

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM MODELO BASEADO EM SELEÇÃO DE PROCESSOS E
DIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA O PLANEJAMENTO AGREGADO
DA PRODUÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

RAFAEL PIATTI OITICICA DE PAIVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UM MODELO BASEADO EM SELEÇÃO DE PROCESSOS E
DIMENSIONAMENTO DE LOTES PARA O PLANEJAMENTO AGREGADO
DA PRODUÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Rafael Piatti Oiticica de Paiva

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de São Carlos,
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

SÃO CARLOS

2005

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

P149mb

Paiva, Rafael Piatti Oiticica de.

Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool / Rafael Piatti Oiticica de Paiva. -- São Carlos : UFSCar, 2006.
184 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2006.

1. Planejamento da produção. 2. Seleção de processos. 3. Agroindústria sucroalcooleira. 4. Dimensionamento de lotes. 5. Programação inteira mista. I. Título.

CDD: 658.5038 (20^a)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Rafael Piatti Oiticica de Paiva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 22/02/2006 PELA
COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto
Orientador(a) PPGE/UFSCar

Prof.ª Dr.ª Débora Pretti Ronconi
POLI/USP

Prof. Dr. José Vicente Caixeta Filho
ESALQ/USP

Prof. Dr. Alceu Gomes Alves Filho
Coordenador do PPGE/UFSCar

À minha família, pela dedicação e pelo apoio durante toda minha formação

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu saúde, força de vontade e muita sorte para estar aqui, atingindo mais esta importante etapa da minha vida.

Ao meu pai, por todas as conversas e conselhos durante minha formação, e à minha mãe, por toda educação, devoção e carinho. Não teria conseguido nada sem vocês.

Aos meus irmãos, Vitor e Artur, pelo companheirismo, pelo apoio e por toda a torcida nesta caminhada.

À minha namorada Mariana, pelo apoio e compreensão durante todo esse tempo que ficamos separados pela distância.

Ao Dr. Ricardo Feitosa, por toda a motivação e disponibilidade para ajudar na realização deste trabalho.

À minha prima e amiga Diana, que sempre me motivou e acolheu durante estes dois anos.

Aos meus familiares, pela alegria de todos os encontros, que sempre contribuem para revigorar os ânimos.

Aos meus companheiros de república, Eduardo e Gustavo, por toda a ajuda, pelo apoio e pela amizade construída desde a nossa graduação.

Aos amigos e amigas que conheci em São Carlos, pelo companheirismo, respeito e alegria que sempre nos uniu e continuará unindo.

Aos professores do DEP, em especial à Professora Vitória Pureza, pela motivação e confiança transmitida ao meu trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela contribuição para o enriquecimento deste trabalho.

Ao meu orientador neste trabalho, Professor Reinaldo Morabito, pela atenção, paciência e amizade que demonstrou durante estes dois anos.

Às empresas que abriram as portas para visitas técnicas realizadas durante esta pesquisa.

À Usina Santa Clotilde e a todos os funcionários envolvidos na realização deste trabalho, especialmente Dr. Fernando Oiticica, por todo auxílio, dedicação e visão de futuro.

Meu muito obrigado a todos vocês.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de planejamento agregado da produção que seja capaz de apoiar parte das principais decisões envolvidas no planejamento e controle da produção de uma usina de açúcar e álcool. Este modelo se baseia nos modelos clássicos de seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção para representar o sistema de produção de açúcar, álcool, melado e subprodutos, desde as principais decisões da etapa agrícola até as decisões de estocagem do produto final, passando pelas decisões da fase de corte, carregamento e transporte e, principalmente, as decisões de moagem e escolha do processo produtivo. As decisões são tomadas em períodos semanais e o horizonte de planejamento é o período de safra. Para resolver o modelo de programação linear inteira mista resultante, utilizou-se a linguagem de modelagem GAMS e o *solver* CPLEX. Um estudo de caso foi realizado numa usina de açúcar e álcool localizada no município de Rio Largo, estado de Alagoas. Neste estudo de caso, foi possível verificar a adequação do modelo proposto quando aplicado às decisões envolvidas no planejamento agregado da produção de uma empresa deste tipo. Resultados computacionais são apresentados, resolvendo-se alguns cenários de um exemplo ilustrativo e outros cenários de uma aplicação com dados reais.

Palavras-chave: Planejamento agregado da produção; seleção de processos; dimensionamento de lotes de produção; otimização linear inteira mista; usinas de açúcar e álcool.

ABSTRACT

The main concern of this work is related with the development of an aggregate production planning model of a sugar and alcohol milling company. This mathematical model is based on the process selection model and the production lot-sizing model, and aims to help the decision makers in the production planning and control process of determining the quantity of sugarcane crushed, the selection of sugarcane suppliers, the selection of sugarcane transport system suppliers, the selection of industrial process used in the sugar, alcohol and molasses production and the storage decisions related with this final products. The decisions are taken in a week bases and the planning horizon is the whole sugarcane harvesting season. To solve the mixed integer mathematical problem found in this modeling, we applied the GAMS modeling language and the CPLEX solver. A case study was developed in a sugar and alcohol milling company located in Rio Largo, state of Alagoas, Brazil. The results of this case study helped us to verify the applicability of the proposed model in the aggregate production planning of a milling company. Computational results are presented for some scenarios of one illustrative example and some scenarios in a real data application.

Keywords: *aggregate production planning; process selection; production lot-sizing; mixed integer linear optimization; sugar and alcohol mills.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Delimitação do problema	4
1.3 Objetivos	4
1.4 Justificativa	5
1.5 Metodologia	8
1.6 Organização do trabalho	9
2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	11
2.1 A agroindústria canavieira no Brasil.....	11
2.2 O processo de produção do açúcar, álcool, melaço e subprodutos	15
2.2.1 Etapa agrícola.....	15
2.2.2 Etapa de corte, carregamento e transporte	17
2.2.3 Etapa industrial.....	18
2.3 Planejamento da etapa industrial.....	22
2.3.1 Peculiaridades do planejamento de safra no setor sucroalcooleiro.....	23
2.4 Classificação das usinas em função de sua estratégia de comercialização	25
2.5 Estudo de caso.....	28
3 REVISÃO DA LITERATURA RELACIONADA.....	31
3.1 Modelagem matemática de otimização.....	31
3.2 Modelos determinísticos	32
3.2.1 Modelo de <i>mix</i> de produção	32
3.2.2 Modelo de seleção de processos	33
3.2.3 Modelo de <i>mix</i> de produção com processos alternativos.....	34
3.2.4 Modelo de produção simultânea de múltiplos produtos	35
3.2.5 Modelo de planejamento da produção com múltiplos períodos.....	37
3.2.6 Modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes.....	39
4 MODELAGEM DO PROBLEMA	45
4.1 Método para geração dos parâmetros do modelo.....	47

4.1.1	Cálculo da matriz de rendimentos.....	47
4.1.2	Cálculo da matriz de custos industriais.....	56
4.1.3	Cálculo da matriz de custos agrícolas.....	58
4.2	Modelo matemático proposto.....	61
4.3	Linguagem de modelagem GAMS.....	70
5	RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....	72
5.1	Exemplo ilustrativo.....	72
5.2	Exemplo com dados reais do estudo de caso.....	89
5.2.1	Coleta de dados e resultados do método de geração de parâmetros.....	90
5.2.2	Cenário preliminar.....	93
5.2.3	Modificações decorrentes do processo de validação.....	101
5.2.4	Cenário final.....	105
5.2.5	Comparação entre os resultados do cenário final e os resultados da USC.....	111
5.3	Considerações finais.....	112
6	CONCLUSÕES.....	115
6.1	Perspectivas para pesquisas futuras.....	116
	REFERÊNCIAS.....	118
	APÊNDICE A – Lista de processos utilizados no estudo de caso.....	125
	ANEXO A – Linguagem de modelagem GAMS.....	132
	ANEXO B – Implementação em GAMS do cálculo da matriz de rendimentos.....	137
	ANEXO C – Implementação em GAMS do exemplo ilustrativo.....	140
	ANEXO D – Modelo algébrico (SPDL/PU).....	144
	ANEXO E – Dados de entrada do cenário preliminar.....	153
	ANEXO F – Dados de saída do cenário preliminar.....	158
	ANEXO G – Dados de entrada do cenário final.....	162
	ANEXO H – Dados de saída do cenário final.....	167
	ANEXO I – Modelo algébrico modificado (SPDL/PU2).....	171
	GLOSSÁRIO.....	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Questões que são contempladas no modelo deste trabalho	5
Figura 2. Relação entre modelos e níveis de planejamento e controle de produção (Fonte: Brunstein & Tomiya, 1995).....	7
Figura 3. Etapas da metodologia utilizada (Fonte: adaptada de Law & Kelton, 1991)	9
Figura 4. Evolução da produção de cana-de-açúcar entre as safras 1993/1994 e 2004/2005 (Fonte: Sindaçúcar-AL, 2005)	12
Figura 5. Evolução da produção de açúcar e álcool entre as safras 1993/1994 e 2004/2005 (Fonte: Sindaçúcar-AL, 2005)	13
Figura 6. Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003).....	16
Figura 7. Fluxograma das atividades que compõem a etapa de CCT (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003).....	17
Figura 8. Fluxograma industrial de fabricação de açúcar, álcool, melão e subprodutos (Fonte: Santa Elisa, 2005).....	21
Figura 9. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melão	48
Figura 10. Plano de produção obtido para o cenário base.....	76
Figura 11. Plano de produção encontrado para o cenário II	81
Figura 12. Plano de produção encontrado para o cenário III	83
Figura 13. Plano de produção encontrado para o cenário IV	84
Figura 14. Plano de produção encontrado para o cenário V	86
Figura 15. Plano de produção encontrado para o cenário VI.....	87
Figura 16. Esquema gráfico da evolução do estoque próprio e terceirizado (cenário preliminar).....	94
Figura 17. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por fonte de fornecimento (cenário preliminar).....	95
Figura 18. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por serviço de transporte (cenário preliminar).....	95
Figura 19. Evolução e comparação da moagem durante a safra (cenário preliminar)....	96
Figura 20. Esquema gráfico do plano de produção (cenário preliminar).....	97
Figura 21. Esquema gráfico de produção (cenário preliminar).....	97
Figura 22. Evolução do <i>gap</i> da solução (cenário preliminar)	98

Figura 23. Esquema gráfico da evolução do estoque próprio e terceirizado (cenário final)	106
Figura 24. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por fonte de fornecimento (cenário final)	107
Figura 25. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por serviço de transporte (cenário final)	107
Figura 26. Evolução e comparação da moagem durante a safra (cenário final)	108
Figura 27. Esquema gráfico do plano de produção (cenário final)	108
Figura 28. Esquema gráfico de produção (cenário final)	109
Figura 29. Evolução do <i>gap</i> da solução (cenário final)	110
Figura 30. Níveis de planejamento e integração das várias etapas (Fonte: adaptado de Brunstein & Tomiya, 1995)	114
Figura 31. Estrutura geral do modelo GAMS (Fonte: adaptada de Brooke <i>et al.</i> , 1997)	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados de produtividade da safra 1993/1994 a 2003/2004	12
Tabela 2. Evolução das exportações de açúcar entre 1997 e 2004	13
Tabela 3. Rentabilidade das exportações de açúcar (índice 1994.III=100)	13
Tabela 4. Comparação do tamanho do exemplo ilustrativo e do caso USC	72
Tabela 5. Dados de entrada com variação semanal.....	74
Tabela 6. Dados de custo de estoque de produtos acabados em cada tipo de estoque....	74
Tabela 7. Dados da demanda de cada produto	74
Tabela 8. Dados de capacidade de estocagem dos produtos em cada tipo de estoque ...	74
Tabela 9. Dados de custo de cada processo em cada período	75
Tabela 10. Dados de custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período	75
Tabela 11. Dados da matriz de rendimentos industriais por período, produto e processo	75
Tabela 12. Dados de previsão de safra para cada tipo de fornecimento de matéria-prima	76
Tabela 13. Estoque e demanda relativa ao cenário base	77
Tabela 14. Decisão sobre o fornecimento de matéria-prima no cenário base.....	77
Tabela 15. Decisão sobre o tipo de transporte utilizado no cenário base	78
Tabela 16. Modificações nos parâmetros do exemplo ilustrativo.....	79
Tabela 17. Cenário I: utilização apenas do transporte com frota terceirizada	81
Tabela 18. Cenário II: diminuição do percentual semanal máximo de cana do fornecedor	81
Tabela 19. Decisão sobre o fornecimento de matéria-prima no cenário II	82
Tabela 20. Cenário III: mudança nos limitantes de moagem semanal.....	82
Tabela 21. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário III.....	83
Tabela 22. Decisão sobre o fornecimento de matéria-prima no cenário III.....	83
Tabela 23. Decisão sobre a forma de transporte de cana no cenário III	83
Tabela 24. Cenário IV: mudança na capacidade de estoque próprio	84
Tabela 25. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário IV.....	85
Tabela 26. Cenário V: mudança no valor de mercado dos produtos	85
Tabela 27. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário V.....	86
Tabela 28. Cenário VI: mudança na demanda dos produtos.....	87

