5	38,3298	38,3298	43,2037	41,3298	41,3298	41,3298
Sem 6	38,8345	38,8345	43,7084	41,8345	41,8345	41,8345
Sem 7	41,1645	41,1645	46,2587	44,1645	44,1645	44,1645
Sem 8	41,5711	41,5711	46,5857	44,5711	44,5711	44,5711

Continuação Tab. 7.37 - Custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período - Exemplo Ilustrativo

Sem 9	41,7588	41,7588	46,7734	44,7588	44,7588	44,7588
Sem 10	42,0716	42,0716	47,0473	45,0716	45,0716	45,0716
Sem 11	42,5721	42,5721	47,4718	45,5721	45,5721	45,5721
Sem 12	42,0564	42,0564	46,8391	45,0564	45,0564	45,0564
Sem 13	42,6927	42,6927	47,5502	45,6927	45,6927	45,6927
Sem 14	43,6926	43,6926	48,5653	46,6926	46,6926	46,6926
Sem 15	43,4805	43,4805	48,3762	46,4805	46,4805	46,4805
Sem 16	43,1169	43,1169	48,0437	46,1169	46,1169	46,1169
Sem 17	43,1822	43,1822	48,1347	46,1822	46,1822	46,1822
Sem 18	42,9085	42,9085	47,9166	45,9085	45,9085	45,9085
Sem 19	42,1178	42,1178	47,2243	45,1178	45,1178	45,1178
Sem 20	40,6017	40,6017	45,6130	43,6017	43,6017	43,6017
Sem 21	39,3901	39,3901	44,4516	42,3901	42,3901	42,3901
Sem 22	38,7696	38,7696	43,8823	41,7696	41,7696	41,7696
Sem 23	39,0860	39,0860	44,3511	42,0860	42,0860	42,0860
Sem 24	39,0560	39,0560	44,3211	42,0560	42,0560	42,0560
Sem 25	39,0260	39,0260	44,3364	42,0260	42,0260	42,0260
Sem 26	38,9960	38,9960	44,1900	41,9960	41,9960	41,9960
Sem 27	38,9660	38,9660	44,1425	41,9660	41,9660	41,9660
Sem 28	38,9359	38,9359	44,1125	41,9359	41,9359	41,9359
Sem 29	38,9059	38,9059	44,1263	41,9059	41,9059	41,9059
Sem 30	38,8759	38,8759	44,0963	41,8759	41,8759	41,8759

Tabela 7.38 - Custo do processo em cada período - Exemplo Ilustrativo

Semanas	MCI _{k,t} (u.m./ton)	Semanas	MCI _{k,t} (u.m./ton)
		Processo 1	Processo 1
Sem 1	4,4183	Sem 16	5,4403
Sem 2	4,4849	Sem 17	5,4910
Sem 3	4,5673	Sem 18	5,6224
Sem 4	4,5690	Sem 19	5,3771
Sem 5	4,7130	Sem 20	5,4082
Sem 6	4,6781	Sem 21	5,3552
Sem 7	4,6301	Sem 22	5,2077
Sem 8	4,7485	Sem 23	4,8525
Sem 9	4,8495	Sem 24	5,4504
Sem 10	4,9205	Sem 25	5,5221
Sem 11	4,9950	Sem 26	5,4621
Sem 12	5,1186	Sem 27	5,2551
Sem 13	5,1906	Sem 28	4,8334
Sem 14	5,2734	Sem 29	5,2139
Sem 15	5,4541	Sem 30	4,8381

7.2.2. Aplicação 3: Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo

Nesta aplicação são considerados os parâmetros apresentados na Tab. 7.23 e as restrições definidas pelas Eq. 7.11 a 7.15. Trata-se de uma otimização híbrida conforme esquematizado na Fig. 7.17.

$$y_7 \sum_{ps} XKps - y_6 \sum_{pa} XKpa = 0 \quad (7.11)$$

$$y_6 \sum_{pa} XKpa - y_7 \sum_{ps} XKps = 0 \quad (7.12)$$

$$y_1 + y_2 + y_3 = 1 \quad (7.13)$$

$$y_4 + y_5 = 1 \quad (7.14)$$

$$y_6 + y_7 = 1 \quad (7.15)$$

Assim, tem-se 7 variáveis a serem otimizadas e 2 restrições a serem atendidas no laço externo do programa não linear, e o problema linear tem 960 variáveis e 2.341 restrições.

As variáveis y_1, y_2 e y_3 referem-se aos parâmetros de composição da matriz auxiliar de açúcar e as variáveis y_4 e y_5 referem-se aos parâmetros de composição da matriz auxiliar de álcool, que nesta situação, serão considerados como variáveis a serem otimizadas conforme exibido na Tab. 7.23.

As variáveis y_6 e y_7 correspondem, respectivamente, aos parâmetros constantes *alfa* e *beta* considerados na Aplicação 1. Se $y_6 = y_7$, as Eq. (7.11) e (7.12) serão equivalentes.

É importante observar que existe uma diferença nos valores totais das variáveis consideradas no modelo, em virtude dos limites de compatibilidade estabelecidos nas Eq. 5.61 a 5.67. Verificou-se que estes limites estabeleceram um percentual de perda de matéria-prima de cerca de 15,25% entre a cana-de-açúcar disponível e colhida, de aproximadamente 11,1% entre a cana-de-açúcar colhida e transportada, e de 4,4% entre a cana-de-açúcar transportada e processada. Esses percentuais poderão ser observados nas Fig. 7.32 e 7.33.

Para obter a solução ótima para esta situação foram necessárias 708 iterações e um tempo computacional de cerca de 7560 segundos (126 minutos) para obter a melhor solução para esta situação.

O Anexo IV apresenta os resultados obtidos para esta situação.

As figuras (7.26) a (7.30) apresentam os resultados obtidos para a quantidade de cana-de-açúcar disponível, colhida, transportada, moída/processada, e a quantidade dos produtos finais estocados durante o horizonte de planejamento considerado na análise e

para o tipo de transporte utilizado. Ainda são exibidos a matriz de produção, o total semanal das variáveis do modelo e o total da safra para o estudo de caso.

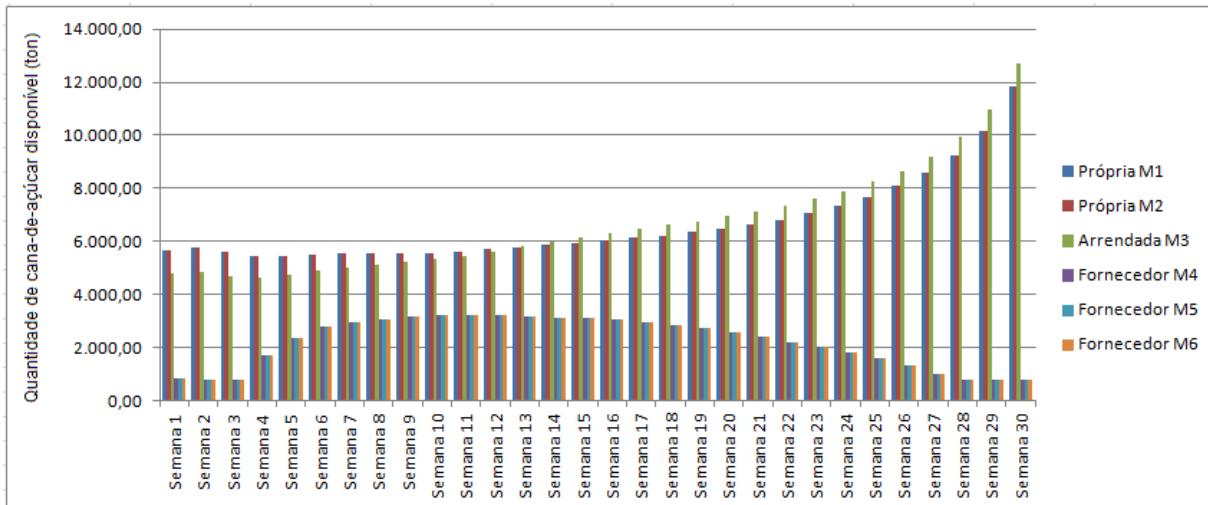


Figura 7.26 – Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas frentes de corte do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

Observa-se na Fig. 7.26 que as fontes de suprimento de cana-de-açúcar própria apresentam uma disponibilidade maior às demais durante toda a safra e que a partir da semana 4 a quantidade de cana-de-açúcar disponível de fornecedores começa a aumentar, como já verificado no Cenário 1.

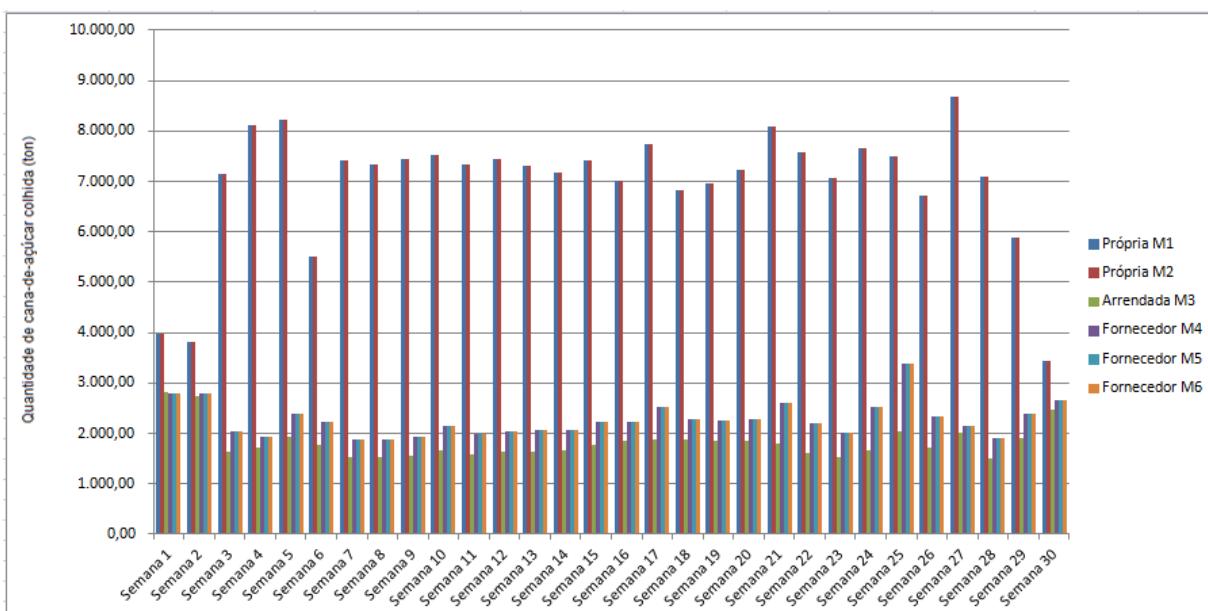


Figura 7.27 – Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas frentes de corte do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

Observa-se pela Fig. 7.27 que houve uma maior quantidade de cana-de-açúcar própria colhida, fato que é justificado e compatível com o apresentado na Fig. 7.26.

Pela Fig. 7.28 nota-se que houve uma maior utilização do transporte próprio (79%) em relação ao transporte terceirizado (21%). Outra questão importante é que mesmo não tendo utilizado a capacidade máxima do transporte próprio, utilizou-se do terceirizado. A semana 25 teve um total de 21.230 toneladas transportadas, dessa forma, foi a semana que mais se aproximou da capacidade máxima de transporte da frota própria.

Verifica-se pelos dados da Tab. A4.4 e exibidos pela Fig. 7.29 que a quantidade total de cana-de-açúcar moída/processada em toda a safra se manteve uniforme, considerando a soma da produção de todos os produtos, exceto nas três primeiras e nas três últimas semanas. Observa-se que o modelo atendeu à restrição de moagem mínima e máxima por semana.

A quantidade de cana-de-açúcar produzida para a produção do açúcar VHP obteve um total de 26.058,04 toneladas, o açúcar Especial teve um total de 28.371,39 toneladas, para o açúcar Demerara foram necessárias 246.818,64 toneladas de cana-de-açúcar, para a produção do melaço foram necessárias 33.372,70 toneladas de cana-de-açúcar, para o álcool hidratado (AEHC) a quantidade de cana-de-açúcar processada atingiu 118.237,14 toneladas, e para a produção do álcool anidro (AEAC) utilizou-se 122.292,08 toneladas de cana-de-açúcar, totalizando 575.150,00 toneladas de cana-de-açúcar processada em toda a safra.

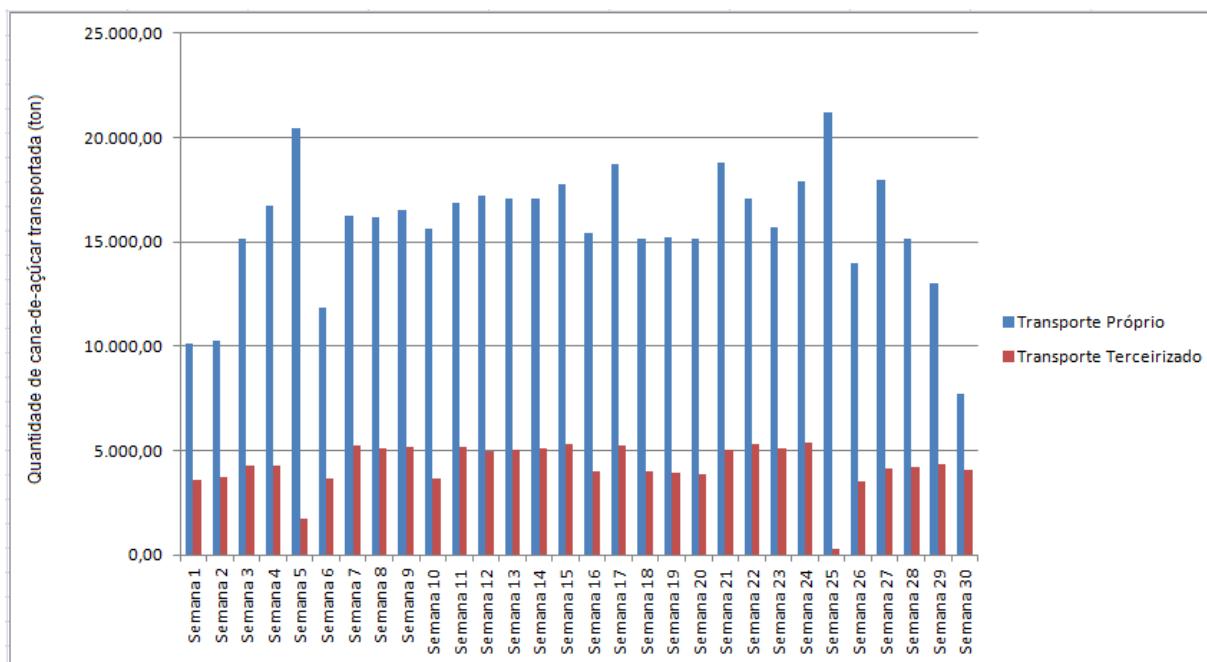


Figura 7.28 – Quantidade de cana-de-açúcar transportada por cada tipo de frota das frentes de corte até a usina do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