Tabela 29. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário VI.....	88
Tabela 30. Disponibilidade de cana e moagem por fonte de fornecimento no período	22
.....	94
Tabela 31. Nomenclatura adotada e função dos profissionais consultados no processo de validação	99
Tabela 32. Comparação do tamanho do cenário preliminar e do cenário final.....	105
Tabela 33. Disponibilidade de cana e moagem por fonte de fornecimento no período	23
.....	106
Tabela 34. Comparação dos resultados globais [Fonte: Anexo H e Santa Clotilde (2005)].....	111
Tabela 35. Lista de processos.....	126
Tabela 36. Dados de entrada constantes (cenário preliminar)	153
Tabela 37. Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (cenário preliminar) ...	153
Tabela 38. Dados de entrada com variação em t (cenário preliminar).....	153
Tabela 39. Dados de custos de plantio, tratos culturais, irrigação e CCT (cenário preliminar).....	154
Tabela 40. Dados de produtividade agrícola da cana própria e arrendada (cenário preliminar).....	154
Tabela 41. Valor dos produtos (cenário preliminar)	155
Tabela 42. Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal (cenário preliminar).....	155
Tabela 43. Demanda semanal de cada produto (cenário preliminar).....	156
Tabela 44. Custo de estocagem de cada produto (cenário preliminar)	156
Tabela 45. Capacidade de estocagem de cada produto (cenário preliminar).....	156
Tabela 46. Estoque inicial dos produtos (cenário preliminar)	156
Tabela 47. Previsão de safra no período inicial (cenário preliminar)	157
Tabela 48. Dados de entrada constantes (cenário final).....	162
Tabela 49. Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (cenário final).....	162
Tabela 50. Dados de entrada com variação em t (cenário final).....	162
Tabela 51. Outros dados de entrada com variação em t e custos CCT (cenário final) .	163
Tabela 52. Dados de produtividade agrícola da cana própria e arrendada (cenário final)	163

Tabela 53. Valor dos produtos (cenário final)	164
Tabela 54. Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal (cenário final)	165
Tabela 55. Demanda semanal de cada produto (cenário final)	165
Tabela 56. Custo de estocagem de cada produto (cenário final).....	165
Tabela 57. Penalização pela estocagem de entressafra (cenário final)	166
Tabela 58. Capacidade de estocagem de cada produto (cenário final)	166
Tabela 59. Estoque inicial dos produtos (cenário final).....	166
Tabela 60. Previsão de safra no período inicial (cenário final).....	166
Tabela 61. Exemplo de composição tecnológica da cana	181
Tabela 62. Tipos de açúcares cristalizados de acordo com o teor de sacarose e a umidade	184

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°brix	Grau brix (unidade de medida de sólidos solúveis em uma solução açucarada)
°INPM	Grau Instituto Nacional de Pesos e Medidas (unidade de medida do teor alcoólico)
°Z	Grau <i>Zugar</i> (unidade de medida do teor de sacarose)
AEAC	Álcool Etílico Anidro Carburante
AEHC	Álcool Etílico Hidratado Carburante
AEI	Álcool Etílico Industrial
AEN	Álcool Etílico Neutro
APPCC	Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle
AR	Açúcares Redutores
ART	Açúcares Redutores Totais
arr	Cana arrendada
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
BPF	Boas Práticas de Fabricação
C/S	Centro/Sul
caci	Cana de acionistas
carrR	Cana arrendada em reforma
carrS	Cana arrendada para socaria
cfor	Cana de fornecedor
cout	Cana de outras fontes
cpropR	Cana própria em reforma
cpropS	Cana própria para socaria
CCT	Corte, Carregamento e Transporte
CLSP	<i>Capacitated Lot-Sizing Problem</i>
CML	<i>Conversational Modeling Language</i>
CONSECANA-AL	Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool do Estado de AL
CONSECANA-SP	Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool do Estado de SP
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz

CPLEX	Contração de C (linguagem de programação) mais SIMPLEX (algoritmo de solução de problemas de programação linear)
CRPAAA	Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de AL
CSLP	<i>Continuous Setup Lot-Sizing and Scheduling Problem</i>
DEP	Departamento de Engenharia de Produção
DLSP	<i>Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem</i>
ELSP	<i>Economic Lot Scheduling Problem</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
Eprop	Estoque próprio de produtos finais
Eterc	Estoque de terceiros de produtos finais
FOB	<i>Free On Board</i>
Fcond	Frota transporte de cana em condomínio de fornecedores
Fprop	Frota própria de transporte de cana
Fterc	Frota terceirizada de transporte de cana
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
GLSP	<i>General Lot-Sizing and Scheduling Problem</i>
IAA	Instituto do Açúcar e do Álcool
LAMP	<i>Language for Mathematical Programming</i>
LINGO	<i>Language for INteractive General Optimization</i>
LM	Linguagem de Modelagem
LPM	<i>System for constructing Linear Programming Models</i>
MCH	Micro Central Hidroelétrica
N/N	Norte/Nordeste
PC	Pol da Cana
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PCTS	Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose
PI	Programação linear Inteira
PIM	Programação linear Inteira Mista
PL	Programação Linear
PLSP	<i>Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem</i>
PNL	Programação Não-Linear
PO	Pesquisa Operacional

Prock	Abreviação de Processo k
prop	Cana própria
PUI	Período de Utilização Industrial
PZA	Pureza em pol
PZA _{ART}	Pureza em ART
s.a.	Sujeito a
Sem t	Abreviação de Semana t
SPDL	Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes
SPDL/PU	Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes aplicado ao Planejamento agregado da produção em Usinas de açúcar e álcool
SPDL/PU2	Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes aplicado ao Planejamento agregado da produção em Usinas de açúcar e álcool, segunda versão
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
u.m.	Unidade monetária
USC	Usina Santa Clotilde
VHP	<i>Very High Polarization</i>
VVHP	<i>Very Very High Polarization</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O cultivo e o processamento da cana-de-açúcar apresentam forte impacto socioeconômico em todo o Brasil. Este sistema agroindustrial possui números expressivos tanto na geração de divisas, na qual o açúcar atingiu 3,47% do total das exportações brasileiras no ano de 2002, quanto na geração de emprego, em que o setor admite diretamente mais de um milhão de brasileiros (UNICA, 2005a).

O setor sucroalcooleiro brasileiro é um dos pioneiros no que diz respeito ao aproveitamento da agroenergia. Podemos destacar o aproveitamento do bagaço, como combustível para geração de energia elétrica e a produção do álcool combustível, utilizado como substituto da gasolina desde as crises do petróleo na década de 1970. Este pioneirismo tem proporcionado uma crescente visibilidade para os produtos brasileiros no mercado internacional, principalmente depois da ratificação do protocolo de Kyoto.

Além destes fatores, o Brasil é atualmente o maior produtor de açúcar e álcool do mundo e, também, o maior exportador destes produtos. Segundo dados apresentados pelo Sindaçúcar-AL (2005), o setor canavieiro processou na safra 1993/1994 o equivalente a 217,5 milhões de toneladas de cana, que geraram 9,3 milhões de toneladas de açúcar e 11,3 milhões de metros cúbicos de álcool. Na safra 2004/2005 foram processadas 385,4 milhões de toneladas de cana, com produção de 26,6 milhões de toneladas de açúcar e 15,4 milhões de metros cúbicos de álcool. Estes dados mostram um crescimento acelerado de 77,2% na quantidade de cana processada em apenas onze safras, fazendo com que a agroindústria canavieira seja um dos setores mais competitivos do agronegócio brasileiro.

Após um longo período de controle estatal sobre o mercado de açúcar e álcool, o setor sucroalcooleiro enfrenta as conseqüências do processo de desregulamentação ocorrido na década passada. Esta desregulamentação provocou modificações drásticas na dinâmica do setor, tendo como algumas de suas conseqüências a diminuição da competitividade das empresas nordestinas em relação às empresas do centro/sul do Brasil (Lima & Sicsú, 2001; Moraes, 2002) e a modificação das estratégias competitivas adotadas pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira (Belik & Vian, 2002; Vian, 2003).

Dentre as principais estratégias competitivas que estão sendo adotadas pelo setor sucroalcooleiro podemos destacar: o aprofundamento da especialização na produção de açúcar e álcool; a busca por diferenciação de produto; a diversificação produtiva; a concentração do setor por meio de fusões e aquisições; e a formação de grupos de comercialização (ou *pools*) de açúcar e álcool. A adoção destas estratégias implica um processo de melhoria dos departamentos agrícola, industrial e de *marketing* das empresas, como mostrado a seguir.

Na área agrícola, estas modificações foram descritas por Kato *et al.* (1997), mostrando que a influência do mercado externo e interno, do mercado de trabalho, do meio ambiente, da competição interna, da globalização e da busca pela sustentabilidade gerou a necessidade de racionalização do processo produtivo. Este processo de mudança e racionalização descrito em Kato *et al.* (1997) foi anteriormente observado por Eid (1996), que mostra a evolução das atividades no setor canavieiro com relação ao corte, carregamento e transporte de cana. Mostra também que a obtenção de variedades especiais de cana-de-açúcar, juntamente com o controle biológico de pragas, vem propiciando a melhoria de qualidade e produtividade dos canaviais e, além disso, que a adoção de sistemas computacionais aplicados à logística de transporte de cana tem sido bastante difundida no setor.

Na área industrial, as principais melhorias que estão sendo buscadas são a modernização das análises de controle de qualidade, a automação das operações produtivas e a redução do consumo de vapor para propiciar investimentos no setor de co-geração de energia (Eid, 1996). Além disso, a busca pela melhoria dos processos por meio de mudanças de base tecnológica tem ocorrido com frequência cada vez mais acentuada. Para tanto, o espaço dado à microeletrônica e à pneumática vem sendo bastante ampliado nas indústrias (Eid *et al.*, 1998). Atualmente, esta realidade continua verdadeira, adicionando-se a intensificação do processo de melhoria da qualidade dos produtos finais, como programas de garantia da qualidade (APPCC, BPF), e a busca de certificação das empresas.

Outro ponto importante nesse processo de melhoria (Vian, 2003) foi o aumento do número de produtos fabricados pelas empresas do setor. Podemos citar como exemplos o açúcar líquido, o açúcar orgânico, a mistura de açúcar com diversos

tipos de adoçantes artificiais e a difusão da comercialização e aproveitamento dos subprodutos (levedura, torta de filtro, melaço, óleo fúseo e bagaço).

Cabe lembrar que estas empresas produzem basicamente açúcar e álcool (*commodities*) e, portanto, enfrentam uma concorrência baseada nos custos de produção. Esta afirmação é bem apropriada para o setor canavieiro nordestino, que se caracteriza pelo baixo índice de aproveitamento de subprodutos e co-produtos, além do baixo índice de diferenciação dos produtos tradicionais, como apontam Lima & Sicsú (2001). Segundo estes mesmos autores, é na diversificação produtiva da agroindústria sucroalcooleira que existe espaço razoável de manobra, podendo vir a ser ocupado com uma ação empresarial mais efetiva, de forma a ampliar a rentabilidade e a competitividade do segmento nordestino e da indústria canavieira em geral.

As estratégias de diversificação e diferenciação dos produtos acarretam uma dificuldade adicional para os profissionais de Planejamento e Controle da Produção (PCP), atuantes na área industrial das usinas de açúcar. Esta dificuldade adicional decorre do aumento da complexidade na seleção dos processos que serão utilizados para a produção de um maior conjunto de produtos, fazendo com que estas estratégias não sejam adotadas da melhor forma possível, ou até mesmo que sejam descartadas. Uma opção para auxiliar nestas atividades de planejamento da produção é a utilização de técnicas de pesquisa operacional que possam auxiliar no planejamento de safra das usinas e destilarias.

Estas técnicas podem apoiar diversas decisões importantes que são consideradas no PCP das usinas, em particular, com respeito à quantidade de cana que deve ser colhida e comprada dos fornecedores, à logística de transporte de cana 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 acabados. Para tanto, deve-se levar em consideração a melhor utilização dos recursos 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 do problema

O objeto de estudo desta dissertação é o processo de planejamento agregado de safra levando, em consideração a etapa agrícola, a etapa de corte, carregamento e transporte (CCT), e a etapa industrial. Nesta análise, admite-se como conhecidos os períodos de utilização industrial (PUI) dos talhões de cana, os períodos de entrega dos produtos finais, os preços de mercado e os custos de produção. O problema é abordado por meio de programação matemática, em particular, programação linear inteira mista usando conceitos de seleção de processos de produção e dimensionamento de lotes.

Um modelo deste tipo pode auxiliar de forma importante no planejamento agregado da produção de uma usina, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises feitas, abrindo portas 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.

1.3 Objetivos

O objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um modelo de planejamento agregado da produção que seja capaz de apoiar parte das principais decisões envolvidas no PCP de uma usina de açúcar e álcool e seja capaz gerar planos de produção eficazes para o período de safra. Para isso, o modelo 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 e de fluxo de caixa positivo sejam consideradas.

Para atingir este objetivo, utilizamos a combinação de um modelo de seleção de processos e de um modelo de dimensionamento de lotes de produção. Este modelo combinado deve responder a questões de planejamento tático de médio prazo, tais como: quanto de cana processar em cada período de análise, quanto de cana obter de cada fonte de fornecimento, que fornecedor de serviço de transporte utilizar para transportar esta matéria prima, que processo utilizar para produzir cada produto demandado e qual a política de estoque, de forma que a empresa maximize sua margem

de contribuição agroindustrial. A Figura 1 ilustra estas decisões, fazendo uma ligação com a etapa do processo produtivo que cada decisão está relacionada.

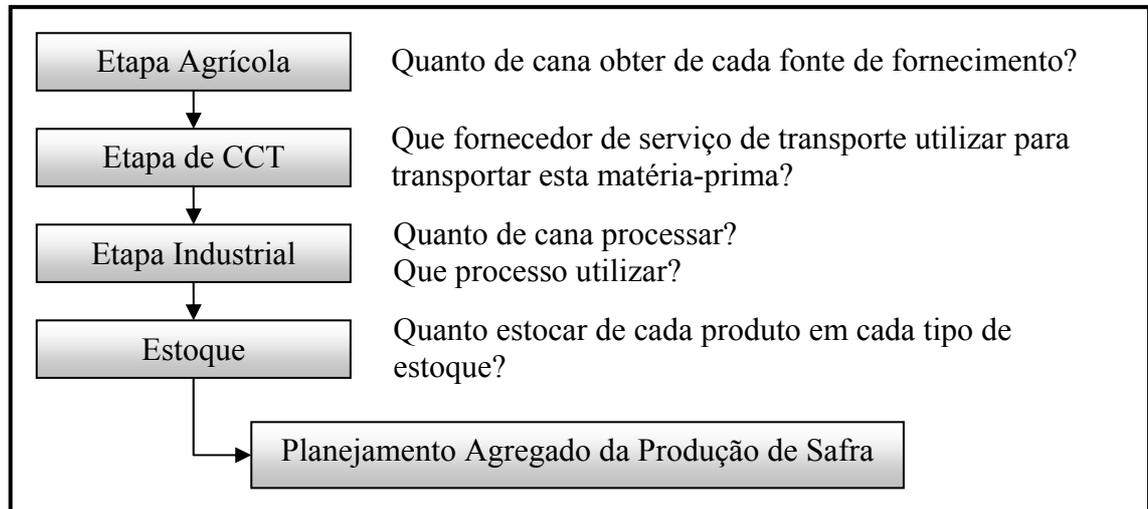


Figura 1. Questões que são contempladas no modelo deste trabalho

1.4 Justificativa

No Brasil, a partir da década de 1990, com a abertura do mercado de açúcar e álcool, o decorrente aumento de competitividade dentro do setor e os avanços na tecnologia de microinformática e computação, pode-se perceber o surgimento de algumas contribuições sobre a utilização de métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira.

Barata (1992) utilizou programação linear para desenvolver um modelo de avaliação tecnoeconômica aplicado às questões relacionadas ao corte e à reforma de canaviais. Lopes (1995) modelou um sistema de transporte, carregamento e reboque a fim de identificar e analisar as variáveis que influenciam o custo de cada uma das operações envolvidas. Grisotto (1995) apresentou um modelo de otimização para o transporte de cana-de-açúcar utilizando transporte rodoviário. Yoshizaki *et al.* (1996) aplicaram um modelo matemático para solucionar o problema da distribuição de álcool no sudeste do Brasil. Yamada (1999) modelou as atividades produtivas de uma usina de açúcar utilizando redes de Petri atemporizadas, para fornecer informações para a construção de modelos de simulação. 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. Iannoni e Morabito (2006) estudaram o sistema de recepção de cana de

uma usina utilizando simulação discreta para analisar a logística de transporte de cana. Kawamura *et al.* (2005) apresentaram um modelo de programação linear, multiperíodo, para tratar decisões de transporte e estocagem dos produtos de uma cooperativa de produtores de açúcar e álcool (COPERSUCAR).

Em outros países produtores de cana-de-açúcar (p.ex., Austrália, Cuba, Colômbia), a utilização de métodos quantitativos aplicados aos problemas da indústria sucroalcooleira já aparece em trabalhos menos recentes. Dentre os principais trabalhos podemos destacar o de Whan *et al.* (1976), que desenvolveram um modelo de composição de variedades de cana-de-açúcar, objetivando otimizar o retorno financeiro de uma fazenda e tendo em conta a programação da colheita que seria adotada na safra (curva de sacarose). Abel *et al.* (1981) desenvolveram um modelo de programação da colheita de cana-de-açúcar utilizando o sistema de transporte ferroviário. Mathew e Rajendran (1993) utilizaram simulação para analisar a programação das atividades de manutenção de uma usina açucareira, onde se pretendeu determinar um bom intervalo entre as paradas para manutenção da usina. Higgins *et al.* (1998) aplicaram um modelo matemático para a determinação da programação da colheita de cana-de-açúcar durante toda uma safra. Cock *et al.* (2000) apresentaram uma metodologia para escolha de variedades de cana por meio da análise do custo total de processamento desta variedade. Higgins e Davies (2005) aplicaram simulação computacional para planejar a capacidade do sistema de transporte de cana-de-açúcar. Além disso, alguns trabalhos mais recentes apresentam modelos e métodos de otimização matemática aplicados à programação e integração do corte de cana com o transporte desta matéria-prima até a usina (Higgins *et al.*, 2004; Milan *et al.*, 2005; Higgins, 2006).

Analisando estas publicações, percebemos que existe um esforço crescente em desenvolver e aplicar modelos e métodos quantitativos para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro, destacando-se os modelos de planejamento da colheita, modelos de programação do transporte de cana, de distribuição e armazenagem de açúcar e álcool, de seleção de variedades e de programação da reforma do canavial. Todos estes trabalhos são voltados para a etapa agrícola, etapa de CCT e para o estoque de produtos finais.

Na etapa industrial, os esforços que vêm sendo empregados para modelar o processo de produção de açúcar, álcool e subprodutos estão restritos às áreas de

engenharia química, engenharia de alimentos, engenharia elétrica, engenharia de processo açucareiro e alcooleiro. Estes estudos estão focados na representação das transformações químicas e físicas que acontecem nas diversas operações unitárias de produção de açúcar e álcool, embasando estudos de análise de investimentos e de melhorias de projeto de equipamentos (Alves, 1994; Lee *et al.*, 1999; Alegre *et al.*, 2003; Rodrigues, 2005; Wissen *et al.*, 2005). Entretanto, até onde temos conhecimento, modelos e métodos quantitativos aplicados ao planejamento das atividades da etapa industrial das usinas de açúcar e álcool não estão disponíveis na literatura. Tendo isso em vista e destacando que esta etapa do sistema agroindustrial canavieiro envolve decisões importantes, entendemos que modelos deste tipo também deveriam ser contemplados.

Dentro desta percepção e tendo em vista a crescente tendência de utilização de uma estratégia de diversificação produtiva nas usinas de açúcar e álcool, percebe-se a importância de se estudar a utilização de modelos quantitativos de planejamento da produção de forma que se possa atingir, da melhor forma possível, os objetivos estratégicos e comerciais da empresa.

Na Figura 2 destacamos como os vários modelos referidos nesta seção podem ser integrados para proporcionar uma análise completa de todo o processo de produção. Nesta mesma figura destacamos o *plano industrial* que se refere ao nível de análise que o modelo proposto nesta dissertação pretende tratar.

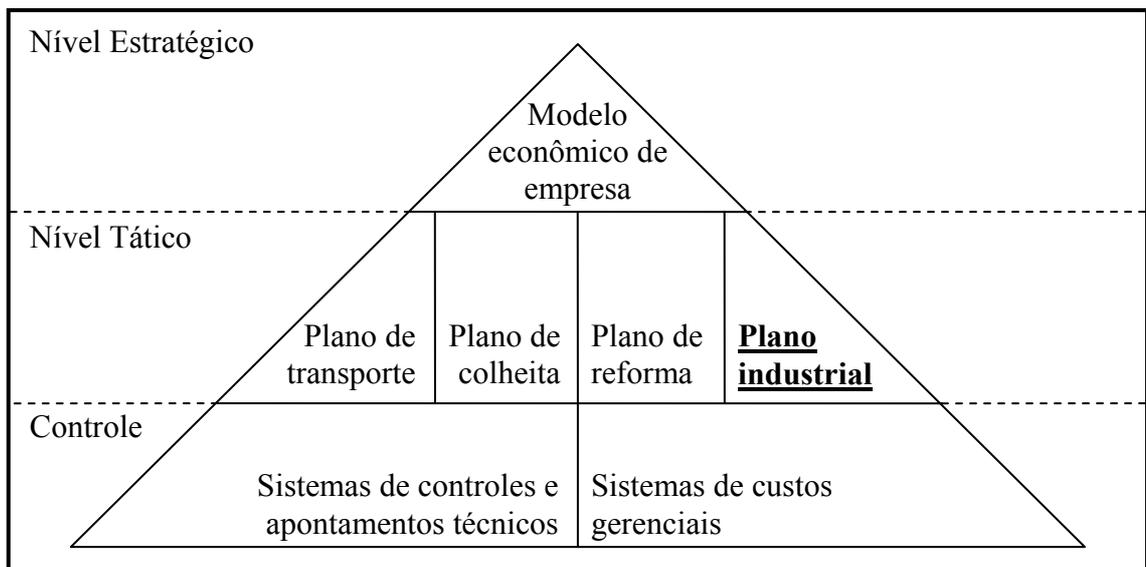


Figura 2. Relação entre modelos e níveis de planejamento e controle de produção (Fonte: Brunstein & Tomiya, 1995)

1.5 Metodologia

Este trabalho utiliza a abordagem de pesquisa quantitativa, pois está centrado na criação de um modelo quantitativo de planejamento agregado da produção. A metodologia adotada para estudar esta abordagem pode ser resumida pelo modelo proposto por Law e Kelton (1991), típico de pesquisa operacional. Este modelo contempla as seguintes etapas:

- (a) *Conceitualização*: consiste na interpretação da realidade, ou partes dela, em um modelo conceitual. Nesta etapa foram feitas visitas a unidades produtoras e revisada a literatura técnica de produção de açúcar, álcool, melão e subprodutos. As informações colhidas foram utilizadas para descrever o processo de produção, desenvolver o método de geração de parâmetros e modelar o planejamento agregado da produção de uma usina;
- (b) *Coleta de dados*: consiste na obtenção de valores dos parâmetros que são necessários para utilizar o modelo. Nesta etapa foram colhidos os dados de relatórios internos da empresa estudada e foi enviado um questionário para obtenção de informações que não se encontravam explícitas;
- (c) *Modelagem*: representação do modelo conceitual por um modelo científico. Após uma revisão dos modelos determinísticos de planejamento da produção e dimensionamento de lotes de produção, foi desenvolvido o modelo SPDL/PU (seção 4.2), proposto nesta dissertação;
- (d) *Experimento*: processo de obtenção de uma solução para o modelo científico. O quarto passo foi implementar o modelo SPDL/PU utilizando a linguagem de modelagem GAMS e resolvê-lo usando o *solver* CPLEX;
- (e) *Validação*: verificar se o modelo científico corresponde à realidade ou ao recorte da realidade considerado. Para melhor compreensão do modelo, foi desenvolvido um exemplo ilustrativo, que auxilia na verificação do funcionamento do código computacional. A validação final foi feita com o apoio do pessoal técnico da empresa, tanto na análise dos resultados quanto no fornecimento de dados reais de planejamento de safra;
- (f) *Documentação e feedback*: análise e documentação da coerência entre a solução obtida e o modelo conceitual. Nesta etapa incluímos a redação desta dissertação

e a obtenção de informações dos decisores da empresa quanto à adequação do modelo proposto ao sistema real.

A Figura 3 resume as etapas da abordagem metodológica utilizada nesta dissertação, com destaque para as setas que conectam as etapas e ilustram a possibilidade de retornar a etapas anteriores para correções ou melhorias na modelagem.

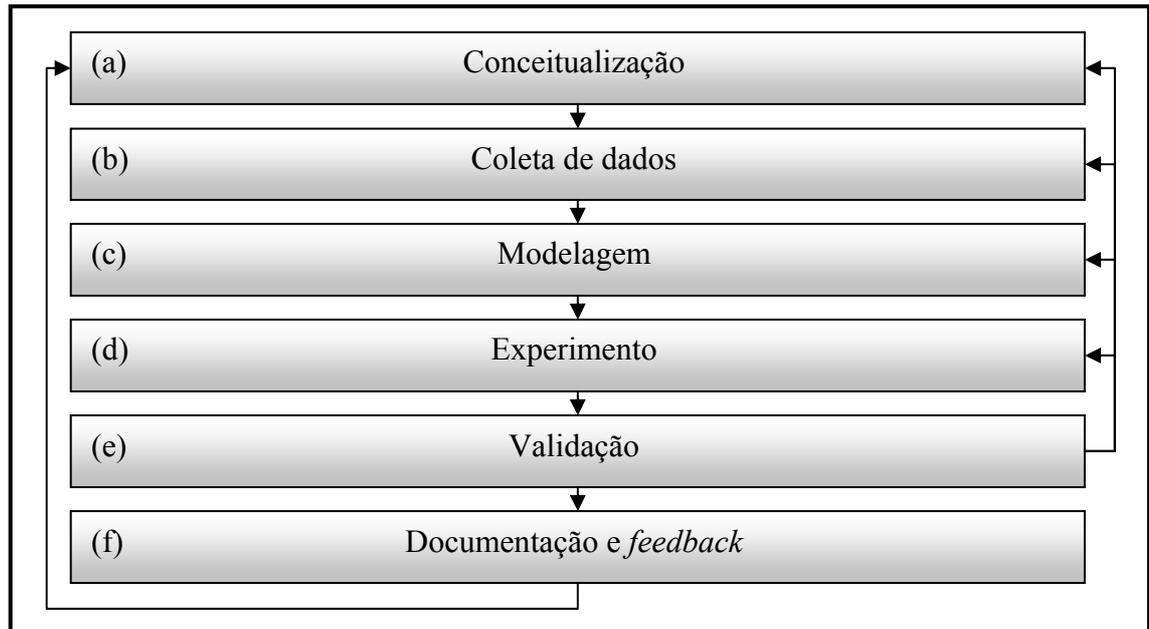


Figura 3. Etapas da metodologia utilizada (Fonte: adaptada de Law & Kelton, 1991)

Este trabalho pode ser classificado como um estudo quantitativo de modelagem empírico descritiva, que utiliza um estudo de caso para obtenção de dados e validação dos resultados obtidos (Bertrand & Fransoo, 2002).

1.6 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, sendo o primeiro o capítulo introdutório. No capítulo 2, inicialmente, apresenta-se a agroindústria canieira no Brasil, seguido-se de uma apresentação de sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e do processo de produção de açúcar, álcool, melado e seus subprodutos. Este capítulo termina com uma discussão mais detalhada das estratégias de comercialização e do sistema de PCP das usinas, e apresenta uma discussão mais detalhada do escopo deste trabalho.