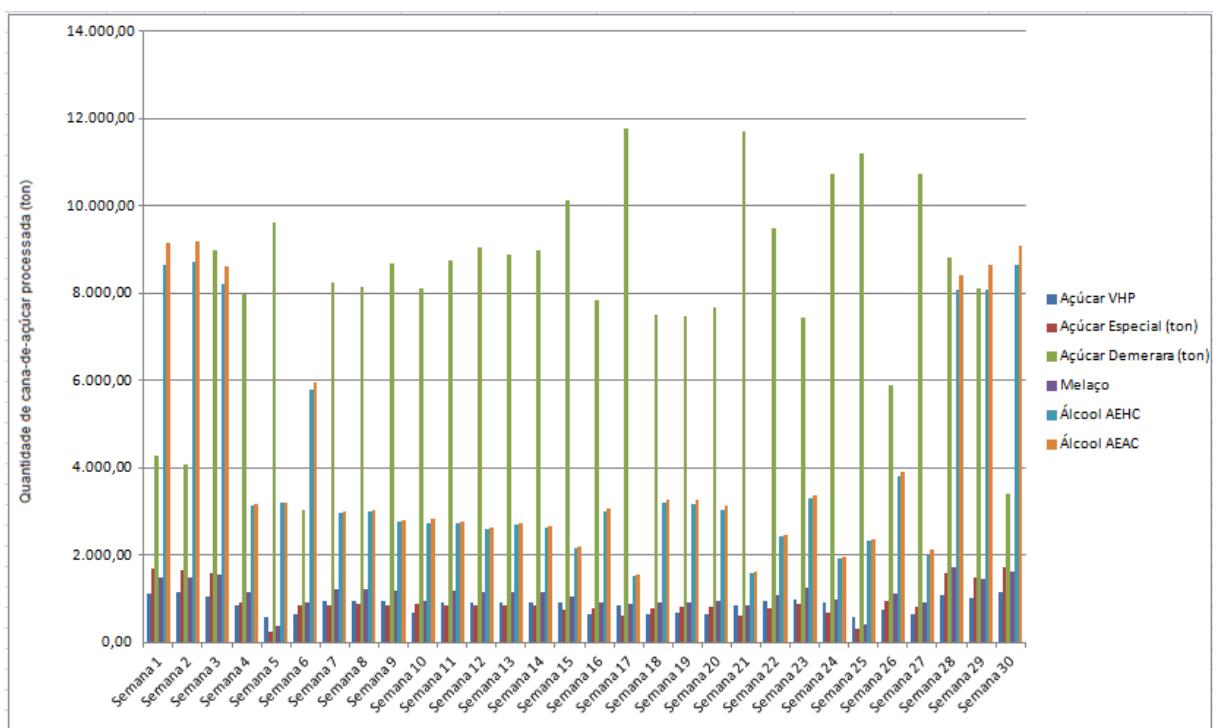


Figura 7.29 – Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção de cada produto do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

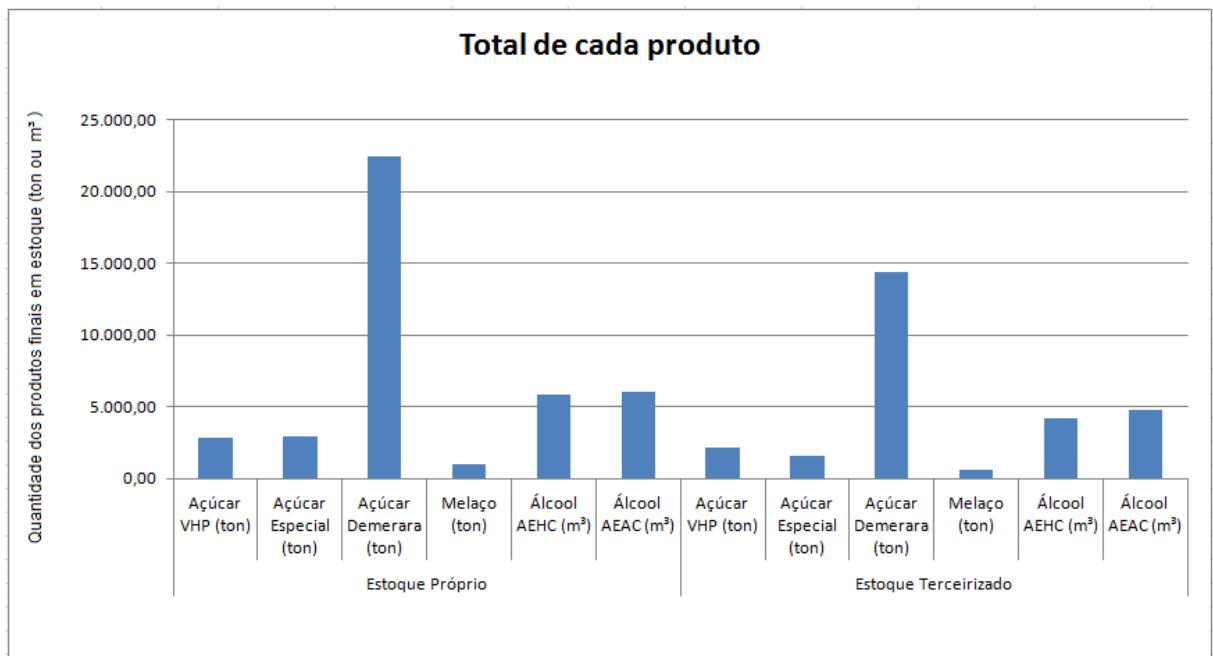


Figura 7.30 – Quantidade de cada produto final estocada em estoque próprio e terceirizado do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

Observa-se na Fig. 7.30 que a quantidade de produtos finais produzidos pela usina está compatível com a quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção de cada

produto, conforme mostrado na Fig. 7.29. Apesar de não utilizar toda a capacidade do estoque próprio, o modelo utilizou, mesmo que em quantidade inferior (cerca de 40% em quantidade de produtos), a capacidade do estoque terceirizado em toda a safra.

Verifica-se também que há estoque no último período de análise da safra, principalmente para os álcoois.

Obteve-se um total de 2.830 toneladas de açúcar VHP, 2.930 toneladas de açúcar Especial, 22.420 toneladas de açúcar Demerara, 960 toneladas de melaço, 9.990 m³ de álcool hidratado (AEHC) e 10.500 m³ de álcool anidro (AEAC). Como se está realizando um planejamento para implantação de uma usina verifica-se que não há uma obrigatoriedade de atender à demanda de cada produto estabelecida na Tab. 7.29, porém o modelo atendeu à essa demanda.

O rendimento industrial obtido foi de 165,42 kg/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção dos açúcares e de 83,36 litros/tonelada de cana-de-açúcar processada para a produção dos álcoois.

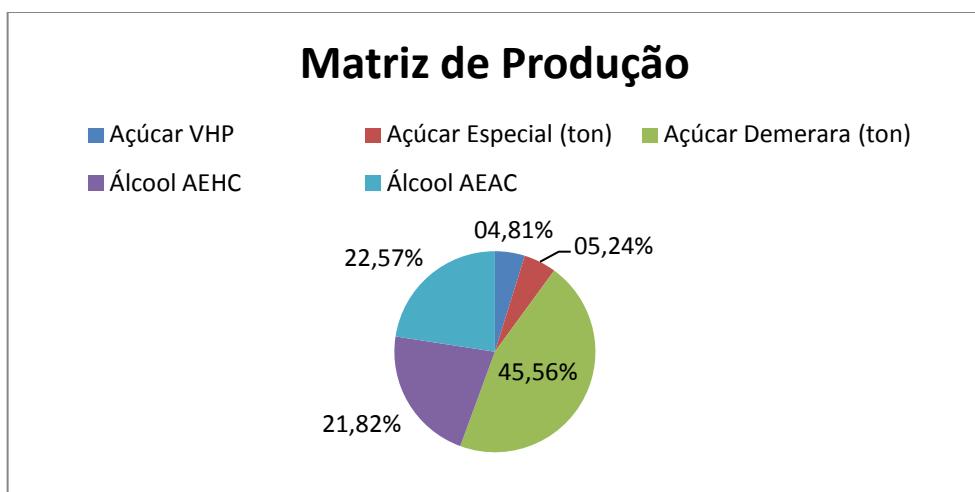


Figura 7.31 – Matriz de produção do Exemplo ilustrativo – Aplicação 3

Observa-se na Fig. 7.31 que a matriz de produção foi composta por 55,60% de açúcar e 44,40% de álcool, ou seja, estes valores se aproximam do considerado ideal pelo gerente industrial da usina visitada. Verifica-se ainda que a determinação da matriz auxiliar de produção dos álcoois foi estabelecida como 51% de álcool anidro (AEAC) e 49% de álcool hidratado (AEHC) e a matriz auxiliar de produção dos açúcares foi estabelecida como 8,6% de açúcar VHP, 9,4% de açúcar Especial e de 82% de açúcar Demerara.

Verifica-se pela Fig. 7.32 que esta aplicação apresentou comportamento similar ao observado nas aplicações do Estudo de Caso.

Verifica-se pela Fig. 7.33 que, apesar de em algumas semanas ter havido o não atendimento à algumas restrições, em uma análise global da safra houve o atendimento do modelo aos limites de compatibilidade estabelecidos.

O modelo gerou um total de 798.506,00 toneladas de cana-de-açúcar para a variável de disponibilidade de matéria-prima (XD_{mt}), 676.700,00 toneladas de cana-de-açúcar colhida (XC_{mt}), 601.730,00 toneladas de cana-de-açúcar transportadas (XT_{st}) e o total de 575.150,00 toneladas de cana-de-açúcar processadas (XK_{pt}).

Por fim, vale ressaltar que o valor ótimo encontrado para a margem de contribuição agroindustrial foi de R\$ 8.508.000,00 para a safra considerando os parâmetros adotados.

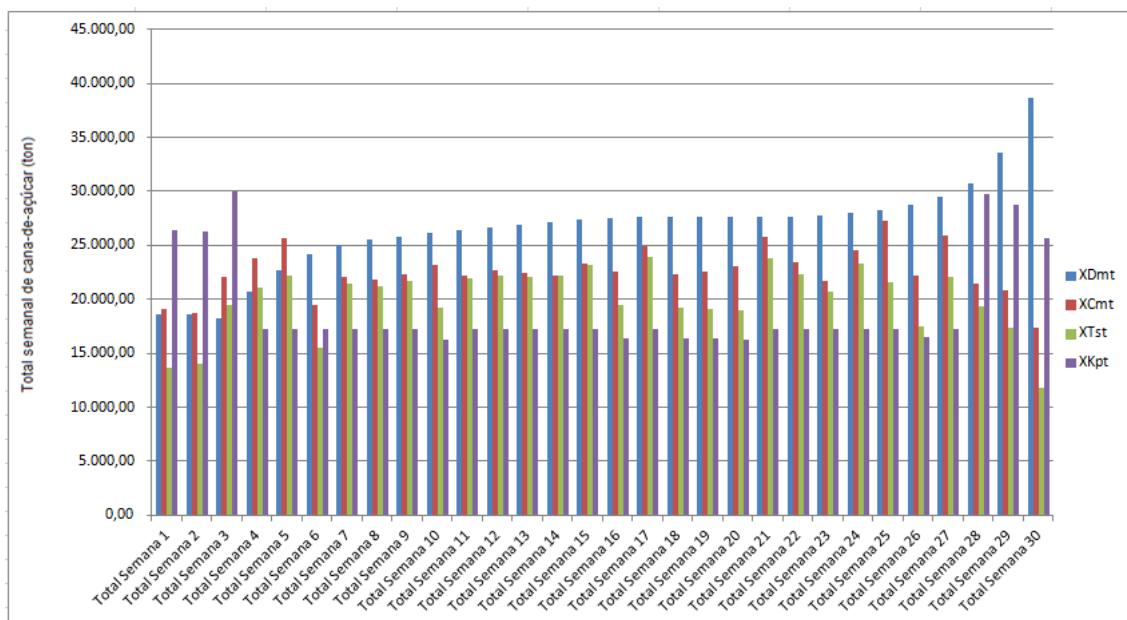


Figura 7.32 – Total semanal para as variáveis do modelo do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

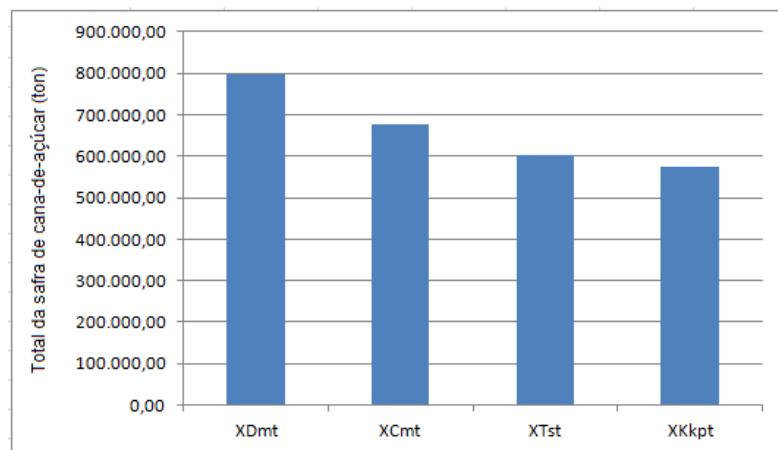


Figura 7.33 – Total da safra para as variáveis do modelo do Exemplo Ilustrativo – Aplicação 3

7.3. Discussão

Através da análise do Estudo de Caso, verifica-se que a maior margem de contribuição agroindustrial obtida (R\$ 6.755.300,00) foi para a situação onde se realizou o planejamento para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pela otimização do modelo. A matriz de produção que contempla esta situação é definida por 76,97% de açúcar e 23,03% de álcool.

Nesta mesma situação, devido aos limites de compatibilidade estabelecidos entre as variáveis nas restrições de (5.61) a (5.67), verifica-se que de toda a cana-de-açúcar colhida para a safra, cerca de 72% foi processada. Ou seja, observa-se uma perda de matéria-prima de aproximadamente 28% da etapa agrícola até a etapa industrial.

Nas outras duas situações do estudo de caso, observa-se uma perda de matéria-prima de aproximadamente 17% e 29% da etapa agrícola até a etapa industrial, respectivamente, para o planejamento de uma usina instalada e para o planejamento para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pelo usuário do modelo.

Esses dados estão de acordo com o que foi informado pelo gerente industrial, com base no que constatou em toda sua experiência em usinas, que a perda total de cana-de-açúcar pode chegar a 35% da colheita até a produção, dependendo do tipo de colheita utilizada, do tipo de rodovia utilizada no transporte da cana-de-açúcar (pavimentada ou não), dos ajustes industriais, e das políticas de controle adotadas pela usina.

Não conseguiu-se obter uma solução ótima e viável, pois algumas restrições não foram obedecidas principalmente no período inicial e final da safra (primeiras e últimas semanas), o que pode até ser caracterizado como um problema de fronteira. Dessa forma, pretende-se utilizar em pesquisas futuras novos parâmetros e outros softwares de programação linear de forma a buscar um ótimo global. Além disso, pode-se realizar uma análise de sensibilidade das variáveis consideradas no modelo.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÃO

8.1. Conclusão

O modelo matemático desenvolvido para as operações de transporte de cana-de-açúcar tem como objetivo dimensionar a frota de veículos que atenderá à usina no período de safra, dessa forma, auxiliar os gerentes agrícolas na definição da quantidade e do tipo de veículos que atenderão a determinada frente de corte, e na determinação da quantidade de cana-de-açúcar que deve ser colhida em cada frente de corte para atender a moagem diária de cada usina, de forma que o custo operacional seja minimizado e as restrições impostas ao problema sejam consideradas.

Pode-se concluir que a ferramenta desenvolvida, trabalhando em conjunto com o *toolbox* Linprog, é útil e importante no planejamento operacional auxiliando os gestores na tomada de decisão e que um modelo de programação linear tem potencial para apoiar as decisões de dimensionamento da frota de uma usina de açúcar e álcool.

O modelo desenvolvido para o planejamento agregado da produção tem como objetivo geral auxiliar na determinação da moagem semanal, dos processos produtivos e da política de atendimento da demanda, de forma que a margem de contribuição da empresa seja maximizada e as restrições de disponibilidade de matéria-prima, de capacidade produtiva, de estoque, de fluxo de caixa positivo e atendimento da demanda por produto sejam consideradas.

Os objetivos contemplados nesta pesquisa foram atingidos simultaneamente, e a modelagem demonstrou ser aplicável em problemas reais. A possibilidade de parametrização imposta ao modelo permite que este seja utilizado em usina ou conjunto de usinas com diferentes configurações e dimensões, e que têm o açúcar e o álcool como seus principais produtos finais.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que os modelos determinísticos propostos têm potencial para apoiar decisões do planejamento agregado da produção, e na comercialização e estocagem de uma usina sucroalcooleira.

A dificuldade de obtenção de dados reais nas usinas e a escassez de biografia na área desta pesquisa foram determinantes para a não validação dos resultados.