No capítulo 3 faz-se uma breve revisão teórica dos modelos de programação linear e programação linear inteira mista utilizados para planejamento da

produção e dimensionamento de lotes, em múltiplos períodos e múltiplos produtos. Estes modelos são utilizados como base para o modelo matemático proposto nesta dissertação.

No capítulo 4 são apresentados o método de geração de parâmetros e o modelo matemático proposto para representar o planejamento agregado de safra de usina de açúcar e álcool. Na seqüência, apresenta-se a linguagem de modelagem GAMS, utilizada para resolver os modelos desenvolvidos nesta dissertação.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no exemplo ilustrativo, utilizados para validar e testar a consistência do modelo proposto. Neste capítulo apresentamos também a coleta de dados desenvolvida para o estudo de caso, os resultados encontrados na aplicação do modelo proposto em um cenário preliminar e em um cenário final e a validação realizada neste trabalho.

As conclusões e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 6, que finaliza esta dissertação.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1 A agroindústria canavieira no Brasil

Esta seção não pretende apresentar a história do setor canavieiro no Brasil, nem a influência do controle estatal ou da desregulamentação sobre o desenvolvimento das usinas e destilarias, até porque estes temas já foram tratados com propriedade por diversos trabalhos (Loureiro, 1970; Szmrecsányi, 1979; Sperandio, 1990; Lima & Sicsú, 2001; Moraes, 2002; Belik & Vian, 2002; Vian, 2003). O intuito desta seção é apresentar, resumidamente, o cenário vivido pelo setor após a desregulamentação, finalizada em 1999 com a liberação dos preços do álcool hidratado, e apontar para algumas características das sub-regiões produtoras do Brasil.

A agroindústria sucroalcooleira no Brasil constitui um sistema bastante pulverizado em todo o território nacional, com cerca de 350 usinas e/ou destilarias em operação (ORPLANA, 2005). Este sistema agroindustrial possui números expressivos tanto na geração de divisas, na qual o açúcar atingiu 3,47% do total das exportações brasileiras no ano de 2002, quanto na geração de emprego, em que o setor admite diretamente mais de um milhão de brasileiros (UNICA, 2005a).

O Brasil é atualmente o maior produtor de açúcar e álcool do mundo, como também é o maior exportador destes produtos. Segundo dados apresentados pelo Sindaçúcar-AL (2005), o setor canavieiro processou na safra 1993/1994 o equivalente a 217,5 milhões de toneladas de cana e produziu 9,3 milhões de toneladas de açúcar e 11,3 milhões de metros cúbicos de álcool. Na safra 2004/2005 foram processadas 385,4 milhões de toneladas de cana, com produção de 26,6 milhões de toneladas de açúcar e 15,4 milhões de metros cúbicos de álcool, obtendo um crescimento de 77,2% na quantidade de cana processada em onze safras. Na Tabela 1 podemos verificar a variação destas medidas desde a safra 1993/1994 até a safra 2004/2005, tanto para a sub-região Norte/Nordeste (N/N) como para o Centro/Sul (C/S).

Por meio destes dados podemos perceber um crescimento acentuado na produção de cana-de-açúcar, principalmente na sub-região C/S, gerando uma concentração ainda maior da produção (Figura 4). Outro fator que pode ser observado é o crescimento da participação do açúcar na sub-região C/S e a continuidade do *mix* de produção na sub-região N/N, com uma pequena diminuição na porcentagem de álcool produzido do total de cana-de-açúcar processada (Figura 5).

Tabela 1. Dados de produtividade da safra 1993/1994 a 2003/2004

Safra	Cana (mil toneladas)		Açúcar (toneladas)		Álcool (m³)	
	C/S	N/N	C/S	N/N	C/S	N/N
1993/1994	182.891	34.606	7.021.685	2.318.023	10.402.022	908.621
1994/1995	196.157	44.811	8.455.524	3.166.731	11.146.859	1.455.699
1995/1996	205.330	46.016	9.831.548	3.393.906	10.951.512	1.705.753
1996/1997	232.284	57.122	10.421.341	3.209.470	12.113.482	2.319.441
1997/1998	248.310	53.883	11.315.591	3.532.754	13.259.478	2.163.631
1998/1999	268.911	47.573	15.098.275	3.008.878	12.267.168	1.647.654
1999/2000	267.004	43.375	16.892.775	2.575.922	11.697.808	1.380.272
2000/2001	205.203	50.524	12.465.973	3.625.112	8.990.317	1.527.133
2001/2002	243.505	49.505	15.748.527	3.291.220	10.107.831	1.367.802
2002/2003	265.878	50.995	18.592.131	3.852.199	11.014.285	1.472.868
2003/2004	297.121	59.479	20.451.796	4.450.967	12.916.507	1.721.706
2004/2005	328.330	57.103	22.070.707	4.544.386	13.609.474	1.791.045

Fonte: Sindaçúcar-AL (2005)

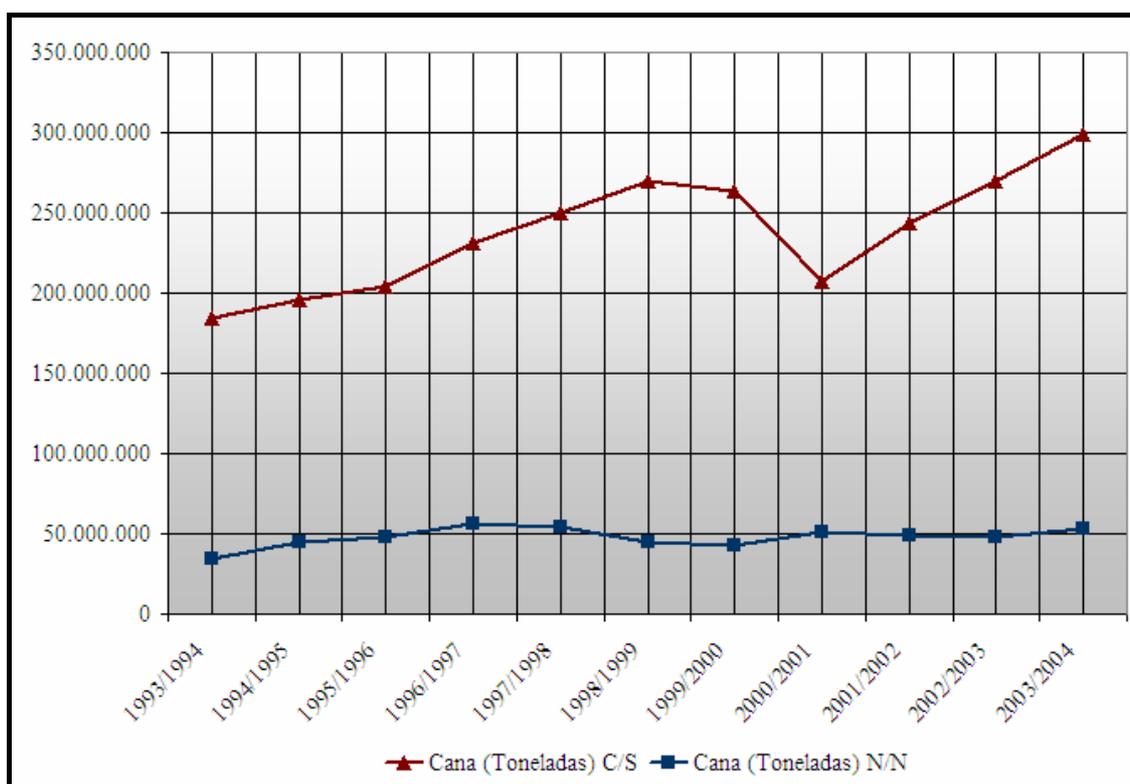


Figura 4. Evolução da produção de cana-de-açúcar entre as safras 1993/1994 e 2004/2005 (Fonte: Sindaçúcar-AL, 2005)

As exportações brasileiras de açúcar também apresentaram crescimento representativo nos últimos anos. Segundo dados do IPEA (2005a) e da SECEX (2005), o Brasil exportou 6.377.482 toneladas de açúcar em 1997 e obteve uma receita de 1.769,8 milhões de US\$ FOB. No ano de 2004 as exportações de açúcar geraram uma receita de 2.645,7 milhões de US\$ FOB com a negociação de 13.010.922 toneladas.

Estes dados mostram um aumento de apenas 50% na receita de exportação e de mais de 100% na quantidade de açúcar exportado (ver Tabela 2). Isto se deve à expressiva perda de rentabilidade nas exportações de açúcar observada nos últimos anos (ver Tabela 3).

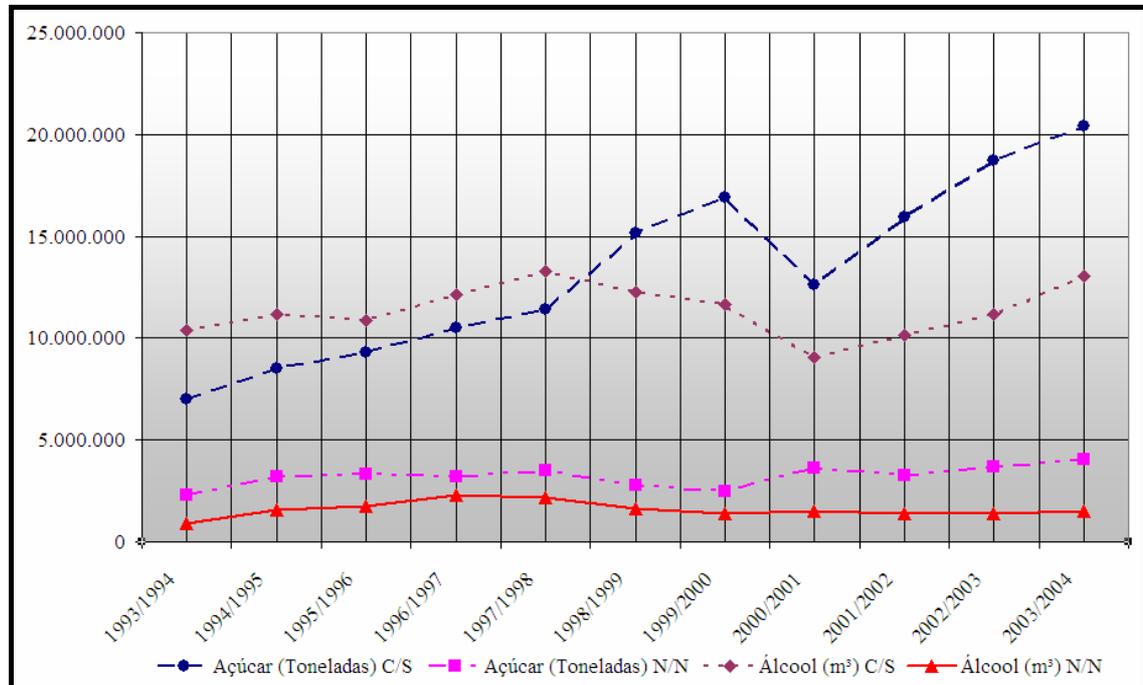


Figura 5. Evolução da produção de açúcar e álcool entre as safras 1993/1994 e 2004/2005 (Fonte: Sindaçúcar-AL, 2005)

Tabela 2. Evolução das exportações de açúcar entre 1997 e 2004

Ano	Açúcar (t)	Receita (milhões US\$ FOB)
1997	6.377.482	1.769,8
1998	8.372.602	1.940,8
1999	12.124.224	1.910,7
2000	6.506.359	1.199,4
2001	11.170.657	2.279,2
2002	13.367.822	2.103,7
2003	12.914.968	2.150,4
2004	13.010.922	2.645,7

Fonte: IPEA (2005a) e SECEX (2005)

Tabela 3. Rentabilidade das exportações de açúcar (índice 1994.III=100)

Ano	Rentabilidade das exportações de açúcar (índice - 1994.III = 100)
1998	72,973
1999	70,065
2000	66,594
2001	82,965
2002	66,557
2003	60,040
2004	55,445

Fonte: IPEA (2005b)

O álcool brasileiro é um produto que vinha sendo tradicionalmente consumido pelo mercado interno; porém, nestes últimos anos, vem ganhando também o mercado externo, principalmente depois da ratificação do protocolo de Kyoto. Dados da SECEX (2005) indicam que as exportações de álcool alcançaram a marca de 2,4 milhões de metros cúbicos em 2004, sendo nossos maiores importadores os países asiáticos, com 44% do total exportado até outubro deste mesmo ano. Este valor corresponde a 16% da produção nacional e coloca o Brasil como maior exportador de álcool do mundo, sendo responsável por 47% de todo este comércio (UNICA, 2005b). Além das exportações, o consumo de álcool combustível também vem crescendo no mercado interno devido ao advento dos carros flexíveis.

Outro produto que deve ser incorporado definitivamente no escopo do setor canavieiro é a energia elétrica proveniente da utilização do bagaço com combustível de centrais termoelétricas de biomassa. Atualmente, cerca de 22% da energia gerada nas usinas do Brasil já é comercializada, totalizando 600MW na safra 2004/2005. Só no estado de São Paulo, 46 usinas contribuem com 450MW gerados e comercializados para quatro distribuidoras: CPFL, Elektro, AES/Eletropaulo e Grupo Rede. Dentre as usinas produtoras podemos destacar a usina Equipav, que contribuiu com 55MW deste total e a usina Santa Adélia, que contribuiu com 32MW deste total (COGEN, 2005).

Este quadro de crescimento promete continuar aquecido dentro dos próximos anos. Segundo dados da UNICA (2005c), o Brasil deve contar com mais 70 usinas de médio e grande porte até o ano de 2013, aumentando a safra de cana-de-açúcar para valores em torno de 550 milhões de toneladas. Ou seja, um crescimento em torno de 40% da produção de cana atual. Para o açúcar, estima-se uma demanda adicional de 7 milhões de toneladas e, para o álcool, estima-se uma demanda adicional de 10 milhões de metros cúbicos, gerando um faturamento adicional estimado de US\$ 4,5 bilhões por ano.

Os dados apresentados nesta seção mostram a competitividade da agroindústria canavieira do Brasil e sua importância no mercado internacional. A próxima seção descreve, de forma generalista, o processo de produção dos principais produtos deste setor.

2.2 O processo de produção do açúcar, álcool, melaço e subprodutos

Nesta seção, procuramos descrever de forma genérica o processo de produção de açúcar, álcool, melaço e subprodutos. Tendo como base os estudos de Hugot (1977), Payne (1989), ICIDCA (1999), Castro *et al.* (2002), Fernandes (2003) e Medeiros (2005), além da experiência adquirida pelo autor desta dissertação, tanto na Usina Santa Clotilde (USC), onde foi feito o estudo de caso, quanto em 22 visitas técnicas realizadas em diferentes unidades produtoras antes e durante a realização deste trabalho, a saber: usina Leão, usina Caeté filial Cachoeira, usina Caeté filial Delta, usina Coruripe matriz, usina Coruripe filial Campo Florido, usina Coruripe filial Iturama, usina Seresta, usina Porto Rico, destilaria autônoma Porto Alegre, usina João de Deus, usina Terra Nova, usina Da Barra, usina Batatais, usina Cerradinho, usina Alto Alegre unidade Floresta, usina Santa Adélia, usina São Francisco, usina Ipiranga, usina São João, usina Santa Lúcia, usina Ferrari, usina Cresciumal.

Entende-se que as etapas e processos que são descritos nesta seção são suficientemente genéricos para representar todas as unidades produtivas e proporcionar uma visão clara do sistema de produção que está sendo estudado nesta dissertação. Para representar uma empresa em especial, são necessárias pequenas modificações, tendo em vista as especificidades de cada corporação.

Para entender o funcionamento das empresas canavieiras é fundamental entender a interação entre campo e indústria, dado que a cana-de-açúcar é responsável pela “produção” dos açúcares e a usina é responsável pela sua recuperação (fabricação de açúcar) ou sua fermentação e destilação (fabricação de álcool). Para analisar esta interação é suficiente subdividir o processo de produção em três etapas principais: etapa agrícola, etapa de CCT e etapa industrial, que são descritas a seguir.

2.2.1 Etapa agrícola

A etapa agrícola pode ser subdividida em três atividades: (a) preparo do solo, sulcação e adubação, plantio e cultivo da cana-planta; (b) tratos culturais da socaria; e (c) irrigação da cana-planta e da socaria. A etapa de CCT é muitas vezes considerada como parte integrante da etapa agrícola, estando subordinada à gerência agrícola das usinas; porém, nesta dissertação esta etapa é tratada separadamente. A Figura 6 descreve esquematicamente esta etapa de produção.

A primeira atividade da etapa agrícola está representada na Figura 6 pela letra **a**. Nesta atividade são executados os processos de preparo do solo, que ocorrem entre junho e agosto no C/S e entre dezembro e fevereiro no N/N, e caracterizam-se pela retirada da soqueira e aplicação de corretivos agrícolas. Nestes processos podem ser utilizados resíduos industriais como a torta de filtro ou impurezas minerais retiradas na lavagem da cana. Após o preparo do solo e antes do processo de sulcação e plantio, que ocorre entre janeiro e março no C/S e entre junho e agosto no N/N, pode ser realizado o plantio de culturas anuais para utilizar produtivamente o período de entressafra e para fixar nitrogênio no solo com a rotação de culturas. Apesar de existir um espaço de seis meses entre estes dois processos, eles são considerados como pertencentes à mesma atividade da etapa agrícola.

O segundo processo da atividade **a** (sulcação, adubação, plantio e cultivo) é de fundamental importância para o bom desempenho do canavial. Neste processo são utilizadas as mudas para o plantio e grande parte do volume de resíduos industriais gerados (p.ex.,vinhaça, torta de filtro).

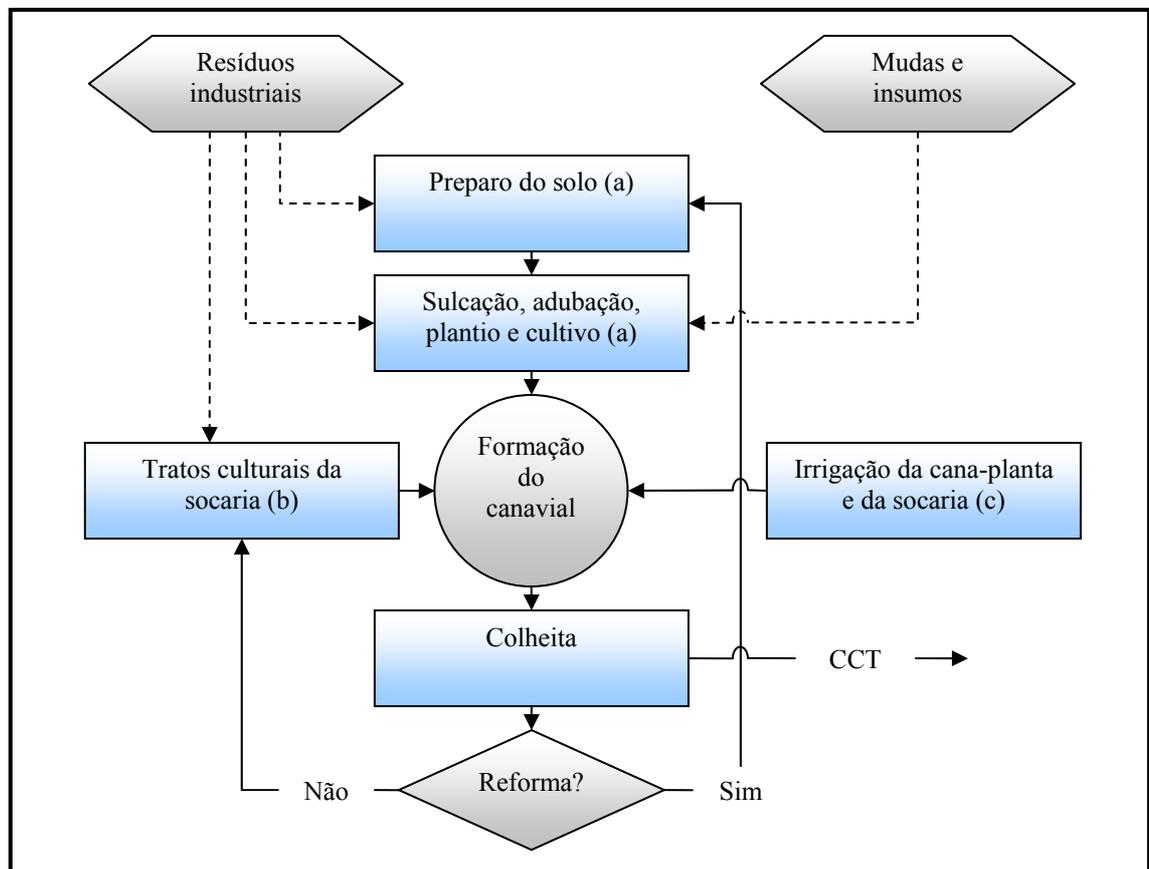


Figura 6. Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)

Na atividade **b** são executados os tratos culturais da socaria, aplicação de vinhaça, controle de plantas daninhas e correção do pH do solo. Esta atividade existe pelo fato da cana 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 subseqüentes, a socaria (parte terrestre da cana-de-açúcar que contém as raízes e a base da planta) é deixada no campo e deve ser tratada para manter o desempenho produtivo das safras anteriores. Portanto, esta atividade é executada em aproximadamente 80% do canavial enquanto a atividade **a** é executada em aproximadamente 20% de cultivo.

A irrigação é considerada, nesta dissertação, como a terceira atividade da etapa agrícola (atividade **c**), visto que existe uma crescente importância desta técnica, principalmente na sub-região N/N. Esta técnica consiste na aplicação de água para compensar os longos períodos de seca e proporcionar um rendimento agrícola mais elevado. A colheita da cana-de-açúcar seria a quarta atividade da etapa agrícola, porém, nesta dissertação, consideraremos esta atividade como parte integrante da etapa de CCT.

2.2.2 Etapa de corte, carregamento e transporte

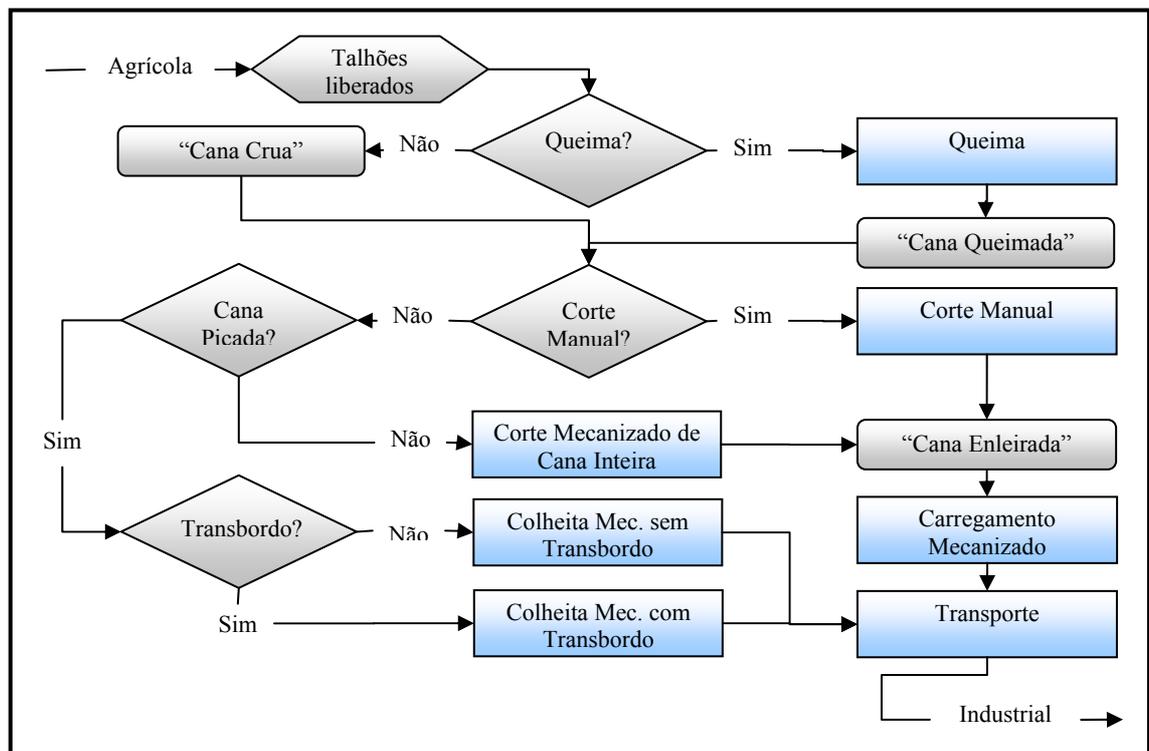


Figura 7. Fluxograma das atividades que compõem a etapa de CCT (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)

Esta etapa consiste numa eventual operação de queima da cana-de-açúcar, nas operações de corte da cana queimada ou utilização de colheita mecanizada para a cana crua, na operação de carregamento dos caminhões e na operação de transporte da cana para a unidade de processamento. A Figura 7 ilustra estas operações.

2.2.3 Etapa industrial

A etapa industrial se inicia com a pesagem e análise da cana para fins de pagamento do fornecedor pelo sistema PCTS (Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose) ou para fins de controle dos rendimentos industriais. Nesta fase são determinados a pol, o AR, o ART, o ATR, o brix, a fibra e a pureza da cana. Após a pesagem e amostragem, a cana passa diretamente para a mesa alimentadora ou vai para o estoque de cana, onde posteriormente é levada por meio de garfos hidráulicos até a mesa alimentadora.

Na mesa, a cana passa por um lençol d'água para retirada de impurezas minerais e vegetais. Após a lavagem da cana, a água contaminada passa por um sistema de tratamento, onde as impurezas grosseiras são retiradas por peneiramento e os demais contaminantes são retirados em células de decantação. A água peneirada e decantada volta à mesa alimentadora, enquanto o lodo é descartado ou enviado para o campo.

Em seguida, a cana é transportada por esteiras metálicas aos picadores e ao desfibrador. Nestes equipamentos a cana é picada e desfibrada de forma que apresente o maior índice possível de células abertas e possibilite uma maior extração da sacarose pelas moendas ou pelo difusor.

Após a atividade de preparo, a cana cai em uma esteira de borracha onde passa sobre um eletroímã para retirada de partículas metálicas que acompanham a matéria-prima. Logo em seguida é iniciada a alimentação da moenda. Cada conjunto de moagem é composto por cinco ou sete ternos. Cada terno possui de três a cinco rolos, por onde passa a cana desfibrada e onde é separado o caldo do bagaço. Uma pequena quantidade de bagaço sai junto com o caldo, sendo retirado por uma peneira rotativa e devolvido à moenda.

O bagaço resultante é levado por uma esteira até as caldeiras para a queima e a produção de vapor. A sobra de bagaço é enviada a um depósito ao ar livre onde pode retornar para a produção de vapor, ou pode ser vendida caso a empresa já tenha acumulado um estoque estratégico suficiente para iniciar a próxima safra sem

necessidade de combustível externo. O vapor das caldeiras alimenta turbinas para a movimentação de máquinas e turbo-geradores que produzem a energia elétrica necessária às atividades de produção de açúcar, álcool e uma eventual co-geração 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.