Os modelos desenvolvidos visando o planejamento para a implantação de usinas de açúcar e álcool mostraram-se ferramentas em potencial para discussão da melhor matriz de produção a ser utilizada de forma que se maximize a margem de contribuição agroindustrial.

As expectativas quanto a um rápido questionamento das decisões de alocação de recursos e metas de produção estabelecidas pela usina foram atingidas quando conseguiu-se um tempo computacional capaz de gerar informações em alta velocidade de forma a auxiliar os gerentes industriais no acompanhamento, na elaboração e em uma necessária reavaliação do planejamento agregado da produção do plano de safra. Além disso, sinergias podem ser atingidas com a adoção de uma estratégia de safra que incorpora de forma integrada as questões de produção, logística e comercialização dos produtos.

Esta pesquisa teve como objetivo contribuir com uma opção adicional de ferramenta de trabalho na busca por incrementos na eficiência e em parâmetros de produtividade para melhoria e aperfeiçoamento de usina de cana-de-açúcar.

Este tipo de modelo tem o potencial para apoiar decisões, proporcionando confiabilidade nas análises e fornecendo um melhor entendimento das variáveis inerentes ao problema e um melhor desempenho da usina. Pode-se destacar outros benefícios, como por exemplo, a sistematização do planejamento agregado e da comercialização e distribuição, favorecendo uma melhor compreensão.

A agroindústria sucroalcooleira nacional mostra-se, historicamente, altamente competitiva, sempre em busca de alternativas, inovações e melhorias, tanto em relação à produtividade quanto à qualidade dos produtos. Esta pesquisa visa contribuir com mais uma opção de ferramenta de trabalho na busca por incrementos nos parâmetros de produtividade e eficiência visando melhoria e aperfeiçoamento da indústria canavieira.

A principal contribuição do modelo desenvolvido é permitir uma inibição dos julgamentos subjetivos, incompletos e tendenciosos. Este estudo atingiu o objetivo de desenvolver modelos matemáticos parametrizáveis para qualquer tipo de planta de usina que sejam capazes de dimensionar a frota para o transporte de cana-de-açúcar e de auxiliar no planejamento agregado da produção de uma usina sucroalcooleira brasileira, de forma a gerar planos de produção eficazes para o período de safra.

Ao final desta pesquisa pode-se constatar que o problema de otimização desenvolvido tem potencial para apoiar as principais decisões relativas ao planejamento e controle dos processos de produção de uma usina de açúcar e álcool.

8.2. Sugestões para Pesquisas Futuras

Os resultados encontrados são promissores e encorajam pesquisas futuras no sentido de aperfeiçoar o desempenho dos modelos propostos. A seguir, apresenta-se um conjunto de sugestões provenientes do contato com os gerentes agrícola e industrial durante a visita, e também, por carências de estudos específicos em algumas etapas. O principal intuito dessas sugestões é aprimorar a adequação da modelagem a realidade das usinas sucroalcooleiras.

- Análise considerando o método de Teoria das Filas;
- Avaliação de outros tipos de composição para as operações de transporte;
- Acrescentar à modelagem o dimensionamento dos equipamentos de corte e carregamento da cana-de-açúcar;
- Avaliação do processo decisório para terceirização ou não das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) das usinas;
- Avaliação do custo da falta de cana-de-açúcar nas frentes de corte, de forma que se determine o impacto desse desabastecimento de matéria-prima no dimensionamento da frota;
- Promover uma integração entre a modelagem do sistema CCT e da etapa industrial de forma que a etapa de CCT passa a ser uma geradora de dados de entrada e não apenas de parâmetros ao modelo da etapa industrial;
- Incorporação do bagaço e da geração de energia elétrica como partes do processo de produção de uma usina sucroalcooleria;
- Ampliar a modelagem proposta para uma modelagem que considere o planejamento de safra e entressafra da(s) usina(s);
- Detalhar a qualidade da cana-de-açúcar para cada tipo de fornecedor de matéria-prima;
- Utilizar uma metodologia não linear para equacionar os rendimentos e os custos dos processos;
- Incorporar à modelagem a possibilidade de escolha de processos de produção, e dessa forma, considerar os custos de *setup* dos processos;

- Análise da dualidade do problema de programação linear, de forma a avaliar a sensibilidade das variáveis do modelo e testar o ótimo;
- Desenvolver os modelos de programação linear para a etapa de transporte e etapa industrial utilizando softwares gratuitos, como, por exemplo, o GLPK e lp_solve;
- Análise de incertezas dos dados de entrada por meio de técnicas estatísticas;
- Desenvolver uma metodologia para coleta, análise e utilização dos dados de custos necessários para executar a otimização em situação real e dinâmica;
- Disponibilizar um software, amigável e interativo, para a realização de simulações nas duas etapas (transporte e industrial).

Considerando esta última sugestão, o grupo de pesquisa começou a desenvolver o programa industrial amigável e interativo para o usuário, conforme desenvolvido para a etapa de transporte. Desta forma, as principais variáveis podem ser definidas e/ou alteradas em um menu que é exibido automaticamente no início da execução do programa, fazendo com que não seja necessário que o usuário acesse um arquivo para realizar tais tarefas.

A Fig. 8.1 apresenta o menu inicialmente exibido pelo programa.

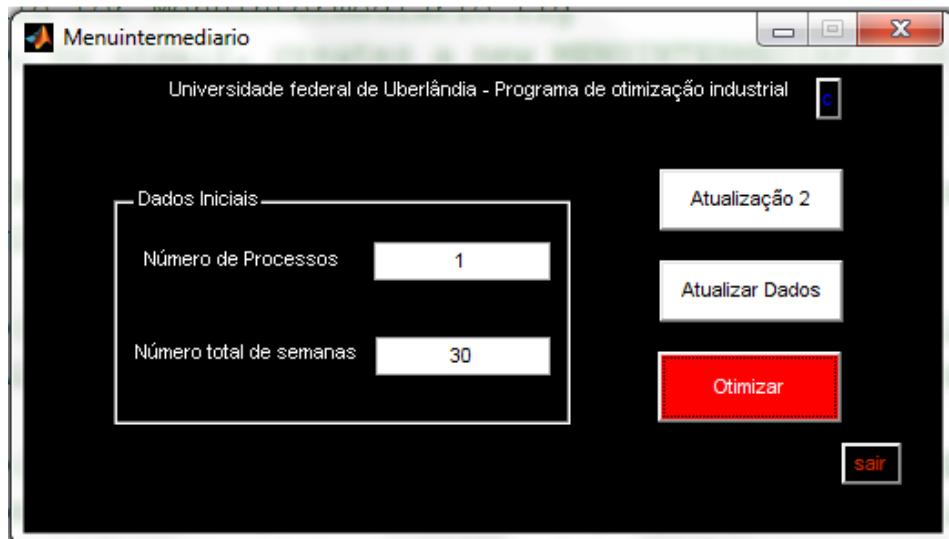


Figura 8.1 - Menu para definição e/ou atualização das principais variáveis

A Fig. 8.2 exibe a caixa que é aberta na tela quando o usuário solicita a atualização dos dados. Nesta caixa deve-se definir a matriz de produção que estabelecerá o processo de produção da usina. Ao selecionar os produtos fabricados pela usina, automaticamente são exibidas caixas para a definição da quantidade destes produtos na matriz de produção, sendo que a soma dessas quantidades não podem exceder 1 (um), que corresponde a 100% dos açúcares e 100% dos alcoóis produzidos. Por fim, clique em Atualizar.

O programa retornará ao menu inicialmente exibido. Em seguida, clique em Otimizar.

Figura 8.3 apresenta uma caixa com o nome *Results* que será exibida pelo programa. Nesta é possível apresentar os resultados obtidos na otimização. Selecione Resultados Semanais – fornece os valores para cada uma das variáveis em cada período de análise t - ou Resultados Finais - fornece o valor total para cada uma das variáveis do modelo considerando toda a safra e o lucro total final obtido pela usina. Na Fig. 8.3 também podem-se verificar os resultados finais para todas as variáveis consideradas no modelo e o lucro final obtido pela usina.

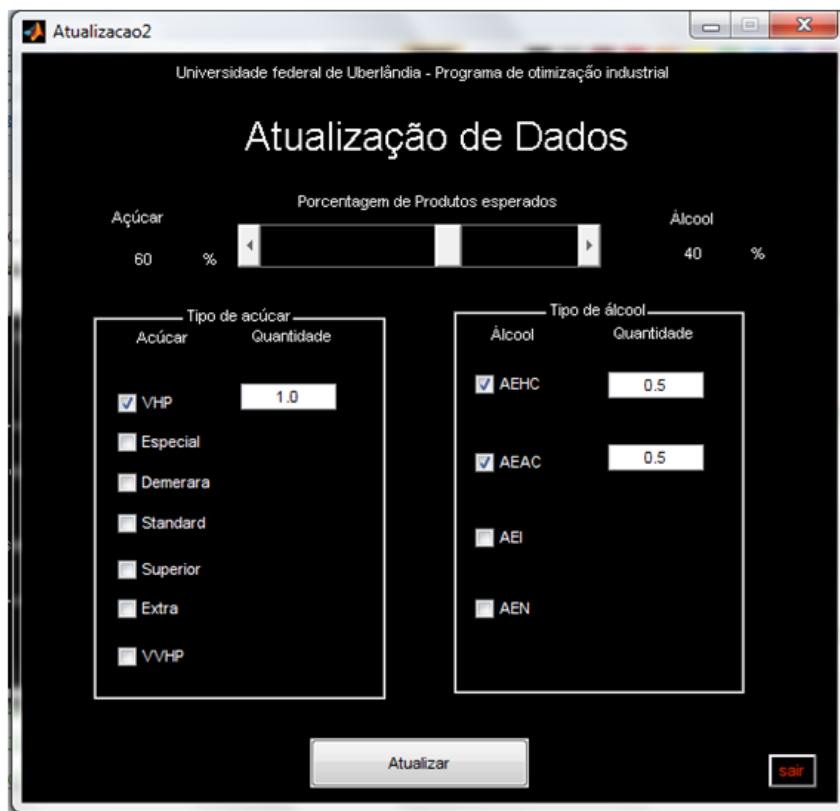


Figura 8.2 - Caixa para atualização de dados

A Fig. 8.4 exibe os resultados gráficos obtidos pelo programa para a variável da quantidade de cana-de-açúcar (em toneladas) transportada em todas as semanas consideradas na análise. Para alterar a variável a ser visualizada, basta clicar sobre o ícone da variável desejada.

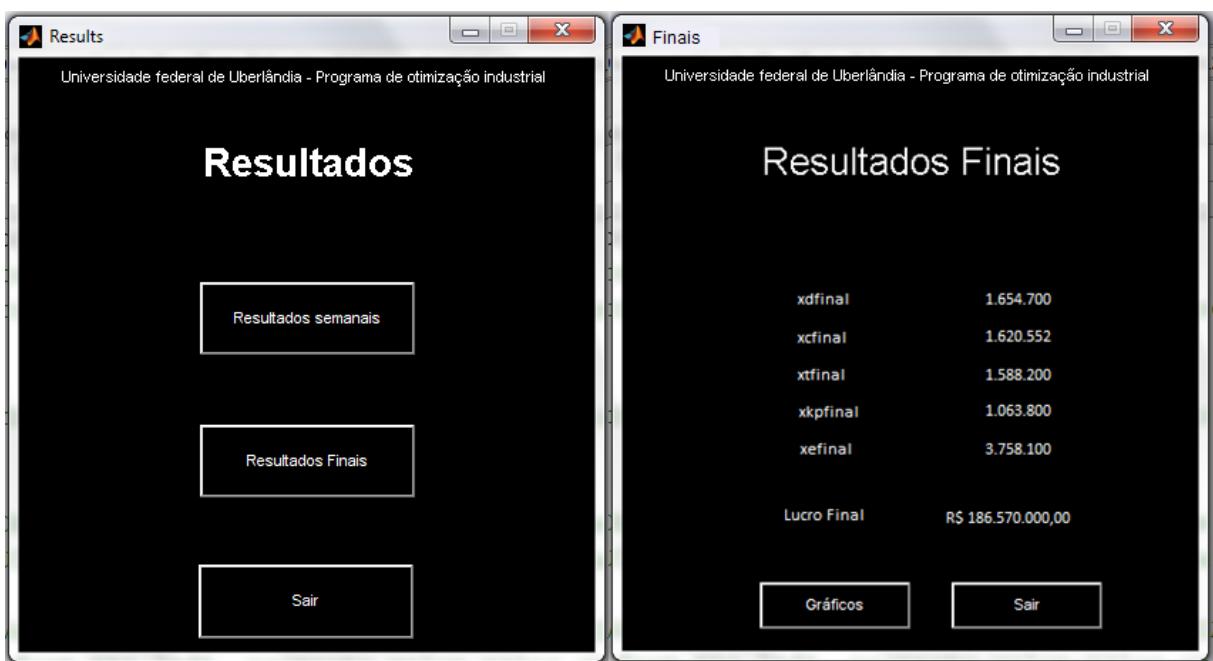


Figura 8.3 - Caixas Resultados e Resultados Finais

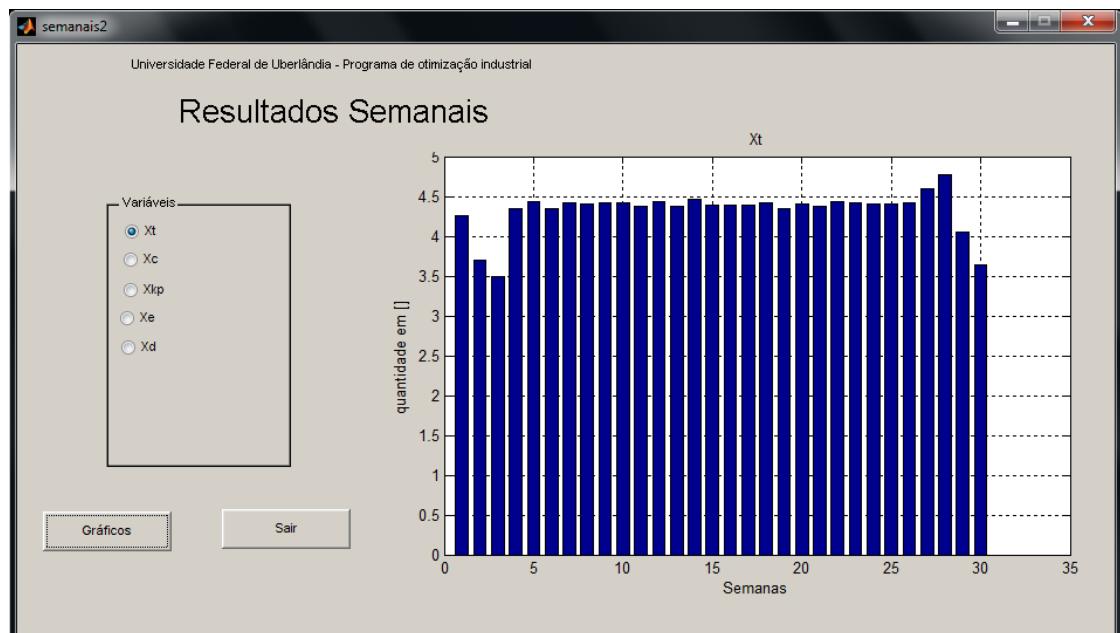


Figura 8.4 - Resultados semanais para a variável transporte

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA (2012). **Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores do Brasil** Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/Index.html>. Acesso em 30 de Julho de 2012.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. 2a edition, 2007.

BARATA, M. Q. F. **Otimização econômica do corte e reforma de canaviais**. 1992. 173 f. Dissertação de Mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BELIK, W.; VIAN, C. E. de F. **Desregulamentação estatal e novas estratégias competitivas da agroindústria canavieira em São Paulo**. In: MORAES, M. A. F. D de & SHIKIDA, P. F. A. (orgs.), Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios. 2002, São Paulo.

BENEDINI, M. S.; BROD, F. P. R.; PERTICARRARI, J. G. **Perdas de Cana e Impurezas Vegetais e Minerais na Colheita Mecanizada**. Disponível em: <http://xa.yimg.com/kq/groups/20144470/1320106253/name/Perdas+de+cana+e+impurezas+vegetais+e+minerais+-+CTC.pdf>. Acesso em 25 de Agosto de 2012.