O caldo extraído das moendas é conduzido para a fabricação do açúcar, ou para a destilaria, em uma proporção dependente da capacidade e da necessidade da empresa. No caso do desvio para a fabricação do açúcar de consumo direto (p.ex., cristal *standard*), o caldo passa por um aquecimento prévio e posteriormente reage com o anidrido sulfuroso produzido em fornos com a queima do enxofre. No caso da produção de açúcar bruto (p.ex., VHP), este processo não é utilizado. Logo após, o caldo recebe leite de cal até neutralizar o meio. A adição da cal e do enxofre serve para uma reação química com as impurezas existentes no caldo, as quais são eliminadas na seqüência do processo. O caldo é aquecido em trocadores de calor até uma temperatura de 105 °C.

Logo após o aquecimento, o caldo entra no balão de *flash*, onde são eliminados os vapores oclusos produzidos no aquecimento; logo em seguida, o caldo é levado aos decantadores, que servem para separar o caldo de suas impurezas (lodo ou cachaça). O lodo é posteriormente tratado em filtros rotativos ou prensas desaguadoras, onde se obtém a torta de filtro que é utilizada na lavoura como fertilizante.

O caldo proveniente dos decantadores (caldo clarificado) é levado à pré-*evaporação* para concentração e eliminação de aproximadamente 35% da água. A complementação da *evaporação* se efetua em três, quatro ou cinco estágios de *evaporação*, ligadas em série, e o produto final é um xarope com 55 a 65 °brix.

Na produção de açúcar de consumo direto, o xarope passa por flotações para retirada de outras impurezas e segue para os cozedores (também conhecidos como tachos ou vácuos). No caso da produção de açúcar bruto, o processo de flotação pode ser dispensado. Nos cozedores as sementes de açúcar são implantadas e desenvolvem-se até atingir o tamanho de cristais comerciais. Este processo pode ser desenvolvido em dois ou três estágios (também denominados de duas ou três massas), dependendo da vocação açucareira da usina em questão. Dos cozedores, os cristais vão a um regulador de fluxo entre o cozimento e a centrifugação, que também é responsável por

proporcionar o final da formação dos cristais. Estes equipamentos são chamados de cristalizadores. 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 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, xarope, mel final e água. Esta mistura deve ser feita de acordo com a política de produção de açúcar, álcool e melaço da empresa e de forma que sejam proporcionadas boas condições para a operação de fermentação. O mosto é enviado às dornas de fermentação e é misturado com as leveduras, o fermento. Este substrato, depois de aproximadamente sete horas é transformado em vinho levedado, contendo entre 6% e 10% de álcool e as leveduras utilizadas no processo. O vinho levedado é levado às centrífugas que separam o vinho das leveduras. O fermento será tratado e retorna à fermentação. Uma parte deste fermento (leveduras) pode ser retirada deste ciclo fermentativo e utilizada para a obtenção de proteína animal.

O vinho obtido é enviado à destilação. A primeira coluna fabrica a cachaça, a segunda recupera o álcool hidratado e, na seqüência 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.

Para ilustrar toda a etapa industrial de produção de açúcar, álcool, melaço e subprodutos, apresentamos a Figura 8, que representa a planta industrial da Companhia Energética Santa Elisa. Nesta figura, podemos ter uma visão geral de todas as atividades descritas nesta seção por meio da ilustração dos processos de recepção de cana, lavagem da cana, preparo da cana (por meio das navalhas e desfibradores), extração do caldo (em moendas), geração de vapor, tratamento de caldo, fabricação de açúcar e fabricação de álcool. Podemos perceber também outras atividades periféricas, como o tratamento de água para as caldeiras, o resfriamento de água de processo, o armazenamento dos produtos e de tipo de transporte utilizado para movimentar os produto e subprodutos.

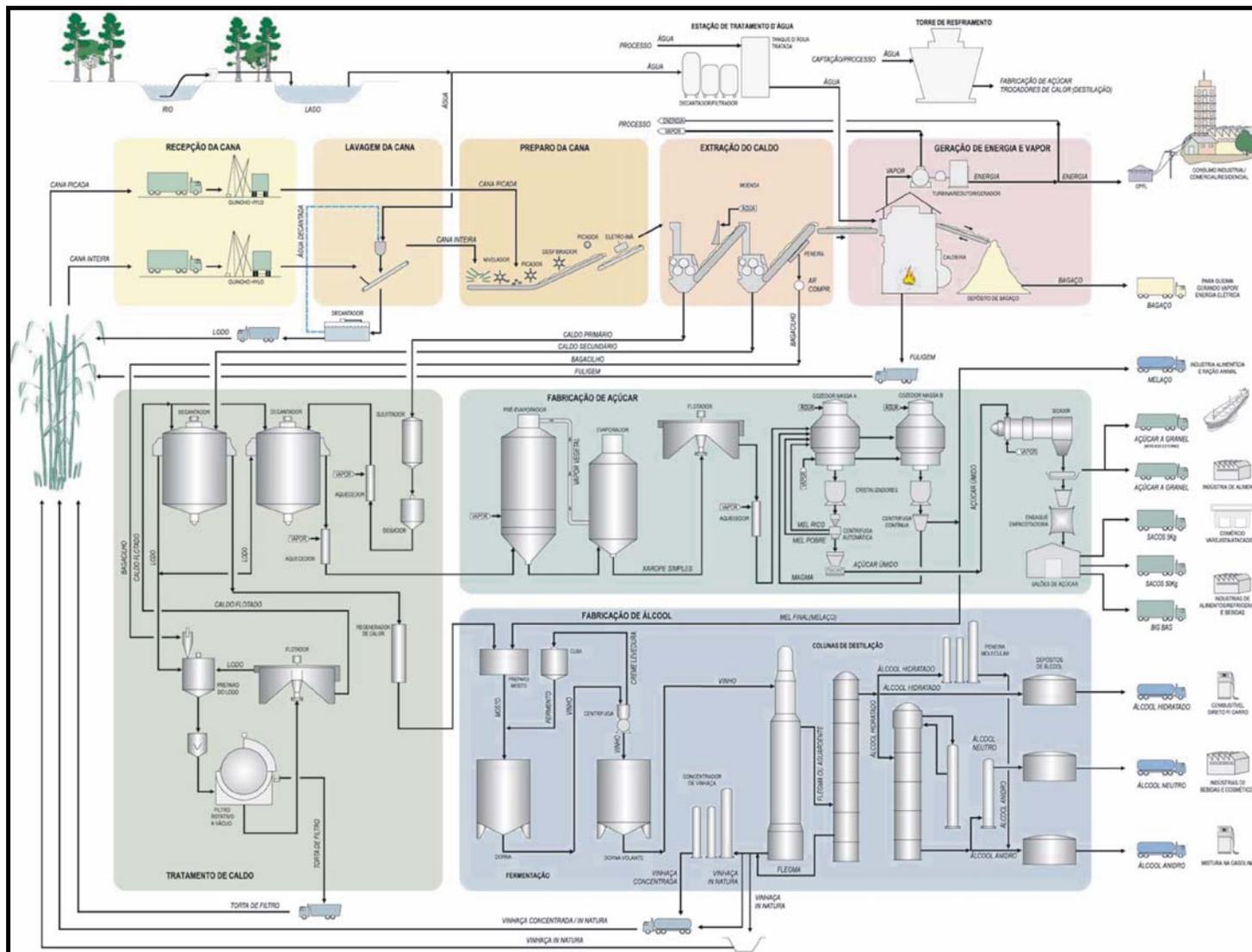


Figura 8. Fluxograma industrial de fabricação de açúcar, álcool, melado e subprodutos (Fonte: Santa Elisa, 2005)

Vale lembrar que os processos de produção das usinas brasileiras não apresentam variações significativas, fazendo com que sejam necessárias pequenas modificações para adaptar esta descrição à realidade de cada empresa. Na seção 2.5 deste capítulo, apresentamos as peculiaridades do processo produtivo de USC.

2.3 Planejamento da etapa industrial

O principal objetivo do PCP é propiciar informações adequadas para que os administradores possam gerenciar as atividades da operação produtiva e satisfazer de forma contínua à demanda dos consumidores (Contador & Contador, 1997). 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 (Slack *et al.*, 2002). É por meio do PCP que a organização garante que suas decisões táticas e operacionais sobre *o quê, quando, quanto, como e com o quê* produzir, e/ou comprar, sejam adequadas ao planejamento estratégico e, conseqüentemente, adequadas aos objetivos da empresa (Corrêa & Gianesi, 1997; Nahmias, 1995).

De uma forma mais específica, temos que, os problemas de planejamento da produção tratam do estabelecimento de metas de produção para um período futuro (horizonte de planejamento), de forma que se otimize a utilização de recursos disponíveis para atender aos compromissos firmados em carteira de pedidos e estar mais bem preparado para atender à demanda futura (Johnson & Montgomery, 1974; Nahmias, 1995). Os problemas aparecem devido ao fato de que as quantidades impostas pelo mercado raramente coincidem com as melhores taxas de utilização dos recursos disponíveis na firma. Outro ponto é que as condições que afetam o processo de produção não são estáveis no tempo (demanda, custo de componentes, capacidade disponível); assim, todas as etapas de produção devem ser planejadas de forma agregada para obter uma utilização eficiente dos recursos produtivos (Hax & Candea, 1984).

Como exposto na justificativa desta dissertação (seção 1.4), existem vários trabalhos que aplicam modelos e métodos quantitativos para apoiar o planejamento da etapa agrícola (p.ex., previsão de safra, planejamento da reforma do canalial), da etapa de CCT (p.ex., planejamento da colheita, programação do transporte

de cana) e também da logística de distribuição e armazenagem de açúcar e álcool. Já a etapa industrial não têm sido contemplada da mesma forma neste tipo de literatura.

Esta escassez de trabalhos que tratam do planejamento da etapa industrial pode ser uma herança deixada pelo período de intervenção estatal. Durante este período, todas as questões externas às usinas eram tratadas pelo Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), tais como comercialização, distribuição e remuneração dos produtos. Além disso, o IAA determinava uma cota de cana-de-açúcar para cada usina e indicava qual seria o *mix* de produção adotado pela usina (Sperandio, 1990).

Outro fator importante para esta escassez de modelos foi que por um bom tempo a indústria do açúcar mundial funcionou como um sistema de produção contínuo, sem nenhum *trade-off* de planejamento na área industrial. Entretanto, com o crescimento da importância do álcool no sistema agroindustrial canavieiro do Brasil e com a crescente modificação das estratégias competitivas do setor, com destaque para a diversificação produtiva (ver seção 2.1), estas decisões passam a ter uma importância cada vez maior.

Todos estes fatores desestimularam o desenvolvimento de modelos e ferramentas para o planejamento da etapa industrial, liberando toda a atenção dos gestores para decisões relacionadas com a etapa agrícola, a etapa de CCT e as decisões de investimento e expansão.

Nesta dissertação, propomos um modelo de otimização matemática para apoiar de forma agregada as decisões táticas do planejamento de safra, tendo como ponto de vista principal a etapa industrial do processo de produção de açúcar e álcool. Portanto, a participação da etapa agrícola e de CCT está restrita aos parâmetros e decisões que influenciam no planejamento da etapa industrial. A seguir apresentamos as características próprias do planejamento de safra no setor sucroalcooleiro.

2.3.1 Peculiaridades do planejamento de safra no setor sucroalcooleiro

A indústria sucroalcooleira possui algumas peculiaridades que influenciam bastante no planejamento de safra. Dentre estas características pode-se destacar a sazonalidade e 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.

Outro fator importante relacionado com a matéria-prima é sua rápida deterioração após a colheita, levando a um exigente planejamento logístico que está diretamente relacionado com a interação entre as etapas agrícola, CCT e industrial das empresas canavieiras.

A terceira característica é sua posição na cadeia produtiva. As usinas e destilarias utilizam-se de diversos 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 a capacidade adicional esteja livre para aproveitar 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.

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho procura fazer uma análise do planejamento agregado de safra, tendo um horizonte de médio prazo (período de safra). 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.

A agregação proposta neste trabalho está relacionada com a agregação temporal dos parâmetros de entrada do modelo e a agregação dos recursos produtivos, como discutido em Nahmias (1995). Não se mostrou necessário utilizar a agregação de produtos finais em famílias, devido à pequena quantidade de produtos finais que as usinas produzem. No capítulo 4 discutimos com mais detalhes estas simplificações do modelo.

Até este ponto do capítulo 2, apresentamos de forma generalista a situação da agroindústria canvieira no Brasil, descrevemos o processo de produção adotado por grande parte das unidades brasileiras e apontamos características gerais do planejamento agregado de safra. As próximas seções têm como objetivo apontar as características do planejamento agregado de safra das usinas e destilarias, procurando diferenciar as empresas de acordo com a estratégia de comercialização adotada e, posteriormente, apresentar as características do processo de produção e da estratégia de

comercialização da USC, visto que esta empresa foi escolhida para compor o estudo de caso desta dissertação.

2.4 Classificação das usinas em função de sua estratégia de comercialização

É interessante notar que as usinas e destilarias compartilham de uma quantidade enorme de características comuns, tanto no seu processo produtivo quanto nos produtos oferecidos. Porém, dependendo dos objetivos estratégicos da empresa, existe uma diferenciação substancial na relação da empresa com seu mercado consumidor e, conseqüentemente, com o estabelecimento da demanda.

Como citado no capítulo 1, as estratégias competitivas adotadas pelas empresas do setor sucroalcooleiro sofreram modificações consideráveis após o processo de desregulamentação (Belik & Vian, 2002; Vian, 2003). Dentre estas modificações, a adoção de estratégias de diversificação produtiva, de diferenciação dos produtos e de formação de grupos de comercialização (ou *pools*) acarretam modificações nas políticas de mercado das empresas. Sendo assim, consideramos importante classificar as empresas sob a ótica mercadológica adotada para viabilizar a comercialização de seus produtos (Azevedo, 2001; Sproesser, 2001; Burnquist *et al.*, 2002).