BERGER, R.; TIMOFEICZYK JÚNIOR, R.; CAMIERI, C.; LACOWICZ, P. G. SAWINSKI JÚNIOR, J.; BRASIL, A. A. Minimização de Custos de Transporte Florestal com a Utilização da Programação Linear. **Revista Floresta**. v. 33, n. 1, p. 53 – 62, jun.2003.

BERTSIMAS, D.; TSITSIKLIS, J. N. **Introduction to Linear Optimization**, 1997.

BOUÇAS, C. **Terra fértil para investimento em cana**. Disponível em: <http://valoronline.com.br>. Acesso em 29 de Agosto de 2012.

BOZZO, J. O. **Setor Sucroalcooleiro em Busca de Metas.** Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br/noticia/Jornal-Cana/49516+Setor-sucroalcooleiro-em-busca-de-metas>. Acesso em 29 de Agosto de 2012.

BRANDÃO, M. A. L. **Estudo de alguns métodos determinísticos de otimização irrestrita.** 2010. 101 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia.

BREGALDA, P. F.; OLIVEIRA, A. A. F. de; B. C. T. **Introdução à Programação Linear.** 3a edition, 1988.

CAIXETA FILHO, J. V.; SILVA, N. D. V.; GAMEIRO, A. H.; LOPES, R. L.; GALVANI, P. R. C.; MARTIGNON, L. M.; MARQUES, R. W. C. **Competitividade no agribusiness brasileiro: a questão do transporte em um contexto logístico.** Disponível em: <http://wwwfea.usp.br/fia/pensa/pdf/logistica.pdf> e <http://wwwfea.usp.br/fia/pensa/pdf/acucar.pdf>. Acesso em 10 de março de. 2009.

COLIN, E. C.; CIPPARRONE, F. A. M.; SHIMIZU, T. Otimização do custo de transporte na distribuição-armazenagem de açúcar. **Produção**, v. 9, n. 1, p. 23-30, 1999.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil Safra.** Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em 17 de Agosto de 2012.

CONSECANA – CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DE SÃO PAULO. **Manual de Instruções Consecana – SP: Regulamento & Normas Operacionais.** 4a edition. Disponível em: <http://www.unico.com.br/pages/consecana.asp>. Acesso em 20 de Janeiro de 2012.

COSTA, L. S. da. **Transparências – Programação Linear. Disciplina: Pesquisa Operacional.** Instituto de Física. Universidade de Brasília. 2003. Disponível em: <http://ares.fis.unb.br/luis/pesqoper.html>. Acesso em 15 de Novembro de 2008.

COSTA, R. P.; CARVALHO, K. L. de. **Metodologia de estimativa de preço de transferência entre sistemas de produção de cana-de-açúcar e de álcool.** In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. ENEGEP. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11 de outubro de 2007.

CRUZ, R. R. **Desempenho Operacional e Análise de Custo do Corte, Carregamento e Transporte Mecanizado da Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*)**. 2010. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DÍAZ, J. A.; PÉREZ, I. L. **Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season**. In: Winter Simulation Conference, 32, Orlando. Proceedings...Orlando, p. 1114 – 1117, 2000.

EID, F. **Progresso técnico na agroindústria sucroalcooleira. Informações Econômicas**. São Paulo, Brazil, v.26, n.5, p. 29-36, 1996.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria de Cana-de-Açúcar**. Piracicaba: EME: STAB, 2003.

GUALDA, N. D. F. **Terminais de transporte: Contribuição ao Planejamento e ao Dimensionamento Operacional**. 1995. 277 f. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GUIADOTRC. **Central de Custos e Preços de Transportes**, do Portal Guia do Transportador. Disponível em: <<http://www.guiadotrc.com.br/Custeio/metodologia.asp>>. Acesso em 17 de Maio de 2010.

GUIMARÃES, T. X. **Processos Industriais da Usina de Cana de Açúcar**. 2006. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Pernambuco, Recife.

GRISOTTO, M. E. **Otimização do transporte de cana-de-açúcar por caminhões**. 1995. 121f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HANSEN, A. C.; BARNES, A. J.; LYNE, P. W. L. **Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems**. Transactions of the ASAЕ, v. 45(3), p. 531 – 538, 2001.

IANNONI, A. P.; MORABITO, R. **Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta**. G&P – Gestão e Produção. Brazil, v.9, n.2, p. 107-127, 2002.

IDEA (2012). **Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial - Revista IDEA NEWS.** Disponível em: <http://www.ideaonline.com.br>. Acesso em 05 de Agosto de 2012.

IEA (2012). **Instituto de Economia Agrícola.** Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/OUT/verTexto.php?codTexto=4010>. Acesso em 05 de Agosto de 2012.

KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIZAKI, H. **Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry.** International Transactions in Operational Research, v. 13, n. 5, p. 425-439, 2006.

LIBONI, L. B. **Perfil da mão-de-obra no setor sucroalcooleiro: tendências e perspectivas.** 2009. 201 f. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, São Paulo.

MACEDO, I.C. **A Energia da Cana de Açúcar. Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.** Goiânia: UNICA, 2005. 237 f. ISBN: 9788586387937.

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/>. Acesso em 03 de Setembro de 2012.

MATHWORKS. **Optimization Toolbox 3. User's Guide.** The MathWorks, Inc, 2006.

MDIC. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.** Disponível em: www.desenvolvimento.gov.br/. Acesso em 03 de Setembro de 2012.

MUNDIM, J. U. C. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar.** 2009. 104 f. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NTC. **Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas. Associação Nacional do Transporte de Cargas,** v. 2, 58 p, 2001.

PACHECO, D. F. **Supporte à Decisão em Sistemas Inteligentes de Colheitas Agrícolas.** 2006. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica de Pernambuco, Recife.

PAIVA, R. P. O. **Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool.** 2006. 182 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

PAIVA, R. P. O. de. **Modelagem do Planejamento Agregado da Produção em Usinas Cooperadas do Setor Sucroenergético Utilizando Programação Matemática e Otimização Robusta.** 2009. 243 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

PAIVA, R.P.O.; MORABITO, R. **Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool.** Gestão de Produção, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 25-41, 2007.

PROCANA. **Dados Estatísticos – Números do Setor.** Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br>. Acesso em 25 de Agosto de 2012.

RAMÃO, F. P.; SCHNEIDER, I. E.; SHIKIDA, P. F. **A Padrão tecnológico no corte de cana-de-açúcar: um estudo de caso no Estado do Paraná.** 2007. Revista de Economia Agrícola, São Paulo, v.54, n.1.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente.** 1a. Edição. 2004. 222 f. Piracicaba, p.11-13.. p. 80-82.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de Cana-de-açúcar: Colheita, Energia e Ambiente.** 2007. 310 p. 2a Edição. Piracicaba. Editora Barros & Marques Editoração Eletrônica.

RODRIGUES, L. G. S. **Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar.** 2005. 122 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.

RODRIGUES, L. **O Processo de Terceirização e a Presença de Arranjos Institucionais Distintos na Colheita da Cana-de-Açúcar.** 2006. 121 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ROSA, E. J. da, José, J. V., SALVESTRO, A. de C., GAVA, R. **Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colheita mecanizada.** In: V Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar (EPCC). 2009, Maringá, Paraná.

SÃOJOÃO NET – O Portal de São João do Piauí. Disponível em: <http://www.saojoaonet.com/>. Acesso em 01 de Setembro de 2012.

SIAMIG. Associação das Indústrias Sucroenergética de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.siamig.org.br/>. Acesso em 20 de Agosto de 2012.

SILVA, A. F. da. **Modelagem do Planejamento Agregado da Produção de uma Usina Sucroalcooleira.** 2009. 93 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SILVA, A. T. B. da. **Modelagem e Simulação de Processos (Corte, Carregamento e Transporte) na Produção Agrícola de Açúcar e Álcool.** 2012. 120 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia.

SILVA, J. E. A. R. da. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.** 2006. 145 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SILVA JÚNIOR, C. A. da. **Uma Contribuição ao Estudo da Programação Linear.** 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TAVARES, R. **Proposta de um Sistema de Apoio à Decisão para Controle e Gerenciamento Agrícola em Usinas de Açúcar e Álcool.** 2008. 166 f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

TONETO, JR.; LIBONI, L. B. **Estudo da Competitividade da indústria paulista: Setor sucroalcooleiro.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). 2007. São Paulo.

TORQUATO, S.A. **O que ocorreu na safra de cana-de-açúcar 2007/2008.** v.3, n.2, 2008 . Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=9218>. Acesso em 16 de Agosto de 2012.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Disponível em: <http://www.unica.com.br/>. Acesso em 05 de Setembro de 2012.

VEIGA FILHO, A. A.; FRONZAGLIA, T.; TORQUATO, S. A. **A necessidade de inovação tecnológica agrícola para sustentar o novo ciclo expansionista do setor sucroalcooleiro.** In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Org). Cana-de-açúcar, 2008, Campinas. Instituto Agronômico & Fundação IAC, 882 p.

VIAN, C. E. de F. **Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização.** Campinas, Brazil, Átomo, 2003.

YAMADA, M. C.; KATO, E. R. R.; PORTO, A. J. V. **Estudo da produtividade e da eficiência de produção na indústria sucroalcooleira, com o uso de simulação de sistemas.** In: Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia de Produção, 1998.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; MUSCAT, A. R. N.; BIAZZI, J. L. **Decentralizing ethanol distribution in southeastern Brazil.** Interfaces. 1996. v. 26, n. 6, p. 24-34.

ZILOR - ENERGIA E ALIMENTOS. Disponível em: <http://www.zilor.com.br/zilor/>. Acesso em 27 de Agosto de 2012.

ANEXO I

DADOS DE SAÍDA PARA AS VARIÁVEIS DA OTIMIZAÇÃO – ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO 1

Tabela A1.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 1

XDmt	Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)						
	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 1	7.933,78	7.933,78	758,74	758,74	755,73	755,73	18.896,49
Semana 2	7.490,90	7.490,90	703,23	703,23	699,61	699,61	17.787,49
Semana 3	7.334,32	7.334,32	716,81	716,81	708,97	708,97	17.520,20
Semana 4	7.322,56	7.322,56	1.191,67	1.191,67	1.094,82	1.094,82	19.218,09
Semana 5	7.323,76	7.323,76	1.871,67	1.871,67	1.698,80	1.698,80	21.788,47
Semana 6	7.312,30	7.312,30	2.170,34	2.170,34	2.011,35	2.011,35	22.987,98
Semana 7	7.230,24	7.230,24	2.388,76	2.388,76	2.193,57	2.193,57	23.625,14
Semana 8	7.079,40	7.079,40	2.491,64	2.491,64	2.320,58	2.320,58	23.783,23
Semana 9	6.797,02	6.797,02	2.546,85	2.546,85	2.401,73	2.401,73	23.491,19
Semana 10	6.398,79	6.398,79	2.570,38	2.570,38	2.449,10	2.449,10	22.836,53
Semana 11	5.951,99	5.951,99	2.625,28	2.625,28	2.471,73	2.471,73	22.098,00

Continuação Tab. A1.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)							
XDmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 12	5.593,29	5.593,29	2.622,27	2.622,27	2.488,62	2.488,62	21.408,34
Semana 13	5.348,92	5.348,92	2.610,20	2.610,20	2.483,49	2.483,49	20.885,22
Semana 14	5.201,39	5.201,39	2.579,73	2.579,73	2.462,98	2.462,98	20.488,20
Semana 15	5.103,65	5.103,65	2.529,65	2.529,65	2.427,68	2.427,68	20.121,95
Semana 16	5.017,67	5.017,67	2.466,90	2.466,90	2.372,17	2.372,17	19.713,46
Semana 17	4.922,33	4.922,33	2.438,54	2.438,54	2.310,93	2.310,93	19.343,60
Semana 18	4.846,31	4.846,31	2.347,13	2.347,13	2.241,54	2.241,54	18.869,95
Semana 19	4.770,28	4.770,28	2.296,44	2.296,44	2.162,50	2.162,50	18.458,44
Semana 20	4.718,09	4.718,09	2.246,67	2.246,67	2.089,79	2.089,79	18.109,09
Semana 21	4.692,75	4.692,75	2.194,78	2.194,78	2.017,69	2.017,69	17.810,42
Semana 22	4.705,42	4.705,42	2.075,91	2.075,91	1.927,18	1.927,18	17.417,02
Semana 23	4.750,67	4.750,67	1.910,89	1.910,89	1.809,82	1.809,82	16.942,77
Semana 24	4.821,57	4.821,57	1.713,58	1.713,58	1.645,10	1.645,10	16.360,51
Semana 25	4.925,95	4.925,95	1.453,23	1.453,23	1.436,94	1.436,94	15.632,24
Semana 26	5.067,14	5.067,14	1.125,29	1.125,29	1.170,85	1.170,85	14.726,57
Semana 27	5.251,78	5.251,78	756,63	756,63	817,87	817,87	13.652,56
Semana 28	5.490,41	5.490,41	661,90	661,90	705,95	705,95	13.716,52
Semana 29	5.879,89	5.879,89	669,14	669,14	699,61	699,61	14.497,29
Semana 30	6.579,20	6.579,20	669,14	669,14	686,64	686,64	15.869,97
Total do fornecedor	175.861,76	175.861,76	55.403,39	55.403,39	52.763,32	52.763,32	568.056,94

Tabela A1.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 1	4.163,10	4.163,10	2.371,20	2.371,20	2.308,80	2.308,80	17.686,20
Semana 2	4.011,20	4.011,20	2.336,90	2.336,90	2.281,50	2.281,50	17.259,20
Semana 3	4.250,60	4.250,60	2.875,50	2.875,50	2.316,30	2.316,30	18.884,80
Semana 4	3.034,10	3.034,10	3.214,10	3.214,10	2.062,80	2.062,80	16.622,00
Semana 5	2.126,10	2.126,10	4.915,50	4.915,50	1.598,80	1.598,80	17.280,80
Semana 6	2.842,70	2.842,70	3.498,40	3.498,40	2.150,20	2.150,20	16.982,60
Semana 7	2.071,10	2.071,10	4.749,80	4.749,80	1.564,70	1.564,70	16.771,20
Semana 8	2.006,40	2.006,40	4.762,50	4.762,50	1.587,10	1.587,10	16.712,00
Semana 9	1.947,30	1.947,30	4.731,90	4.731,90	1.707,00	1.707,00	16.772,40
Semana 10	2.475,30	2.475,30	3.448,30	3.448,30	2.284,50	2.284,50	16.416,20
Semana 11	1.900,20	1.900,20	4.614,30	4.614,30	1.839,00	1.839,00	16.707,00
Semana 12	2.012,60	2.012,60	4.363,00	4.363,00	2.060,60	2.060,60	16.872,40
Semana 13	1.949,40	1.949,40	4.395,70	4.395,70	2.060,50	2.060,50	16.811,20
Semana 14	1.886,60	1.886,60	4.422,00	4.422,00	2.027,50	2.027,50	16.672,20
Semana 15	1.969,40	1.969,40	4.242,60	4.242,60	2.183,60	2.183,60	16.791,20
Semana 16	2.349,90	2.349,90	3.296,90	3.296,90	2.566,10	2.566,10	16.425,80
Semana 17	1.894,00	1.894,00	4.421,50	4.421,50	2.080,00	2.080,00	16.791,00
Semana 18	2.287,80	2.287,80	3.305,00	3.305,00	2.595,80	2.595,80	16.377,20
Semana 19	2.203,50	2.203,50	3.417,20	3.417,20	2.555,30	2.555,30	16.352,00
Semana 20	2.227,00	2.227,00	3.509,50	3.509,50	2.594,00	2.594,00	16.661,00
Semana 21	1.963,40	1.963,40	4.492,90	4.492,90	2.201,50	2.201,50	17.315,60
Semana 22	1.893,20	1.893,20	4.721,70	4.721,70	2.004,70	2.004,70	17.239,20
Semana 23	1.969,10	1.969,10	4.249,70	4.249,70	2.255,60	2.255,60	16.948,80

Continuação Tab. A1.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 24	1.864,10	1.864,10	4.598,50	4.598,50	2.183,10	2.183,10	17.291,40
Semana 25	1.803,60	1.803,60	4.657,10	4.657,10	2.184,40	2.184,40	17.290,20
Semana 26	1.953,20	1.953,20	3.652,80	3.652,80	2.842,90	2.842,90	16.897,80
Semana 27	2.664,70	2.664,70	2.714,60	2.714,60	2.723,40	2.723,40	16.205,40
Semana 28	2.510,20	2.510,20	3.772,20	3.772,20	2.938,10	2.938,10	18.441,00
Semana 29	2.710,90	2.710,90	3.115,00	3.115,00	2.993,00	2.993,00	17.637,80
Semana 30	2.655,60	2.655,60	2.679,50	2.679,50	2.612,90	2.612,90	15.896,00
Total do fornecedor	71.596,30	71.596,30	115.545,80	115.545,80	67.363,70	67.363,70	509.011,60

Tabela A1.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)		
XTst	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 1	9.223,00	9.223,00
Semana 2	9.369,00	9.369,00
Semana 3	16.757,00	16.757,00
Semana 4	13.616,00	13.616,00
Semana 5	14.529,00	14.529,00
Semana 6	14.871,00	14.871,00
Semana 7	14.581,00	14.581,00
Semana 8	14.602,00	14.602,00
Semana 9	14.733,00	14.733,00
Semana 10	14.885,00	14.885,00

Continuação Tab. A1.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina - Estudo de Caso - Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)		
XTst	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 11	14.877,00	14.877,00
Semana 12	14.990,00	14.990,00
Semana 13	15.066,00	15.066,00
Semana 14	15.105,00	15.105,00
Semana 15	15.228,00	15.228,00
Semana 16	14.998,00	14.998,00
Semana 17	15.162,00	15.162,00
Semana 18	14.786,00	14.786,00
Semana 19	14.561,00	14.561,00
Semana 20	14.692,00	14.692,00
Semana 21	14.997,00	14.997,00
Semana 22	14.733,00	14.733,00
Semana 23	14.485,00	14.485,00
Semana 24	14.822,00	14.822,00
Semana 25	14.760,00	14.760,00
Semana 26	14.381,00	14.381,00
Semana 27	14.062,00	14.062,00
Semana 28	16.833,00	16.833,00
Semana 29	15.160,00	15.160,00
Semana 30	9.994,00	9.994,00
Total transportado	430.858,00	430.858,00

Tabela A1.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)					
XKpt	Açúcar VHP	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 1	11.505,51	2.451,08	2.176,01	2.177,18	18.309,77
Semana 2	11.320,38	2.476,77	2.208,13	2.209,30	18.214,58
Semana 3	15.769,93	1.613,03	1.456,51	1.457,10	20.296,56
Semana 4	9.831,16	1.104,94	1.046,54	1.047,12	13.029,77
Semana 5	10.564,68	840,39	810,60	810,60	13.026,26
Semana 6	10.373,12	595,69	571,74	571,74	12.112,29
Semana 7	10.648,19	808,85	784,32	784,32	13.025,68
Semana 8	10.673,89	801,26	775,56	775,56	13.026,26
Semana 9	10.626,58	817,03	791,33	791,33	13.026,26
Semana 10	10.245,22	652,34	624,89	624,89	12.147,33
Semana 11	10.639,43	812,35	787,24	787,24	13.026,26
Semana 12	10.603,80	824,03	798,92	798,92	13.025,68
Semana 13	10.603,80	824,62	798,92	798,92	13.026,26
Semana 14	10.627,75	816,44	790,74	790,74	13.025,68
Semana 15	10.576,36	833,96	807,68	807,68	13.025,68
Semana 16	10.018,63	741,10	714,82	714,82	12.189,38
Semana 17	10.602,64	825,79	798,34	798,92	13.025,68
Semana 18	9.911,17	784,32	751,62	751,62	12.198,73
Semana 19	9.931,61	781,98	744,61	744,61	12.202,81
Semana 20	10.022,13	748,11	710,15	710,15	12.190,55
Semana 21	10.505,69	862,58	828,71	828,71	13.025,68
Semana 22	10.577,52	840,39	804,18	804,18	13.026,26
Semana 23	10.668,63	807,68	774,98	774,98	13.026,26

Continuação Tab. A1.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)					
XKpt	Açúcar VHP	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 24	10.517,37	862,58	822,87	822,87	13.025,68
Semana 25	10.517,96	863,75	822,28	822,28	13.026,26
Semana 26	9.901,83	796,00	753,37	753,37	12.204,57
Semana 27	9.971,33	1.088,00	991,64	992,23	13.043,20
Semana 28	15.494,27	1.719,90	1.519,00	1.519,58	20.252,76
Semana 29	13.599,76	2.118,78	1.848,96	1.850,13	19.417,63
Semana 30	10.371,95	2.784,54	2.403,77	2.404,94	17.965,21
Total de cana para produção	327.222,31	32.898,25	30.518,42	30.526,02	421.165,00

Tabela A1.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)				
XEpet	Açúcar VHP (ton)	Melaço (ton)	Álcool AEHC (m ³)	Álcool AEAC (m ³)
Semana 1	1.781,12	76,64	106,05	100,77
Semana 2	1.664,26	79,45	107,14	102,90
Semana 3	1.814,19	77,28	97,88	94,14
Semana 4	1.501,15	73,78	89,97	85,64
Semana 5	1.553,49	71,18	79,46	78,64
Semana 6	1.396,37	71,94	85,61	83,84
Semana 7	1.412,05	69,22	80,87	79,60
Semana 8	1.434,53	68,57	81,03	81,05
Semana 9	1.500,15	70,57	82,72	77,55
Semana 10	1.660,66	72,62	88,70	84,70
Semana 11	1.420,84	70,80	84,04	80,95

Continuação Tab. A1.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 1

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)				
XEpet	Açúcar VHP (ton)	Melaço (ton)	Álcool AEHC (m ³)	Álcool AEAC (m ³)
Semana 12	1.586,05	70,92	87,04	83,91
Semana 13	1.428,64	72,06	82,83	81,04
Semana 14	1.598,54	72,02	84,03	82,03
Semana 15	1.470,49	73,06	86,25	84,18
Semana 16	1.704,61	74,88	92,49	90,19
Semana 17	1.487,97	73,12	87,67	85,88
Semana 18	1.733,88	76,31	88,87	86,41
Semana 19	1.550,79	76,02	90,79	89,56
Semana 20	1.699,92	74,87	90,53	87,84
Semana 21	1.441,02	71,60	85,42	81,85
Semana 22	1.517,83	69,78	83,41	78,14
Semana 23	1.317,46	68,03	78,54	75,93
Semana 24	1.452,71	70,74	83,81	81,13
Semana 25	1.509,94	72,10	83,42	80,99
Semana 26	1.645,08	76,16	92,66	89,96
Semana 27	1.755,75	79,60	104,53	101,46
Semana 28	1.800,90	79,62	101,37	98,85
Semana 29	1.905,78	81,17	110,56	107,97
Semana 30	1.969,80	81,88	115,34	112,92
Total de cada produto	47.716,00	2.216,00	2.713,00	2.630,00

Tabela A1.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 1

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 1	18.896,49	17.686,20	9.223,00	18.309,77
Total Semana 2	17.787,49	17.259,20	9.369,00	18.214,58
Total Semana 3	17.520,20	18.884,80	16.757,00	20.296,56
Total Semana 4	19.218,09	16.622,00	13.616,00	13.029,77
Total Semana 5	21.788,47	17.280,80	14.529,00	13.026,26
Total Semana 6	22.987,98	16.982,60	14.871,00	12.112,29
Total Semana 7	23.625,14	16.771,20	14.581,00	13.025,68
Total Semana 8	23.783,23	16.712,00	14.602,00	13.026,26
Total Semana 9	23.491,19	16.772,40	14.733,00	13.026,26
Total Semana 10	22.836,53	16.416,20	14.885,00	12.147,33
Total Semana 11	22.098,00	16.707,00	14.877,00	13.026,26
Total Semana 12	21.408,34	16.872,40	14.990,00	13.025,68
Total Semana 13	20.885,22	16.811,20	15.066,00	13.026,26
Total Semana 14	20.488,20	16.672,20	15.105,00	13.025,68
Total Semana 15	20.121,95	16.791,20	15.228,00	13.025,68
Total Semana 16	19.713,46	16.425,80	14.998,00	12.189,38
Total Semana 17	19.343,60	16.791,00	15.162,00	13.025,68
Total Semana 18	18.869,95	16.377,20	14.786,00	12.198,73
Total Semana 19	18.458,44	16.352,00	14.561,00	12.202,81
Total Semana 20	18.109,09	16.661,00	14.692,00	12.190,55
Total Semana 21	17.810,42	17.315,60	14.997,00	13.025,68
Total Semana 22	17.417,02	17.239,20	14.733,00	13.026,26
Total Semana 23	16.942,77	16.948,80	14.485,00	13.026,26

Continuação Tab. A1.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 1

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 24	16.360,51	17.291,40	14.822,00	13.025,68
Total Semana 25	15.632,24	17.290,20	14.760,00	13.026,26
Total Semana 26	14.726,57	16.897,80	14.381,00	12.204,57
Total Semana 27	13.652,56	16.205,40	14.062,00	13.043,20
Total Semana 28	13.716,52	18.441,00	16.833,00	20.252,76
Total Semana 29	14.497,29	17.637,80	15.160,00	19.417,63
Total Semana 30	15.869,97	15.896,00	9.994,00	17.965,21
Total Safra	568.056,94	509.011,60	430.858,00	421.165,00

ANEXO II

DADOS DE SAÍDA PARA AS VARIÁVEIS DA OTIMIZAÇÃO – ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO 2

Tabela A2.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 2

XDmt	Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)						
	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 1	7.515,01	7.515,01	763,28	763,28	727,47	727,47	18.011,54
Semana 2	7.123,41	7.123,41	680,69	680,69	663,07	663,07	16.934,34
Semana 3	6.923,56	6.923,56	690,80	690,80	673,47	673,47	16.575,66
Semana 4	6.831,44	6.831,44	1.099,44	1.099,44	998,36	998,36	17.858,48
Semana 5	6.750,29	6.750,29	1.714,86	1.714,86	1.547,65	1.547,65	20.025,60
Semana 6	6.659,03	6.659,03	2.007,12	2.007,12	1.827,49	1.827,49	20.987,28
Semana 7	6.558,81	6.558,81	2.201,77	2.201,77	1.997,59	1.997,59	21.516,35
Semana 8	6.428,57	6.428,57	2.308,91	2.308,91	2.109,93	2.109,93	21.694,83
Semana 9	6.202,73	6.202,73	2.376,49	2.376,49	2.183,29	2.183,29	21.525,02
Semana 10	5.864,26	5.864,26	2.417,50	2.417,50	2.229,78	2.229,78	21.023,09
Semana 11	5.456,20	5.456,20	2.462,55	2.462,55	2.256,35	2.256,35	20.350,20

Continuação Tab. A2.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)							
XDmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 12	5.071,81	5.071,81	2.472,66	2.472,66	2.269,35	2.269,35	19.627,64
Semana 13	4.778,97	4.778,97	2.468,91	2.468,91	2.267,90	2.267,90	19.031,57
Semana 14	4.595,01	4.595,01	2.451,58	2.451,58	2.253,18	2.253,18	18.599,53
Semana 15	4.483,54	4.483,54	2.420,39	2.420,39	2.224,58	2.224,58	18.257,02
Semana 16	4.400,65	4.400,65	2.373,89	2.373,89	2.182,42	2.182,42	17.913,93
Semana 17	4.317,77	4.317,77	2.347,90	2.347,90	2.135,92	2.135,92	17.603,19
Semana 18	4.233,44	4.233,44	2.278,01	2.278,01	2.074,41	2.074,41	17.171,73
Semana 19	4.143,63	4.143,63	2.232,09	2.232,09	2.010,01	2.010,01	16.771,46
Semana 20	4.058,72	4.058,72	2.184,15	2.184,15	1.944,45	1.944,45	16.374,65
Semana 21	3.983,06	3.983,06	2.129,57	2.129,57	1.873,12	1.873,12	15.971,50
Semana 22	3.927,61	3.927,61	2.020,98	2.020,98	1.780,13	1.780,13	15.457,44
Semana 23	3.893,53	3.893,53	1.875,43	1.875,43	1.662,01	1.662,01	14.861,95
Semana 24	3.885,44	3.885,44	1.687,14	1.687,14	1.515,59	1.515,59	14.176,35
Semana 25	3.904,21	3.904,21	1.450,04	1.450,04	1.327,30	1.327,30	13.363,10
Semana 26	3.961,40	3.961,40	1.146,80	1.146,80	1.091,35	1.091,35	12.399,11
Semana 27	4.067,38	4.067,38	786,10	786,10	790,14	790,14	11.287,25
Semana 28	4.251,06	4.251,06	639,68	639,68	679,24	679,24	11.139,96
Semana 29	4.581,44	4.581,44	637,37	637,37	672,31	672,31	11.782,24
Semana 30	5.196,28	5.196,28	619,75	619,75	672,31	672,31	12.976,70
Total do fornecedor	154.048,25	154.048,25	52.945,87	52.945,87	48.640,23	48.640,23	511.268,70

Tabela A2.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 1	1.913,30	1.913,30	2.780,70	2.780,70	1.561,00	1.561,00	12.510,00
Semana 2	1.856,20	1.856,20	2.696,50	2.696,50	1.557,40	1.557,40	12.220,20
Semana 3	1.905,80	1.905,80	4.580,60	4.580,60	1.743,20	1.743,20	16.459,20
Semana 4	1.476,90	1.476,90	4.296,10	4.296,10	1.182,90	1.182,90	13.911,80
Semana 5	1.517,90	1.517,90	5.104,30	5.104,30	1.423,20	1.423,20	16.090,80
Semana 6	1.669,90	1.669,90	4.447,60	4.447,60	1.552,70	1.552,70	15.340,40
Semana 7	1.279,30	1.279,30	5.152,90	5.152,90	1.378,40	1.378,40	15.621,20
Semana 8	1.281,60	1.281,60	5.121,50	5.121,50	1.374,60	1.374,60	15.555,40
Semana 9	1.284,80	1.284,80	5.109,80	5.109,80	1.399,20	1.399,20	15.587,60
Semana 10	1.408,40	1.408,40	4.463,40	4.463,40	1.526,00	1.526,00	14.795,60
Semana 11	1.266,50	1.266,50	5.076,60	5.076,60	1.409,80	1.409,80	15.505,80
Semana 12	1.301,20	1.301,20	5.083,10	5.083,10	1.433,70	1.433,70	15.636,00
Semana 13	1.257,50	1.257,50	5.084,10	5.084,10	1.444,10	1.444,10	15.571,40
Semana 14	1.232,30	1.232,30	5.044,50	5.044,50	1.434,60	1.434,60	15.422,80
Semana 15	1.242,40	1.242,40	5.053,30	5.053,30	1.461,00	1.461,00	15.513,40
Semana 16	1.341,20	1.341,20	4.378,90	4.378,90	1.560,00	1.560,00	14.560,20
Semana 17	1.200,20	1.200,20	5.101,10	5.101,10	1.457,20	1.457,20	15.517,00
Semana 18	1.302,80	1.302,80	4.387,10	4.387,10	1.561,10	1.561,10	14.502,00
Semana 19	1.271,70	1.271,70	4.488,20	4.488,20	1.570,30	1.570,30	14.660,40
Semana 20	1.308,00	1.308,00	4.586,10	4.586,10	1.604,80	1.604,80	14.997,80
Semana 21	1.165,10	1.165,10	5.357,70	5.357,70	1.497,90	1.497,90	16.041,40
Semana 22	1.102,40	1.102,40	5.452,60	5.452,60	1.453,30	1.453,30	16.016,60
Semana 23	1.011,90	1.011,90	5.522,50	5.522,50	1.375,80	1.375,80	15.820,40