Nesta dissertação estabelecemos uma classificação de acordo com a variedade de produtos e as parcerias estabelecidas com fins de comercialização. Esta classificação é fruto de entrevistas não estruturadas executadas durante visitas a unidades produtoras e empresas de comercialização, além de utilizarmos como base a classificação apresentada por Waack *et al.* (1998). No trabalho de Waack *et al.* (1998), destacamos as categorias analisadas sob a ótica do “*marketing*” e das “parcerias e criação de consórcios”, como contribuições para a classificação adotada nesta dissertação. A seguir, apresentamos as características das quatro classes consideradas nesta dissertação.

- (a) *Usinas autônomas não diversificadas*: são usinas que produzem uma pequena variedade de produtos e comercializam de forma independente. Esta classe é composta por usinas e destilarias autônomas que utilizam contratos de médio e longo prazo com um número pequeno de compradores (p.ex., empacotadoras de açúcar, distribuidoras de combustível, empresas que usam melaço como matéria prima, *tradings*), ou produzem para estoque e comercializam no mercado *spot*

local. O planejamento agregado da produção neste tipo de empresa apresenta um papel importante para a garantia de cumprimento dos compromissos estabelecidos com o cliente. Porém, este planejamento é de fácil determinação e podemos aplicar apenas um conjunto de planilhas e direcionar o foco para o planejamento da colheita. Um exemplo de usina desta classe é a usina João de Deus;

- (b) *Usinas autônomas diversificadas*: são usinas que produzem uma grande variedade de produtos e comercializam de forma independente. Estas empresas possuem foco mais direcionado à jusante da cadeia e normalmente utilizam várias estratégias de comercialização (mercado varejista, mercado *spot*, mercado a termo, mercado futuro, contrato de longo prazo e exportação utilizando *tradings*). O planejamento agregado da produção neste tipo de empresa apresenta um papel fundamental para a melhoria dos resultados, principalmente na seleção dos processos produtivos e na determinação do ritmo de moagem. Neste tipo de empresa, o planejamento de safra deve ser avaliado constantemente para que se possa aproveitar melhor as oportunidades existentes no mercado. Um exemplo de usina desta classe é a usina Cerradinho.

Antes de apresentar as duas classes em que estão inseridas as usinas cooperadas, faz-se importante uma distinção sobre o estabelecimento da demanda neste tipo de empresa. Nas empresas cooperadas, os compromissos e prazos de entrega dos produtos são estabelecidos por meio de metas determinadas pela cooperativa. Já nas empresas autônomas, a demanda é estabelecida por meio da relação direta da empresa com o mercado. Ou seja, as empresas autônomas devem cumprir prazos de entrega estabelecidos na negociação com o cliente ou nos contratos, sob o risco de sofrerem penalidades ou até mesmo perderem a venda. Para as empresas cooperadas, a demanda é estabelecida por uma meta para todo o período de safra (caso da Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool do estado de Alagoas - CRPAAA), ou até mesmo, não existe nenhuma meta fixada (caso da Copersucar), sendo de responsabilidade das cooperativas a realização da venda e o cumprimento dos prazos de entrega. Esta diferença faz com que o planejamento agregado da produção das usinas cooperadas seja bem mais flexível quanto à exigência de atendimento da demanda.

Tendo estabelecido esta diferenciação, podemos apresentar as duas últimas classes:

- (c) *Usinas cooperadas não diversificadas*: são usinas que produzem uma pequena variedade de produtos e comercializam por meio de *pools* ou cooperativas. Estas empresas apresentam um processo de produção extremamente focado e inflexível, com comercialização de seus produtos totalmente viabilizada pela cooperativa. Neste tipo de unidade produtora, o planejamento agregado da produção tem menor importância, pois as decisões são conhecidas *a priori*. Neste tipo de empresa é mais interessante efetuar o planejamento de safra apenas baseando-se no planejamento de colheita. Um exemplo de usina desta classe é a destilaria autônoma Porto Alegre.
- (d) *Usinas cooperadas diversificadas*: são usinas que produzem uma grande variedade de produtos e que comercializam por meio de *pools* ou cooperativas. As usinas com este perfil normalmente são responsáveis pela produção do açúcar branco de varejo e/ou dos álcoois de melhor qualidade nos sistemas cooperados. O planejamento agregado da produção neste tipo de empresa apresenta um papel importante para a melhoria dos resultados na safra, principalmente na seleção dos processos produtivos e na determinação do ritmo de moagem. Neste tipo de empresa, o planejamento de safra deve ser reavaliado constantemente para que possa existir uma boa negociação das metas de produção adotadas pela cooperativa. Um exemplo de usina desta classe é a usina Santa Clotilde.

É importante destacar que, para esta classificação, usinas que fazem parte de grandes grupos produtores (p.ex., grupo Cosan/FBA, grupo Coruripe, grupo Nova América) e não fazem parte de cooperativas (p.ex., CRPAAA, Copersucar) ou de *pools* de comercialização (p.ex., Crystalsev) estão sendo consideradas como parte das empresas que comercializam de forma autônoma, ou independente.

Esta classificação mercadológica propicia uma melhor análise do sistema de PCP característico de cada usina. Seguindo a classificação dos sistemas produtivos de MacCarthy e Fernandes (2000), temos que as usinas das classes **a** e **c** enquadram-se nos sistemas de produção contínuos, e as usinas das classes **b** e **d** enquadram-se nos sistemas de produção semicontínuos. Esta diferenciação existe pelo fato das usinas das

classes **b** e **d** utilizarem estoques intermediários de produtos semi-acabados para poder postergar a decisão de *mix* de produção a ser adotado. Podemos citar os estoques de AEHC para posterior conversão em AEAC ou em AEN, estoques de açúcar bruto (p.ex., VHP ou demerara) para posterior conversão em açúcar especial extra, ou estoques de melaço para posterior conversão em álcool.

Dentre as outras variáveis apresentadas por MacCarthy e Fernandes (2000), temos que quanto maior for o tamanho da usina, quanto mais produtos forem produzidos e quanto mais níveis de processamento forem necessários para produzir cada produto, mais complexos serão as atividades do PCP das usinas.

Tendo determinado as estratégias de comercialização e o sistema de PCP característico de cada uma das classes, pretende-se mostrar que o modelo de planejamento agregado da produção desenvolvido nesta dissertação é capaz de auxiliar o tomador de decisão no estabelecimento e no controle do processo de produção de uma usina de açúcar e álcool que esteja nas classes **b** ou **d** desta seção, sendo especialmente importante para usinas na classe **b**. A modelagem da demanda, apresentada no modelo SPDL/PU (seção 4.2), está baseada na classificação apresentada nesta seção.

2.5 Estudo de caso

A USC está situada no município de Rio Largo-AL, onde atua na fabricação dos açúcares cristal *standard*, superior, especial, especial extra, demerara, VHP e VVHP, na fabricação dos álcoois AEAC e AEHC e na fabricação de melaço, além de subprodutos como torta de filtro, bagaço, vinhaça e óleo fúsel. Sua produção de açúcar é destinada tanto para o mercado interno de consumo direto quanto para a exportação (sendo posteriormente refinada).

Seu processo produtivo possui as mesmas etapas descritas na seção 2.2 deste texto (etapa agrícola, etapa CCT e etapa industrial) e algumas características específicas que detalhamos a seguir.

Na etapa agrícola é importante destacar que a USC está situada na sub-região N/N e, portanto, tem sua safra compreendida entre os meses de setembro e março ou, eventualmente, mês de abril, sendo composta normalmente por 22 a 28 semanas de safra. Na etapa de CCT a USC não utiliza o corte mecanizado de cana inteira e apenas esporadicamente o corte manual de cana crua.

Na etapa industrial a USC possui um conjunto de cinco ternos de moenda, trabalhando com embebição composta e sem separação do caldo misto e do caldo de primeira prensagem. Este conjunto tem capacidade de processar 330 toneladas de cana por hora, o que totalizou na última safra pouco mais de um milhão de toneladas de cana, tendo produzido 100 mil toneladas de açúcar e 19 mil metros cúbicos de álcool. A produção de vapor é inteiramente suprida por meio da queima do bagaço processado pela própria usina, gerando vapor para o funcionamento da unidade, para a irrigação do canavial, iluminação das fazendas e para o funcionamento de duas empresas coligadas (uma mineradora de granito e uma envasadora de água mineral). O total de energia gerada na safra 2004/2005 foi de 28.500 Mwh, sendo deste total 26.500 Mwh gerados pela termoeletrica da USC e 2.000 Mwh gerados por uma MCH (Micro Central Hidroelétrica) pertencente ao grupo da USC.

A USC utiliza o processo de sulfitação a quente e posterior caiação com temperatura final para decantação de 105 °C. A decantação é feita por três decantadores de bandeja com projeto tradicional. O sistema de evaporação é composto por duas linhas, sendo uma composta por quatro evaporadores Robert em série e outra composta por três evaporadores do mesmo tipo em série, procurando obter um xarope de 62 °brix. O cozimento é feito em um processo de três massas com exaustão do melaço até 40% de pureza. Após o cozimento, cristalização e centrifugação o açúcar passa por um secador e resfriador e posterior ensaque ou silagem do açúcar a granel.

O mel final que for desviado para a destilaria é misturado com o caldo misto desviado, tanto após a moenda quanto após a decantação, e com o caldo filtrado (proveniente da recuperação em prensas desaguadoras, durante a separação da torta). O mosto é constituído com 20 °brix e é enviado para um sistema de fermentação em bateladas, no qual o vinho formado possui teor alcoólico de 7%. A destilação deste vinho é feita em duas colunas de destilação capazes de produzir AEHC e AEAC.

Esta empresa faz parte da CRPAAA e, portanto, pode ser considerada uma empresa situada na classe **d** quanto à sua estratégia de comercialização. O planejamento agregado de safra da USC está baseado no atendimento das metas de produção apontadas pela CRPAAA e no melhor aproveitamento dos principais recursos produtivos.

Entende-se que, apesar do modelo desta dissertação estar especificamente embasado no caso USC, podemos considerar este mesmo modelo para a aplicação em outras usinas e destilarias, em especial para unidades situadas na classe **b**, em que a necessidade de um bom PCP é mais evidente que nas demais classes. Para este novo objeto de estudo é necessário uma adequação dos parâmetros de entrada, não sendo necessário modificar a estrutura do modelo proposto.

Mais detalhes sobre o objeto de estudo são apresentados no capítulo 4, durante a modelagem do problema. No próximo capítulo é feita uma breve revisão da literatura relacionada à modelagem matemática deste objeto.

3 REVISÃO DA LITERATURA RELACIONADA

3.1 Modelagem matemática de otimização

A modelagem matemática de otimização consiste na representação de um sistema real por meio 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 tomadas, então se associa a cada decisão uma variável denominada *variável de decisão*. Para expressar a medida de desempenho do modelo, deve-se associar uma função numérica das variáveis de decisão denominada *função objetivo*. As limitações de recursos envolvidos no sistema são traduzidas com o uso de equações ou inequações denominadas *restrições do modelo*, podendo ser tanto de natureza quantitativa quanto de natureza lógica (Taha, 1976; Williams, 1978; Ravindra *et al.*, 1987; Winston, 1991; Hillier & Lieberman, 1995; Goldberg & Luna, 2000).

Em virtude das várias peculiaridades inerentes aos diversos contextos em análise, 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 serem problemas de programação que apresentam qualquer tipo de não-linearidade, seja na função objetivo ou em qualquer de suas restrições; modelos de *programação linear inteira* (PI), que apresentam variáveis que não podem assumir valores contínuos, ficando condicionados a assumir valores discretos; modelos de *programação linear inteira mista* (PIM), quando são utilizadas variáveis inteiras e contínuas num mesmo modelo linear.

É interessante observar ainda que os modelos matemáticos podem ser caracterizados pelas seguintes dicotomias (Goldberg & Luna, 2000): 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.

3.2 Modelos determinísticos

Os modelos determinísticos aplicados ao PCP são as mais tradicionais ferramentas utilizadas da Pesquisa Operacional (PO). Dentre estes modelos destacam-se os que utilizam PL, devido à sua adequação a vários problemas práticos e à possibilidade de conversão de modelos não-lineares em lineares, e modelos que utilizam PIM, devido à facilidade de modelar problemas práticos (Johnson & Montgomery, 1974; Hax & Candea, 1984; Nahmias, 1995; Williams, 1978). A seguir, apresentamos alguns modelos encontrados na literatura para este tipo de aplicação e que são úteis na modelagem do problema de PCP de uma usina de açúcar e álcool, apresentado no capítulo 4.

3.2.1 Modelo de *mix* de produção

Um dos modelos mais básicos é o modelo de *mix* de produção, que consiste em determinar a quantidade produzida de um conjunto de produtos i em um determinado período de tempo (horizonte de planejamento), de forma que se maximize o lucro (como no exemplo a seguir) da empresa ou minimize o custo de produção. Este modelo visa atender a função objetivo levando em consideração a limitação de recursos, a carteira de pedidos e a previsão de vendas (Johnson & Montgomery, 1974).

$$\max Z = \sum_{i=1}^n (r_i - c_i) X_i \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} X_i \leq b_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$L_i \leq X_i \leq U_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$L_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

A simbologia adotada neste modelo [equações (1) a (4)] está descrita a seguir:

Z Função objetivo de contribuição ao lucro na produção total do período;

r_i Receita obtida na venda do produto i ;

c_i Custo variável de produzir o produto i ;

X_i Quantidade do produto i produzido no período de análise;

a_{ik} Quantidade do recurso k necessária para produzir uma unidade do produto i ;

- b_k Quantidade do recurso k disponível durante o período de análise;
 L_i Produção mínima requerida do produto i no período de análise;
 U_i Máximo de vendas (demanda) do produto i no período de análise.