Continuação Tab. A2.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 24	1.075,90	1.075,90	5.442,70	5.442,70	1.507,80	1.507,80	16.052,80
Semana 25	1.042,30	1.042,30	5.467,50	5.467,50	1.520,70	1.520,70	16.061,00
Semana 26	1.128,70	1.128,70	4.691,90	4.691,90	1.682,80	1.682,80	15.006,80
Semana 27	1.200,80	1.200,80	4.366,80	4.366,80	1.310,30	1.310,30	13.755,80
Semana 28	1.132,90	1.132,90	5.399,60	5.399,60	1.482,60	1.482,60	16.030,20
Semana 29	1.233,10	1.233,10	4.436,80	4.436,80	1.599,80	1.599,80	14.539,40
Semana 30	1.460,20	1.460,20	2.667,00	2.667,00	1.648,20	1.648,20	11.550,80
Total do fornecedor	39.871,20	39.871,20	140.841,50	140.841,50	44.714,40	44.714,40	450.854,20

Tabela A2.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)		
XTst	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 1	4.749,00	4.749,00
Semana 2	4.850,00	4.850,00
Semana 3	13.322,00	13.322,00
Semana 4	10.762,00	10.762,00
Semana 5	12.994,00	12.994,00
Semana 6	11.600,00	11.600,00
Semana 7	13.135,00	13.135,00
Semana 8	13.166,00	13.166,00
Semana 9	13.207,00	13.207,00
Semana 10	11.584,00	11.584,00

Continuação Tab. A2.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina - Estudo de Caso - Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)		
XTst	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 11	13.290,00	13.290,00
Semana 12	13.312,00	13.312,00
Semana 13	13.372,00	13.372,00
Semana 14	13.395,00	13.395,00
Semana 15	13.427,00	13.427,00
Semana 16	11.486,00	11.486,00
Semana 17	13.376,00	13.376,00
Semana 18	11.300,00	11.300,00
Semana 19	11.245,00	11.245,00
Semana 20	11.385,00	11.385,00
Semana 21	13.223,00	13.223,00
Semana 22	13.154,00	13.154,00
Semana 23	13.174,00	13.174,00
Semana 24	13.151,00	13.151,00
Semana 25	13.100,00	13.100,00
Semana 26	11.025,00	11.025,00
Semana 27	11.236,00	11.236,00
Semana 28	13.201,00	13.201,00
Semana 29	10.326,00	10.326,00
Semana 30	4.853,00	4.853,00
Total transportado	351.400,00	351.400,00

Tabela A2.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)					
XKpt	Açúcar VHP	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 1	1.598,18	1.316,51	4.999,54	5.998,74	13.912,98
Semana 2	1.481,86	1.259,91	5.173,80	5.936,79	13.852,37
Semana 3	7.749,34	848,11	3.150,90	3.743,64	15.491,99
Semana 4	3.340,31	619,93	2.889,29	3.100,09	9.949,62
Semana 5	5.996,51	511,19	1.697,12	1.744,80	9.949,62
Semana 6	4.825,73	328,46	1.297,35	2.824,67	9.276,21
Semana 7	6.069,16	504,50	1.666,81	1.708,71	9.949,17
Semana 8	6.100,80	505,84	1.650,77	1.691,77	9.949,17
Semana 9	6.069,16	490,68	1.670,82	1.718,51	9.949,17
Semana 10	4.781,61	323,11	1.717,62	2.453,87	9.276,21
Semana 11	6.082,08	482,66	1.667,70	1.717,17	9.949,62
Semana 12	6.039,74	467,96	1.691,32	1.750,15	9.949,17
Semana 13	6.062,03	464,39	1.682,86	1.740,35	9.949,62
Semana 14	6.080,30	466,62	1.673,05	1.729,65	9.949,62
Semana 15	6.044,20	453,25	1.694,00	1.757,73	9.949,17
Semana 16	4.611,81	344,50	1.822,35	2.546,12	9.324,79
Semana 17	6.050,44	464,84	1.686,42	1.747,92	9.949,62
Semana 18	4.535,60	362,78	1.878,51	2.571,53	9.348,41
Semana 19	4.602,90	378,38	1.649,43	2.721,27	9.351,97
Semana 20	4.721,45	373,03	1.440,41	2.797,48	9.332,36
Semana 21	5.950,61	470,18	1.730,99	1.797,84	9.949,62
Semana 22	6.006,76	499,15	1.694,00	1.748,82	9.948,73
Semana 23	6.082,97	532,13	1.648,54	1.685,53	9.949,17

Continuação Tab. A2.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)					
XKpt	Açúcar VHP	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 24	5.982,25	485,34	1.709,60	1.771,99	9.949,17
Semana 25	5.988,04	496,48	1.702,91	1.762,19	9.949,62
Semana 26	4.421,51	386,40	1.838,84	2.717,26	9.364,01
Semana 27	3.572,50	515,64	2.701,22	3.160,26	9.949,62
Semana 28	7.478,82	836,97	3.333,62	3.809,60	15.459,01
Semana 29	5.244,66	691,24	4.044,47	4.877,88	14.858,25
Semana 30	1.281,31	1.066,49	5.434,52	5.823,59	13.605,91
Total de cana para produção	154.852,63	16.946,67	68.638,78	81.155,92	321.594,00

Tabela A2.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)				
XEpet	Açúcar VHP (ton)	Melaço (ton)	Álcool AEHC (m ³)	Álcool AEAC (m ³)
Semana 1	1.041,21	43,96	253,98	305,18
Semana 2	902,73	42,34	240,45	291,03
Semana 3	786,03	33,80	171,46	208,12
Semana 4	685,71	33,62	182,35	219,88
Semana 5	747,08	33,62	176,17	218,20
Semana 6	667,67	33,37	174,29	214,84
Semana 7	703,20	33,35	177,67	219,32
Semana 8	716,64	33,31	178,50	223,20
Semana 9	735,24	33,89	178,30	212,71
Semana 10	777,13	33,87	175,92	213,01
Semana 11	697,64	33,96	178,94	217,34

Continuação Tab. A2.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 2

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)				
XEpet	Açúcar VHP (ton)	Melaço (ton)	Álcool AEHC (m ³)	Álcool AEAC (m ³)
Semana 12	774,35	34,04	182,19	220,89
Semana 13	703,04	34,53	175,09	214,35
Semana 14	780,55	34,57	178,46	217,94
Semana 15	711,47	34,72	180,21	220,33
Semana 16	786,19	34,66	180,28	221,07
Semana 17	709,56	34,48	184,22	226,60
Semana 18	783,89	34,81	175,09	214,99
Semana 19	700,50	34,36	175,70	217,86
Semana 20	772,36	34,10	176,55	216,33
Semana 21	696,29	33,80	178,94	217,19
Semana 22	749,07	33,56	179,29	214,05
Semana 23	670,69	33,25	175,89	214,87
Semana 24	713,46	33,83	177,99	217,04
Semana 25	723,23	33,90	177,00	215,81
Semana 26	727,37	33,98	175,54	214,05
Semana 27	716,88	33,96	176,55	215,32
Semana 28	716,40	33,72	170,35	207,86
Semana 29	759,72	34,34	171,81	209,84
Semana 30	970,70	42,34	242,81	295,81
Total de cada produto	22.626,00	1.046,00	5.522,00	6.735,00

Tabela A2.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 2

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 1	18.011,54	12.510,00	4.749,00	13.912,98
Total Semana 2	16.934,34	12.220,20	4.850,00	13.852,37
Total Semana 3	16.575,66	16.459,20	13.322,00	15.491,99
Total Semana 4	17.858,48	13.911,80	10.762,00	9.949,62
Total Semana 5	20.025,60	16.090,80	12.994,00	9.949,62
Total Semana 6	20.987,28	15.340,40	11.600,00	9.276,21
Total Semana 7	21.516,35	15.621,20	13.135,00	9.949,17
Total Semana 8	21.694,83	15.555,40	13.166,00	9.949,17
Total Semana 9	21.525,02	15.587,60	13.207,00	9.949,17
Total Semana 10	21.023,09	14.795,60	11.584,00	9.276,21
Total Semana 11	20.350,20	15.505,80	13.290,00	9.949,62
Total Semana 12	19.627,64	15.636,00	13.312,00	9.949,17
Total Semana 13	19.031,57	15.571,40	13.372,00	9.949,62
Total Semana 14	18.599,53	15.422,80	13.395,00	9.949,62
Total Semana 15	18.257,02	15.513,40	13.427,00	9.949,17
Total Semana 16	17.913,93	14.560,20	11.486,00	9.324,79
Total Semana 17	17.603,19	15.517,00	13.376,00	9.949,62
Total Semana 18	17.171,73	14.502,00	11.300,00	9.348,41
Total Semana 19	16.771,46	14.660,40	11.245,00	9.351,97
Total Semana 20	16.374,65	14.997,80	11.385,00	9.332,36
Total Semana 21	15.971,50	16.041,40	13.223,00	9.949,62
Total Semana 22	15.457,44	16.016,60	13.154,00	9.948,73
Total Semana 23	14.861,95	15.820,40	13.174,00	9.949,17

Continuação Tab. A2.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 2

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 24	14.176,35	16.052,80	13.151,00	9.949,17
Total Semana 25	13.363,10	16.061,00	13.100,00	9.949,62
Total Semana 26	12.399,11	15.006,80	11.025,00	9.364,01
Total Semana 27	11.287,25	13.755,80	11.236,00	9.949,62
Total Semana 28	11.139,96	16.030,20	13.201,00	15.459,01
Total Semana 29	11.782,24	14.539,40	10.326,00	14.858,25
Total Semana 30	12.976,70	11.550,80	4.853,00	13.605,91
Total Safra	511.268,70	450.854,20	351.400,00	321.594,00

ANEXO III

DADOS DE SAÍDA PARA AS VARIÁVEIS DA OTIMIZAÇÃO – ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO 3

Tabela A3.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 3

XDmt	Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)						
	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 1	5.657,23	5.657,23	538,68	538,68	537,82	504,64	13.434,28
Semana 2	5.468,69	5.468,69	509,38	509,38	508,95	537,82	13.002,91
Semana 3	5.519,98	5.519,98	525,32	525,32	525,75	539,11	13.155,46
Semana 4	5.651,20	5.651,20	1.411,78	1.411,78	1.274,95	1.224,96	16.625,86
Semana 5	5.735,23	5.735,23	1.969,42	1.969,42	1.793,38	1.657,41	18.860,10
Semana 6	5.764,97	5.764,97	2.264,19	2.264,19	2.071,12	1.981,27	20.110,70
Semana 7	5.803,75	5.803,75	2.419,54	2.419,54	2.223,68	2.089,87	20.760,13
Semana 8	5.830,69	5.830,69	2.518,01	2.518,01	2.319,78	2.149,12	21.166,30
Semana 9	5.793,84	5.793,84	2.579,64	2.579,64	2.381,40	2.174,76	21.303,12
Semana 10	5.658,52	5.658,52	2.616,70	2.616,70	2.418,68	2.173,69	21.142,81
Semana 11	5.454,90	5.454,90	2.629,20	2.629,20	2.433,55	2.259,88	20.861,62

Continuação Tab. A3.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)							
XDmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 12	5.244,82	5.244,82	2.623,16	2.623,16	2.432,04	2.217,86	20.385,86
Semana 13	5.099,16	5.099,16	2.606,79	2.606,79	2.418,46	2.274,31	20.104,66
Semana 14	5.048,74	5.048,74	2.578,56	2.578,56	2.391,96	2.208,38	19.854,93
Semana 15	5.079,12	5.079,12	2.540,21	2.540,21	2.354,68	2.242,21	19.835,54
Semana 16	5.155,18	5.155,18	2.490,00	2.490,00	2.303,83	2.154,73	19.748,92
Semana 17	5.251,71	5.251,71	2.431,82	2.431,82	2.244,58	2.168,95	19.780,59
Semana 18	5.348,67	5.348,67	2.351,45	2.351,45	2.168,73	2.060,56	19.629,55
Semana 19	5.450,81	5.450,81	2.263,54	2.263,54	2.084,91	2.054,32	19.567,92
Semana 20	5.562,64	5.562,64	2.158,39	2.158,39	1.991,61	1.932,36	19.366,02
Semana 21	5.689,55	5.689,55	2.035,14	2.035,14	1.886,68	1.909,09	19.245,14
Semana 22	5.835,21	5.835,21	1.881,08	1.881,08	1.759,55	1.759,76	18.951,89
Semana 23	6.009,74	6.009,74	1.699,86	1.699,86	1.613,67	1.685,43	18.718,31
Semana 24	6.219,61	6.219,61	1.488,92	1.488,92	1.444,53	1.504,86	18.366,45
Semana 25	6.463,96	6.463,96	1.256,42	1.256,42	1.244,57	1.296,93	17.982,26
Semana 26	6.756,79	6.756,79	998,28	998,28	1.014,44	1.060,99	17.585,58
Semana 27	7.117,06	7.117,06	722,05	722,05	750,49	791,65	17.220,35
Semana 28	7.574,08	7.574,08	509,59	509,59	554,84	594,06	17.316,23
Semana 29	8.212,52	8.212,52	494,72	494,72	521,44	543,21	18.479,14
Semana 30	9.287,73	9.287,73	499,25	499,25	515,41	527,69	20.617,06
Total do fornecedor	178.746,10	178.746,10	53.611,07	53.611,07	50.185,49	48.279,85	563.179,70

Tabela A3.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 1	2.360,00	2.360,00	1.970,00	1.970,00	1.860,00	1.870,00	12.390,00
Semana 2	2.290,00	2.290,00	1.950,00	1.950,00	1.850,00	1.860,00	12.190,00
Semana 3	3.590,00	3.590,00	3.090,00	3.090,00	2.490,00	2.490,00	18.340,00
Semana 4	2.710,00	2.710,00	2.350,00	2.350,00	2.120,00	2.120,00	14.360,00
Semana 5	3.200,00	3.200,00	3.130,00	3.130,00	2.370,00	2.380,00	17.410,00
Semana 6	2.860,00	2.860,00	3.170,00	3.170,00	2.390,00	2.410,00	16.860,00
Semana 7	2.850,00	2.850,00	3.190,00	3.190,00	2.440,00	2.470,00	16.990,00
Semana 8	2.780,00	2.780,00	3.220,00	3.220,00	2.450,00	2.480,00	16.930,00
Semana 9	2.740,00	2.740,00	3.240,00	3.240,00	2.500,00	2.540,00	17.000,00
Semana 10	2.500,00	2.500,00	3.140,00	3.140,00	2.510,00	2.550,00	16.340,00
Semana 11	2.610,00	2.610,00	3.270,00	3.270,00	2.560,00	2.620,00	16.940,00
Semana 12	2.620,00	2.620,00	3.280,00	3.280,00	2.640,00	2.710,00	17.150,00
Semana 13	2.540,00	2.540,00	3.300,00	3.300,00	2.660,00	2.740,00	17.080,00
Semana 14	2.470,00	2.470,00	3.290,00	3.290,00	2.670,00	2.760,00	16.950,00
Semana 15	2.450,00	2.450,00	3.290,00	3.290,00	2.730,00	2.830,00	17.040,00
Semana 16	2.270,00	2.270,00	3.120,00	3.120,00	2.700,00	2.810,00	16.290,00
Semana 17	2.360,00	2.360,00	3.330,00	3.330,00	2.750,00	2.860,00	16.990,00
Semana 18	2.210,00	2.210,00	3.120,00	3.120,00	2.730,00	2.850,00	16.240,00
Semana 19	2.150,00	2.150,00	3.200,00	3.200,00	2.720,00	2.840,00	16.260,00
Semana 20	2.180,00	2.180,00	3.260,00	3.260,00	2.770,00	2.900,00	16.550,00
Semana 21	2.290,00	2.290,00	3.510,00	3.510,00	2.900,00	3.040,00	17.540,00
Semana 22	2.190,00	2.190,00	3.620,00	3.620,00	2.850,00	2.980,00	17.450,00
Semana 23	1.980,00	1.980,00	3.770,00	3.770,00	2.750,00	2.870,00	17.120,00

Continuação Tab. A3.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Arrendada M1	Arrendada M2	Fornecedor M3	Fornecedor M4	Acionista M5	Acionista M6	Total Semanal
Semana 24	2.100,00	2.100,00	3.640,00	3.640,00	2.960,00	3.080,00	17.520,00
Semana 25	2.000,00	2.000,00	3.710,00	3.710,00	2.970,00	3.090,00	17.480,00
Semana 26	1.880,00	1.880,00	3.440,00	3.440,00	2.970,00	3.090,00	16.700,00
Semana 27	2.120,00	2.120,00	2.780,00	2.780,00	2.630,00	2.710,00	15.140,00
Semana 28	2.620,00	2.620,00	3.340,00	3.340,00	3.070,00	3.140,00	18.130,00
Semana 29	2.480,00	2.480,00	3.000,00	3.000,00	2.810,00	2.830,00	16.600,00
Semana 30	1.940,00	1.940,00	2.040,00	2.040,00	1.960,00	1.960,00	11.880,00
Total do fornecedor	73.340,00	73.340,00	93.760,00	93.760,00	77.780,00	79.880,00	491.860,00

Tabela A3.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)		
XTst	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 1	5.830,00	5.830,00
Semana 2	6.000,00	6.000,00
Semana 3	15.930,00	15.930,00
Semana 4	11.130,00	11.130,00
Semana 5	14.520,00	14.520,00
Semana 6	14.310,00	14.310,00
Semana 7	14.680,00	14.680,00
Semana 8	14.710,00	14.710,00
Semana 9	14.810,00	14.810,00
Semana 10	14.380,00	14.380,00

Continuação Tab. A3.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina - Estudo de Caso - Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)		
XTst	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 11	14.940,00	14.940,00
Semana 12	15.060,00	15.060,00
Semana 13	15.130,00	15.130,00
Semana 14	15.170,00	15.170,00
Semana 15	15.250,00	15.250,00
Semana 16	14.520,00	14.520,00
Semana 17	15.140,00	15.140,00
Semana 18	14.320,00	14.320,00
Semana 19	14.170,00	14.170,00
Semana 20	14.210,00	14.210,00
Semana 21	14.960,00	14.960,00
Semana 22	14.770,00	14.770,00
Semana 23	14.610,00	14.610,00
Semana 24	14.830,00	14.830,00
Semana 25	14.740,00	14.740,00
Semana 26	13.770,00	13.770,00
Semana 27	13.150,00	13.150,00
Semana 28	16.110,00	16.110,00
Semana 29	13.820,00	13.820,00
Semana 30	6.530,00	6.530,00
Total transportado	411.500,00	411.500,00

Tabela A3.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)					
XKpt	Açúcar VHP	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 1	2.306,78	1.342,31	2.863,59	8.367,04	14.879,72
Semana 2	2.396,27	1.362,19	2.828,79	8.212,93	14.800,17
Semana 3	12.553,05	1.396,99	1.382,08	1.854,37	17.186,49
Semana 4	5.384,14	1.222,99	1.948,83	2.555,35	11.111,31
Semana 5	9.346,43	696,01	531,95	522,01	11.096,40
Semana 6	8.570,87	586,64	556,81	581,67	10.295,99
Semana 7	9.480,66	666,18	482,24	462,35	11.091,43
Semana 8	9.500,55	661,21	472,29	452,41	11.086,46
Semana 9	9.460,77	666,18	487,21	472,29	11.086,46
Semana 10	8.471,44	626,41	596,58	626,41	10.320,84
Semana 11	9.485,63	656,24	477,26	467,32	11.086,46
Semana 12	9.411,06	666,18	507,09	502,12	11.086,46
Semana 13	9.455,80	656,24	492,18	487,21	11.091,43
Semana 14	9.440,89	661,21	497,15	492,18	11.091,43
Semana 15	9.386,20	666,18	517,04	522,01	11.091,43
Semana 16	8.277,56	681,10	676,12	710,93	10.345,70
Semana 17	9.376,26	671,15	522,01	522,01	11.091,43
Semana 18	8.193,04	715,90	705,95	745,73	10.360,62
Semana 19	8.292,47	696,01	666,18	705,95	10.360,62
Semana 20	8.292,47	691,04	666,18	700,98	10.350,67
Semana 21	9.286,77	696,01	551,84	556,81	11.091,43
Semana 22	9.336,49	696,01	531,95	522,01	11.086,46
Semana 23	9.421,00	681,10	507,09	482,24	11.091,43

Continuação Tab. A3.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)					
XKpt	Açúcar VHP	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 24	9.281,80	700,98	551,84	551,84	11.086,46
Semana 25	9.261,91	705,95	561,78	561,78	11.091,43
Semana 26	8.108,52	745,73	735,78	780,53	10.370,56
Semana 27	6.984,96	855,10	1.237,90	2.028,37	11.106,34
Semana 28	12.712,14	1.481,51	1.297,56	1.660,48	17.151,69
Semana 29	9.997,70	1.620,71	1.914,03	2.803,93	16.336,37
Semana 30	2.744,27	1.466,59	2.749,24	7.636,23	14.596,34
Total de cana para produção	254.217,92	25.638,05	28.516,55	47.547,48	355.920,00

Tabela A3.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)				
XEpet	Açúcar VHP (ton)	Melaço (ton)	Álcool AEHC (m ³)	Álcool AEAC (m ³)
Semana 1	1.195,97	47,26	92,89	146,11
Semana 2	1.240,55	49,44	94,20	158,14
Semana 3	1.287,26	49,98	90,85	145,42
Semana 4	1.234,89	50,32	87,21	145,99
Semana 5	1.194,55	47,03	73,68	117,12
Semana 6	1.164,83	47,12	71,79	120,10
Semana 7	1.146,43	46,86	70,19	113,22
Semana 8	1.140,06	46,92	72,23	112,07
Semana 9	1.174,03	47,38	69,03	115,05
Semana 10	1.178,99	47,95	73,76	116,09
Semana 11	1.175,45	48,21	73,61	121,47

Continuação Tab. A3.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Estudo de Caso – Aplicação 3

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)				
XEpet	Açúcar VHP (ton)	Melaço (ton)	Álcool AEHC (m ³)	Álcool AEAC (m ³)
Semana 12	1.181,11	49,27	76,59	117,12
Semana 13	1.204,46	46,83	73,25	125,02
Semana 14	1.208,71	47,89	75,65	119,41
Semana 15	1.226,40	48,66	78,41	131,33
Semana 16	1.232,77	49,49	82,05	128,81
Semana 17	1.228,52	50,32	82,70	132,59
Semana 18	1.255,41	47,66	79,21	130,75
Semana 19	1.237,72	48,46	81,54	135,80
Semana 20	1.214,37	48,58	79,58	126,63
Semana 21	1.186,77	48,21	75,65	126,40
Semana 22	1.165,54	47,81	70,12	113,22
Semana 23	1.140,06	46,23	67,14	111,73
Semana 24	1.179,69	47,38	72,74	118,26
Semana 25	1.212,95	48,06	75,07	121,93
Semana 26	1.263,91	49,21	82,49	134,88
Semana 27	1.300,00	50,32	91,65	150,69
Semana 28	1.348,83	50,50	92,81	153,21
Semana 29	1.396,24	50,78	96,01	158,94
Semana 30	1.383,50	50,84	97,91	162,50
Total de cada produto	36.700,00	1.455,00	2.400,00	3.910,00

Tabela A3.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 3

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 1	13.434,28	12.390,00	5.830,00	14.879,72
Total Semana 2	13.002,91	12.190,00	6.000,00	14.800,17
Total Semana 3	13.155,46	18.340,00	15.930,00	17.186,49
Total Semana 4	16.625,86	14.360,00	11.130,00	11.111,31
Total Semana 5	18.860,10	17.410,00	14.520,00	11.096,40
Total Semana 6	20.110,70	16.860,00	14.310,00	10.295,99
Total Semana 7	20.760,13	16.990,00	14.680,00	11.091,43
Total Semana 8	21.166,30	16.930,00	14.710,00	11.086,46
Total Semana 9	21.303,12	17.000,00	14.810,00	11.086,46
Total Semana 10	21.142,81	16.340,00	14.380,00	10.320,84
Total Semana 11	20.861,62	16.940,00	14.940,00	11.086,46
Total Semana 12	20.385,86	17.150,00	15.060,00	11.086,46
Total Semana 13	20.104,66	17.080,00	15.130,00	11.091,43
Total Semana 14	19.854,93	16.950,00	15.170,00	11.091,43
Total Semana 15	19.835,54	17.040,00	15.250,00	11.091,43
Total Semana 16	19.748,92	16.290,00	14.520,00	10.345,70
Total Semana 17	19.780,59	16.990,00	15.140,00	11.091,43
Total Semana 18	19.629,55	16.240,00	14.320,00	10.360,62
Total Semana 19	19.567,92	16.260,00	14.170,00	10.360,62
Total Semana 20	19.366,02	16.550,00	14.210,00	10.350,67
Total Semana 21	19.245,14	17.540,00	14.960,00	11.091,43
Total Semana 22	18.951,89	17.450,00	14.770,00	11.086,46
Total Semana 23	18.718,31	17.120,00	14.610,00	11.091,43

Continuação Tab. A3.6 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Estudo de Caso – Aplicação 3

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 24	18.366,45	17.520,00	14.830,00	11.086,46
Total Semana 25	17.982,26	17.480,00	14.740,00	11.091,43
Total Semana 26	17.585,58	16.700,00	13.770,00	10.370,56
Total Semana 27	17.220,35	15.140,00	13.150,00	11.106,34
Total Semana 28	17.316,23	18.130,00	16.110,00	17.151,69
Total Semana 29	18.479,14	16.600,00	13.820,00	16.336,37
Total Semana 30	20.617,06	11.880,00	6.530,00	14.596,34
Total Safra	563.179,70	491.860,00	411.500,00	355.920,00

ANEXO IV

DADOS DE SAÍDA PARA AS VARIÁVEIS DA OTIMIZAÇÃO – EXEMPLO ILUSTRATIVO

Tabela A4.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)							
XDmt	Própria M1	Própria M2	Arrendada M3	Fornecedor M4	Fornecedor M5	Fornecedor M6	Total Semanal
Semana 1	5.677,50	5.677,50	4.780,56	813,56	813,56	813,56	18.576,26
Semana 2	5.755,62	5.755,62	4.835,68	761,21	761,21	761,21	18.630,55
Semana 3	5.592,18	5.592,18	4.670,31	776,45	776,45	776,45	18.184,02
Semana 4	5.462,55	5.462,55	4.640,95	1.709,68	1.709,68	1.709,68	20.695,07
Semana 5	5.450,36	5.450,36	4.742,61	2.368,12	2.368,12	2.368,12	22.747,68
Semana 6	5.489,14	5.489,14	4.888,31	2.763,41	2.763,41	2.763,41	24.156,81
Semana 7	5.566,70	5.566,70	5.019,34	2.944,29	2.944,29	2.944,29	24.985,61
Semana 8	5.571,41	5.571,41	5.121,55	3.074,21	3.074,21	3.074,21	25.486,99
Semana 9	5.565,59	5.565,59	5.211,58	3.167,28	3.167,28	3.167,28	25.844,60
Semana 10	5.575,56	5.575,56	5.318,23	3.238,19	3.238,19	3.238,19	26.183,93
Semana 11	5.618,50	5.618,50	5.457,56	3.224,07	3.224,07	3.224,07	26.366,76

Continuação Tab. A4.1 - Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar disponível nas Fontes de Suprimento (ton)							
XDmt	Própria M1	Própria M2	Arrendada M3	Fornecedor M4	Fornecedor M5	Fornecedor M6	Total Semanal
Semana 12	5.693,57	5.693,57	5.627,09	3.203,29	3.203,29	3.203,29	26.624,10
Semana 13	5.779,99	5.779,99	5.807,70	3.172,82	3.172,82	3.172,82	26.886,14
Semana 14	5.870,02	5.870,02	5.984,98	3.133,76	3.133,76	3.133,76	27.126,31
Semana 15	5.959,49	5.959,49	6.152,57	3.088,61	3.088,61	3.088,61	27.337,39
Semana 16	6.042,04	6.042,04	6.309,91	3.043,74	3.043,74	3.043,74	27.525,20
Semana 17	6.135,95	6.135,95	6.460,60	2.949,55	2.949,55	2.949,55	27.581,15
Semana 18	6.223,48	6.223,48	6.611,01	2.860,63	2.860,63	2.860,63	27.639,88
Semana 19	6.344,25	6.344,25	6.767,80	2.739,86	2.739,86	2.739,86	27.675,89
Semana 20	6.483,31	6.483,31	6.937,32	2.587,78	2.587,78	2.587,78	27.667,30
Semana 21	6.645,08	6.645,08	7.124,86	2.403,02	2.403,02	2.403,02	27.624,09
Semana 22	6.824,58	6.824,58	7.338,15	2.209,12	2.209,12	2.209,12	27.614,67
Semana 23	7.055,05	7.055,05	7.588,84	2.013,83	2.013,83	2.013,83	27.740,43
Semana 24	7.342,30	7.342,30	7.884,68	1.809,40	1.809,40	1.809,40	27.997,49
Semana 25	7.673,05	7.673,05	8.236,48	1.579,76	1.579,76	1.579,76	28.321,86
Semana 26	8.074,71	8.074,71	8.660,57	1.319,10	1.319,10	1.319,10	28.767,29
Semana 27	8.586,61	8.586,61	9.204,89	1.027,97	1.027,97	1.027,97	29.462,02
Semana 28	9.215,69	9.215,69	9.924,27	803,59	803,59	803,59	30.766,44
Semana 29	10.174,13	10.174,13	10.982,71	759,55	759,55	759,55	33.609,62
Semana 30	11.820,37	11.820,37	12.723,69	772,01	772,01	772,01	38.680,48
Total do fornecedor	199.268,82	199.268,82	201.014,78	66.317,86	66.317,86	66.317,86	798.506,00

Tabela A4.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Própria M1	Própria M2	Arrendada M3	Fornecedor M4	Fornecedor M5	Fornecedor M6	Total Semanal
Semana 1	3.974,74	3.974,74	2.810,71	2.782,32	2.782,32	2.782,32	19.107,16
Semana 2	3.804,40	3.804,40	2.739,73	2.782,32	2.782,32	2.782,32	18.695,49
Semana 3	7.140,34	7.140,34	1.646,68	2.029,96	2.029,96	2.029,96	22.017,24
Semana 4	8.105,64	8.105,64	1.717,66	1.944,78	1.944,78	1.944,78	23.763,29
Semana 5	8.233,40	8.233,40	1.944,78	2.399,04	2.399,04	2.399,04	25.608,70
Semana 6	5.522,05	5.522,05	1.774,44	2.228,70	2.228,70	2.228,70	19.504,63
Semana 7	7.424,25	7.424,25	1.533,12	1.888,00	1.888,00	1.888,00	22.045,63
Semana 8	7.339,08	7.339,08	1.533,12	1.873,81	1.873,81	1.873,81	21.832,70
Semana 9	7.452,64	7.452,64	1.561,51	1.930,59	1.930,59	1.930,59	22.258,56
Semana 10	7.523,62	7.523,62	1.660,87	2.143,52	2.143,52	2.143,52	23.138,68
Semana 11	7.339,08	7.339,08	1.589,90	1.987,37	1.987,37	1.987,37	22.230,17
Semana 12	7.452,64	7.452,64	1.646,68	2.044,15	2.044,15	2.044,15	22.684,43
Semana 13	7.310,69	7.310,69	1.646,68	2.058,35	2.058,35	2.058,35	22.443,10
Semana 14	7.168,73	7.168,73	1.660,87	2.072,54	2.072,54	2.072,54	22.215,97
Semana 15	7.424,25	7.424,25	1.774,44	2.228,70	2.228,70	2.228,70	23.309,03
Semana 16	7.026,78	7.026,78	1.859,61	2.228,70	2.228,70	2.228,70	22.599,25
Semana 17	7.736,55	7.736,55	1.873,81	2.512,61	2.512,61	2.512,61	24.884,73
Semana 18	6.828,04	6.828,04	1.873,81	2.271,28	2.271,28	2.271,28	22.343,73
Semana 19	6.970,00	6.970,00	1.845,42	2.257,09	2.257,09	2.257,09	22.556,67
Semana 20	7.225,51	7.225,51	1.845,42	2.271,28	2.271,28	2.271,28	23.110,29
Semana 21	8.077,25	8.077,25	1.802,83	2.597,78	2.597,78	2.597,78	25.750,66
Semana 22	7.566,21	7.566,21	1.618,29	2.214,50	2.214,50	2.214,50	23.394,20
Semana 23	7.069,36	7.069,36	1.518,92	2.001,57	2.001,57	2.001,57	21.662,35

Continuação Tab. A4.2 - Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar colhida nas Fontes de Suprimento (ton)							
XCmt	Própria M1	Própria M2	Arrendada M3	Fornecedor M4	Fornecedor M5	Fornecedor M6	Total Semanal
Semana 24	7.665,58	7.665,58	1.675,07	2.526,80	2.526,80	2.526,80	24.586,62
Semana 25	7.509,43	7.509,43	2.029,96	3.392,73	3.392,73	3.392,73	27.226,99
Semana 26	6.728,67	6.728,67	1.731,85	2.342,26	2.342,26	2.342,26	22.215,97
Semana 27	8.687,65	8.687,65	2.015,76	2.157,72	2.157,72	2.157,72	25.864,22
Semana 28	7.097,76	7.097,76	1.504,72	1.902,20	1.902,20	1.902,20	21.406,83
Semana 29	5.876,94	5.876,94	1.916,39	2.399,04	2.399,04	2.399,04	20.867,40
Semana 30	3.449,51	3.449,51	2.470,02	2.668,76	2.668,76	2.668,76	17.375,31
Total do fornecedor	208.730,79	208.730,79	54.823,06	68.138,45	68.138,45	68.138,45	676.700,00

Tabela A4.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)			
XTst	Transporte Próprio	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 1	10.090,00	3.600,00	13.690,00
Semana 2	10.280,00	3.720,00	14.000,00
Semana 3	15.170,00	4.260,00	19.430,00
Semana 4	16.750,00	4.310,00	21.060,00
Semana 5	20.430,00	1.750,00	22.180,00
Semana 6	11.860,00	3.690,00	15.550,00
Semana 7	16.240,00	5.260,00	21.500,00
Semana 8	16.150,00	5.080,00	21.230,00
Semana 9	16.540,00	5.160,00	21.700,00
Semana 10	15.610,00	3.670,00	19.280,00

Continuação Tab. A4.3 - Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a Usina – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar transportada das Fontes de Suprimento até a usina (ton)			
XTst	Transporte Próprio	Transporte Terceirizado	Total Semanal
Semana 11	16.850,00	5.150,00	22.000,00
Semana 12	17.210,00	4.990,00	22.200,00
Semana 13	17.070,00	5.000,00	22.070,00
Semana 14	17.070,00	5.070,00	22.140,00
Semana 15	17.790,00	5.340,00	23.130,00
Semana 16	15.420,00	3.990,00	19.410,00
Semana 17	18.700,00	5.240,00	23.940,00
Semana 18	15.180,00	4.030,00	19.210,00
Semana 19	15.210,00	3.940,00	19.150,00
Semana 20	15.140,00	3.850,00	18.990,00
Semana 21	18.760,00	5.020,00	23.780,00
Semana 22	17.090,00	5.280,00	22.370,00
Semana 23	15.670,00	5.080,00	20.750,00
Semana 24	17.930,00	5.400,00	23.330,00
Semana 25	21.230,00	290,00	21.520,00
Semana 26	13.970,00	3.490,00	17.460,00
Semana 27	17.940,00	4.140,00	22.080,00
Semana 28	15.170,00	4.230,00	19.400,00
Semana 29	13.020,00	4.330,00	17.350,00
Semana 30	7.740,00	4.090,00	11.830,00
Total transportado	473.280,00	128.450,00	601.730,00

Tabela A4.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)							
XKpt	Açúcar VHP	Açúcar Especial	Açúcar Demerara	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 1	1.130,39	1.695,58	4.298,10	1.485,28	8.642,20	9.141,67	26.393,22
Semana 2	1.143,53	1.675,86	4.094,37	1.478,70	8.721,07	9.174,53	26.288,06
Semana 3	1.051,52	1.590,43	8.983,95	1.570,71	8.221,59	8.609,34	30.027,54
Semana 4	847,79	913,51	7.991,57	1.169,82	3.134,85	3.180,86	17.238,40
Semana 5	571,77	243,16	9.614,86	387,75	3.207,14	3.213,72	17.238,40
Semana 6	670,35	854,36	3.042,84	913,51	5.783,37	5.973,96	17.238,40
Semana 7	966,09	854,36	8.241,31	1.215,82	2.957,41	2.996,84	17.231,83
Semana 8	959,51	880,65	8.136,16	1.228,97	2.996,84	3.036,27	17.238,40
Semana 9	946,37	847,79	8.694,78	1.189,53	2.760,25	2.799,68	17.238,40
Semana 10	676,92	900,37	8.109,87	966,09	2.753,67	2.825,97	16.232,88
Semana 11	939,80	847,79	8.760,50	1.176,39	2.740,53	2.773,39	17.238,40
Semana 12	920,08	841,22	9.062,81	1.150,10	2.615,66	2.648,52	17.238,40
Semana 13	920,08	847,79	8.891,94	1.150,10	2.694,53	2.727,39	17.231,83
Semana 14	926,65	847,79	8.990,52	1.156,67	2.641,95	2.674,81	17.238,40
Semana 15	906,94	762,35	10.120,90	1.058,09	2.181,91	2.208,20	17.238,40
Semana 16	657,20	801,79	7.846,99	906,94	3.016,56	3.088,85	16.318,32
Semana 17	860,93	617,77	11.763,91	887,22	1.531,28	1.577,28	17.238,40
Semana 18	670,35	795,21	7.492,10	926,65	3.194,00	3.272,86	16.351,18
Semana 19	676,92	808,36	7.478,95	939,80	3.180,86	3.259,72	16.344,60
Semana 20	670,35	821,50	7.689,26	952,94	3.049,42	3.128,28	16.311,74
Semana 21	847,79	617,77	11.704,76	854,36	1.583,86	1.629,86	17.238,40
Semana 22	952,94	782,07	9.476,85	1.104,10	2.438,22	2.477,65	17.231,83
Semana 23	979,23	887,22	7.432,95	1.248,68	3.318,87	3.364,87	17.231,83

Continuação Tab. A4.4 - Quantidade de cana-de-açúcar processada das Fontes de Suprimento até a Usina – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de cana-de-açúcar processada para a produção dos produtos finais (ton)							
XKpt	Açúcar VHP	Açúcar Especial	Açúcar Demerara	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 24	913,51	696,63	10.718,96	979,23	1.945,32	1.978,18	17.231,83
Semana 25	584,91	315,46	11.205,29	427,18	2.333,07	2.365,93	17.231,83
Semana 26	755,78	972,66	5.888,53	1.123,81	3.798,63	3.903,78	16.443,18
Semana 27	650,63	814,93	10.738,67	913,51	1.984,75	2.122,76	17.225,25
Semana 28	1.097,53	1.590,43	8.806,50	1.735,01	8.077,01	8.418,75	29.725,23
Semana 29	1.012,09	1.504,99	8.116,44	1.445,84	8.070,44	8.642,20	28.792,00
Semana 30	1.150,10	1.741,58	3.424,02	1.629,86	8.661,92	9.075,95	25.683,44
Total de cana para produção	26.058,04	28.371,39	246.818,64	33.372,70	118.237,14	122.292,08	575.150,00

Tabela A4.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m³)							
XEpet	Açúcar VHP	Açúcar Especial	Açúcar Demerara	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 1	110,52	105,12	838,54	33,68	243,59	249,07	110,52
Semana 2	97,95	102,50	777,71	32,72	218,57	224,51	97,95
Semana 3	103,40	101,96	815,37	33,32	182,58	187,90	103,40
Semana 4	86,62	97,86	669,10	31,48	177,31	181,54	86,62
Semana 5	96,79	93,43	736,68	31,83	180,17	189,43	96,79
Semana 6	87,39	98,53	756,47	32,27	184,56	192,28	87,39
Semana 7	88,04	97,19	687,92	31,04	188,07	197,10	88,04
Semana 8	91,67	90,67	727,51	31,17	196,19	209,38	91,67
Semana 9	94,72	94,23	711,09	31,64	196,63	201,49	94,72
Semana 10	102,68	99,34	750,68	32,27	199,92	208,29	102,68
Semana 11	90,12	98,87	738,13	31,71	198,82	207,63	90,12

Continuação Tab. A4.5 - Quantidade de produtos finais em estoque próprio – Exemplo Ilustrativo

XEpet	Quantidade de produtos finais em estoque próprio (ton ou m ³)						
	Açúcar VHP	Açúcar Especial	Açúcar Demerara	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 12	99,90	96,05	754,06	31,81	205,40	213,99	99,90
Semana 13	90,76	98,26	767,58	32,29	199,26	209,38	90,76
Semana 14	100,22	99,68	743,44	32,20	201,45	210,70	100,22
Semana 15	90,44	101,76	758,89	32,10	198,16	206,97	90,44
Semana 16	101,00	96,79	777,71	32,35	197,72	206,09	101,00
Semana 17	90,44	97,32	808,61	32,06	192,02	200,17	90,44
Semana 18	99,64	98,26	719,30	32,27	185,87	193,16	99,64
Semana 19	89,73	98,33	731,85	32,08	187,19	196,89	89,73
Semana 20	98,41	98,74	731,85	31,87	190,04	198,42	98,41
Semana 21	88,04	100,35	743,92	31,58	190,04	197,76	88,04
Semana 22	93,68	90,94	724,61	31,17	194,43	200,39	93,68
Semana 23	84,29	92,35	720,27	31,08	192,89	202,81	84,29
Semana 24	88,82	95,37	697,09	31,37	187,41	195,57	88,82
Semana 25	94,33	103,64	768,54	32,22	189,16	196,45	94,33
Semana 26	91,15	91,01	719,30	31,52	178,63	184,83	91,15
Semana 27	91,22	93,76	741,03	31,66	174,90	180,88	91,22
Semana 28	91,87	94,90	761,78	31,87	172,49	178,25	91,87
Semana 29	97,76	101,42	767,58	33,26	182,14	187,90	97,76
Semana 30	98,41	101,36	773,37	32,12	214,40	220,78	98,41
Total de cada produto	2.830,00	2.930,00	22.420,00	960,00	5.800,00	6.030,00	2.830,00

Tabela A4.6 - Quantidade de produtos finais em estoque terceirizado – Exemplo Ilustrativo

XEpet	Quantidade de produtos finais em estoque terceirizado (ton ou m ³)						
	Açúcar VHP	Açúcar Especial	Açúcar Demerara	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 1	82,08	56,89	519,55	24,62	157,35	177,50	82,08
Semana 2	78,16	58,47	521,50	24,78	151,44	171,76	78,16
Semana 3	65,26	47,87	436,13	19,61	123,60	140,30	65,26
Semana 4	65,65	51,59	439,54	20,29	132,15	149,04	65,65
Semana 5	66,72	48,75	434,66	20,18	127,11	146,29	66,72
Semana 6	60,35	47,54	428,81	19,26	119,00	136,06	60,35
Semana 7	72,33	57,16	499,55	21,69	147,49	169,01	72,33
Semana 8	74,32	55,96	512,72	21,93	151,65	175,25	74,32
Semana 9	75,40	56,89	505,40	22,08	151,22	169,51	75,40
Semana 10	72,48	53,34	471,74	20,94	136,53	154,53	72,48
Semana 11	73,63	58,09	514,18	22,13	151,87	172,51	73,63
Semana 12	77,09	57,49	518,57	22,24	155,38	176,00	77,09
Semana 13	73,78	58,04	521,01	22,39	151,44	173,01	73,78
Semana 14	77,16	58,47	513,21	22,41	152,97	174,25	77,16
Semana 15	73,25	58,36	513,21	22,26	151,22	172,51	73,25
Semana 16	72,02	52,68	479,54	21,23	136,97	156,03	72,02
Semana 17	68,33	52,90	485,89	20,92	140,26	160,52	68,33
Semana 18	70,33	52,03	453,69	20,94	128,86	147,04	70,33
Semana 19	66,11	51,53	453,69	20,59	128,42	148,04	66,11
Semana 20	69,64	52,24	459,54	20,59	131,05	149,54	69,64
Semana 21	68,26	54,32	480,52	20,79	142,89	162,52	68,26
Semana 22	75,09	56,89	518,57	21,84	155,82	174,75	75,09

Continuação Tab. A4.6 - Quantidade de produtos finais em estoque terceirizado – Exemplo Ilustrativo

Quantidade de produtos finais em estoque terceirizado (ton ou m ³)							
XEpet	Açúcar VHP	Açúcar Especial	Açúcar Demerara	Melaço	Álcool AEHC	Álcool AEAC	Total Semanal
Semana 23	72,33	57,65	519,06	21,93	154,72	176,00	72,33
Semana 24	71,17	55,58	490,28	21,32	149,24	170,01	71,17
Semana 25	62,34	47,87	413,69	19,48	121,85	139,05	62,34
Semana 26	65,49	48,58	442,96	20,05	124,70	142,30	65,49
Semana 27	63,73	47,71	431,74	19,59	121,19	138,05	63,73
Semana 28	64,19	48,20	432,22	19,63	122,29	139,30	64,19
Semana 29	63,42	47,38	418,57	19,59	119,88	136,81	63,42
Semana 30	79,93	59,51	530,28	24,73	151,44	172,51	79,93
Total de cada produto	2.120,00	1.610,00	14.360,00	640,00	4.190,00	4.770,00	2.120,00

Tabela A4.7 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Exemplo Ilustrativo

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 1	18.576,26	19.107,16	13.690,00	26.393,22
Total Semana 2	18.630,55	18.695,49	14.000,00	26.288,06
Total Semana 3	18.184,02	22.017,24	19.430,00	30.027,54
Total Semana 4	20.695,07	23.763,29	21.060,00	17.238,40
Total Semana 5	22.747,68	25.608,70	22.180,00	17.238,40
Total Semana 6	24.156,81	19.504,63	15.550,00	17.238,40
Total Semana 7	24.985,61	22.045,63	21.500,00	17.231,83
Total Semana 8	25.486,99	21.832,70	21.230,00	17.238,40
Total Semana 9	25.844,60	22.258,56	21.700,00	17.238,40
Total Semana 10	26.183,93	23.138,68	19.280,00	16.232,88

Continuação Tab. A4.7 - Total Semanal e Total da Safra das variáveis da otimização – Exemplo Ilustrativo

Total Semanal e Total Safra (ton de cana)				
	XDmt	XCmt	XTst	XKpt
Total Semana 11	26.366,76	22.230,17	22.000,00	17.238,40
Total Semana 12	26.624,10	22.684,43	22.200,00	17.238,40
Total Semana 13	26.886,14	22.443,10	22.070,00	17.231,83
Total Semana 14	27.126,31	22.215,97	22.140,00	17.238,40
Total Semana 15	27.337,39	23.309,03	23.130,00	17.238,40
Total Semana 16	27.525,20	22.599,25	19.410,00	16.318,32
Total Semana 17	27.581,15	24.884,73	23.940,00	17.238,40
Total Semana 18	27.639,88	22.343,73	19.210,00	16.351,18
Total Semana 19	27.675,89	22.556,67	19.150,00	16.344,60
Total Semana 20	27.667,30	23.110,29	18.990,00	16.311,74
Total Semana 21	27.624,09	25.750,66	23.780,00	17.238,40
Total Semana 22	27.614,67	23.394,20	22.370,00	17.231,83
Total Semana 23	27.740,43	21.662,35	20.750,00	17.231,83
Total Semana 24	27.997,49	24.586,62	23.330,00	17.231,83
Total Semana 25	28.321,86	27.226,99	21.520,00	17.231,83
Total Semana 26	28.767,29	22.215,97	17.460,00	16.443,18
Total Semana 27	29.462,02	25.864,22	22.080,00	17.225,25
Total Semana 28	30.766,44	21.406,83	19.400,00	29.725,23
Total Semana 29	33.609,62	20.867,40	17.350,00	28.792,00
Total Semana 30	38.680,48	17.375,31	11.830,00	25.683,44
Total Safra	798.506,00	676.700,00	601.730,00	575.150,00