Neste modelo assume-se que a equação (1) é a contribuição ao lucro pela produção e venda dos produtos i . Na restrição (2) considera-se o consumo de cada recurso k para a produção de X_i unidades do produto i , usando $a_{ik}X_i$ unidades deste recurso, até um valor máximo de b_k . Além disso, toda a produção abaixo do valor máximo de venda U_i e acima do valor mínimo de produção L_i [inequação (3)] será efetivamente vendida no período de análise, não podendo existir valores negativos para L_i [inequação (4)].

A formulação apresentada nesta seção é classificada como de PL; entretanto, em certas situações é necessário estender esta formulação para problemas de PIM, isto é, incorporar a restrição de integralidade para a variável X_i . Isto acontece quando não faz sentido considerar valores fracionários do produto em questão (p.ex., produção de $X_i = 2,5$ carros).

3.2.2 Modelo de seleção de processos

Outro tipo de modelo comumente encontrado é o modelo de seleção de processos, no qual as demandas de produtos são fixadas num determinado horizonte de planejamento e os produtos possuem vários processos possíveis de serem utilizados (várias alternativas de produção). Neste tipo de modelo, os custos e a quantidade de recursos necessários dependem do processo escolhido. Cada recurso de produção tem um limite de disponibilidade no período e vários produtos competem por esta capacidade. O problema é determinar quanto de cada produto deverá ser produzido em cada processo para que se minimize o custo de produção, levando em consideração a limitação de recursos e o atendimento da demanda. Como os processos são previamente definidos, a minimização dos custos de produção torna-se o objetivo mais adequado.

No exemplo a seguir, considera-se apenas um período de análise, n itens, J_i processos e custo de *setup* (preparação) fixo para cada processo (Johnson & Montgomery, 1974; Williams, 1978; Hax & Candea, 1984):

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} c_{ij} X_{ij} \quad (5)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{J_i} X_{ij} = D_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} a_{ijk} X_{ij} \leq b_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$X_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, J_i \quad (8)$$

A notação adotada neste modelo [equações (5) a (8)] está descrita a seguir:

- Z Função objetivo de custo de produção total no período;
- c_{ij} Custo variável de produzir o produto i pelo processo j ;
- X_{ij} Quantidade do produto i produzido pelo processo j no período de análise;
- D_i Demanda do produto i no período de análise;
- a_{ijk} Quantidade do recurso k necessária para produzir uma unidade do produto i pelo processo j ;
- b_k Quantidade do recurso k disponível durante o período de análise.

As considerações existentes neste tipo de modelo são as seguintes: a equação (5) minimiza a soma dos custos de produzir i pelos processos j durante o período de análise; a restrição (6) determina que a produção total de cada produto i deve ser igual a demanda deste produto; a restrição (7) considera o consumo de cada recurso k para a produção de X_{ij} unidades, usando $a_{ijk}X_{ij}$ unidades do recurso k , até um valor máximo de b_k ; e, a inequação (8) restringe a variável X_{ij} a um valor não-negativo.

Da mesma forma que no problema de *mix* de produção, esta formulação pode ser estendida para problemas de PIM apenas incorporando a restrição de integralidade para a variável X_{ij} .

3.2.3 Modelo de *mix* de produção com processos alternativos

A junção dos dois modelos anteriores constitui, talvez, um dos modelos de programação matemática mais aplicados na indústria em geral (Johnson & Montgomery, 1974). Neste tipo de modelo, a suposição de produção ser igual a demanda apresentada no modelo de seleção de processos [equação (6)] é substituída pela relação de oportunidade de venda e produção mínima do modelo de *mix* de

produção [equação (3) e (4)]. A função objetivo volta a ser maximizada como no modelo de *mix* de produção, o que resulta na seguinte formulação:

$$\max Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} (r_i - c_{ij}) X_{ij} \quad (9)$$

s.a.

$$L_i \leq \sum_{j=1}^{J_i} X_{ij} \leq U_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{J_i} a_{ijk} X_{ij} \leq b_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (11)$$

$$X_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, J_i \quad (12)$$

$$L_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (13)$$

A notação adotada neste modelo [equações (9) a (13)] apresenta apenas algumas modificações da notação apresentada no problema de seleção de processos, como é mostrado a seguir:

- Z Função objetivo de contribuição ao lucro na produção total do período;
- r_i Receita obtida na venda do produto i ;
- c_{ij} Custo variável de produzir o produto i pelo processo j ;
- X_{ij} Quantidade do produto i produzido pelo processo j no período de análise;
- L_i Produção mínima requerida do produto i no período de análise;
- U_i Máximo de vendas do produto i no período de análise;
- a_{ijk} Quantidade do recurso k necessária para produzir uma unidade do produto i pelo processo j ;
- b_k Quantidade do recurso k disponível durante o período de análise.

A contribuição ao lucro é determinada pela subtração da receita obtida na venda do produto i (r_i) e do custo variável de produzir o produto i pelo processo j (c_{ij}), como podemos perceber na função objetivo [equação (9)].

3.2.4 Modelo de produção simultânea de múltiplos produtos

Em um sistema de produção divergente, ou seja, em um sistema que apresenta a característica de produzir vários produtos com a entrada de apenas uma matéria-prima, pode ser interessante o estudo de um tipo especial de modelo de seleção de processos, chamado modelo de produção simultânea de múltiplos produtos. Este

modelo envolve a seleção de processos capazes de produzir mais de um produto simultaneamente.

Algumas indústrias possuem características de produção divergentes, tais como: a indústria de petróleo, onde o refino do óleo bruto resulta em diversos produtos derivados (p.ex., gasolina, diesel, nafta, querosene); a indústria de mineração, onde a moagem de rochas gera grãos com dimensões variadas; a indústria de papel e celulose, onde se utiliza um padrão de corte de bobinas *jumbo* para gerar um conjunto de bobinas menores; e, a indústria canavieira, onde a usina processa a cana-de-açúcar e obtém um conjunto de produtos e subprodutos resultantes.

A formulação que segue ilustra este tipo de modelo:

$$\max Z = \sum_{j=1}^{J_i} \left(\sum_{i=1}^n r_i a_{ij} - c_j \right) X_j \quad (14)$$

s.a.

$$L_i \leq \sum_{j=1}^{J_i} a_{ij} X_j \leq U_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} a'_{jk} X_j \leq b_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (16)$$

$$X_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, J_i \quad (17)$$

A notação adotada para este modelo [equações (14) a (17)] está descrita a seguir:

- Z Função objetivo de contribuição ao lucro na produção total do período;
- r_i Receita obtida na venda do produto i ;
- a_{ij} Quantidade do produto i produzido pelo processo j ;
- c_j Custo de utilizar o processo j ;
- X_j Valor de utilização do processo j ;
- L_i Produção mínima requerida do produto i no período de análise;
- U_i Máximo de vendas do produto i no período de análise;
- a'_{jk} Quantidade do recurso k utilizado pelo processo j ;
- b_k Quantidade do recurso k disponível durante o período de análise.

Neste modelo assume-se que a equação (14) maximiza a margem de contribuição da escolha dos processos j ; a restrição (15) determina que a produção total

de cada produto i (gerada pela escolha do processo j) deve estar entre os limites positivos L_i e U_i ; a restrição (16) limita o valor de X_j de acordo com a quantidade de recurso k disponível e levando em consideração a quantidade a'_{jk} utilizada em cada processo j ; e, a inequação (17) restringe a variável X_j a um valor não-negativo.

É interessante perceber que, diferentemente do modelo anterior (modelo de *mix* de produção com processos alternativos), a quantidade do produto i produzida pelo processo j (a_{ij}) agora é um parâmetro de entrada do modelo e não mais uma variável.

Para ilustrar melhor o modelo de produção simultânea de múltiplos produtos mostramos as considerações adotadas para modelar um problema de corte (Morabito & Arenales, 1992). Neste tipo de problema, os processos j podem ser os padrões de corte existentes, os produtos i podem ser as barras de aço de vários tamanhos e os recursos k podem ser as barras maiores que serão cortadas. Considera-se que X_j é a quantidade de vezes que o padrão de corte j foi utilizado, restringindo-se a valores inteiros e que respeitem a restrição (17), e que a'_{jk} é um valor binário que assume valor 1 quando o padrão de corte j utiliza uma unidade das barras maiores k e 0 caso contrário. Os demais parâmetros (r_i , a_{ij} , c_j , L_i , U_i , b_k) não necessitam de considerações para ajustar-se ao problema de corte.

Este exemplo mostra a flexibilidade deste modelo, deixando claro que é possível representar vários problemas práticos utilizando este tipo de formulação.

3.2.5 Modelo de planejamento da produção com múltiplos períodos

Neste tipo de modelo o objetivo é determinar o planejamento da produção não apenas em um único período, e sim, em vários períodos. Assim, é necessário distinguir entre produzir, processar e armazenar. Segundo Williams (1978), esta amarração pode ser feita por meio de uma relação de balanceamento de estoque, como segue:

$$I_{t-1} + X_t = D_t + I_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (18)$$

Esta relação pode ser descrita da seguinte forma: o estoque do período anterior, mais a produção neste período, são iguais ao consumo neste período, mais o estoque no final deste período, para qualquer período da análise.

Outra possibilidade é utilizar o artifício do atendimento da demanda de forma acumulativa, no qual a utilização de t' (índice equivalente ao índice t) elimina a necessidade da utilização da equação de balanceamento de estoque.

A formulação que segue ilustra este tipo aplicação num modelo de produção simultânea de múltiplos produtos, sem a utilização do balanceamento de estoque:

$$\max Z = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J_i} \left(\sum_{i=1}^n r_{it} a_{ij} - c_{jt} \right) X_{jt} \quad (19)$$

s.a.

$$\sum_{t'=1}^t L_{it'} \leq \sum_{t'=1}^t \sum_{j=1}^{J_i} a_{ij} X_{jt'} \leq \sum_{t'=1}^t U_{it'}, \quad i=1, \dots, n; \quad t=1, \dots, T \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J_i} a'_{jk} X_{jk} \leq b_k, \quad k=1, \dots, K \quad (21)$$

$$X_{jt} \geq 0, \quad j=1, \dots, J_i; \quad t=1, \dots, T \quad (22)$$

A notação adotada segue o mesmo padrão do modelo de produção simultânea de múltiplos produtos (seção 3.2.4) com pequenas modificações apresentadas a seguir:

- Z Função objetivo de contribuição ao lucro na produção total em todos os períodos;
- r_{it} Receita obtida na venda do produto i no período t ;
- a_{ij} Quantidade do produto i produzido pelo processo j ;
- c_{jt} Custo de utilizar o processo j no período t ;
- X_{jt} Valor de utilização do processo j em cada período t ;
- L_{it} Produção mínima requerida do produto i no período t ;
- U_{it} Máximo de vendas do produto i no período t ;
- a'_{jk} Quantidade do recurso k utilizado pelo processo j ;
- b_k Quantidade do recurso k disponível durante o período de análise.

Neste modelo assume-se que a equação (19) maximiza a margem de contribuição gerada pela venda dos produtos i , produzidos pelos processos j , em todos os períodos t analisados; a restrição (20) determina que a produção total de cada produto i (gerada pela escolha do processo j no período t) deve estar entre os limites positivos L_{it} e U_{it} desde o primeiro período até o último período; a restrição (21) limita o valor de X_{jt}

de acordo com a quantidade de recurso k disponível; e a inequação (22) restringe a variável X_{jt} a um valor não-negativo.

A adoção do artifício de atendimento da demanda de forma acumulada retira a necessidade do balanceamento de estoque, pois a demanda é sempre atendida pela produção do próprio período, independentemente do estoque existente, como podemos perceber no modelo anterior por meio da restrição (20). No próximo modelo mostramos uma formulação que utiliza o balanceamento de estoque apresentado na equação (18).

Da mesma forma que nos modelos anteriores, esta formulação pode ser facilmente estendida para problemas de PIM, bastando incorporar a restrição de integralidade desejada para a variável X_{jt} . Tendo como exemplo o problema de corte apresentado na seção 3.2.4, podemos utilizar as mesmas considerações propostas e a formulação exposta nesta seção para obter uma análise do problema de corte em múltiplo períodos.

3.2.6 Modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes

Antes de apresentar o modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes (SPDL), é importante deixar claro que este é um caso particular de um dos modelos de dimensionamento de lotes e programação da produção, o modelo de dimensionamento e sequenciamento de lotes discretos (ou *The Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem*). Portanto, entendemos que é importante mostrar um breve panorama da teoria de programação da produção existente.

Os problemas de dimensionamento de lotes e programação da produção, embora intrinsecamente relacionados, são definidos na literatura clássica como dois problemas diferentes e tiveram um desenvolvimento histórico independente (Johnson & Montgomery, 1974; Williams, 1978; Hax & Candea, 1984; Winston, 1991; Nahmias, 1995). No entanto, estes dois problemas estão interligados e o fato de serem analisados separadamente gera dificuldades para o atendimento adequado das metas de produção em aplicações reais. Para resolver este problema, os modelos e pesquisas mais atuais procuraram combinar o problema de dimensionamento de lotes com as decisões de programação da produção numa única análise (Drexl & Kimms, 1997; Araújo, 2003; Karimi *et al.*, 2003; Araújo *et al.*, 2004).

De uma forma geral, os modelos de programação da produção (*Lot-Sizing and Scheduling Problem*) podem ser divididos da seguinte forma:

- (a) Lote econômico de compra (*The Economic Lot Scheduling Problem – ELS*);
- (b) Dimensionamento de lotes capacitado (*The Capacitated Lot Sizing Problem – CLSP*);
- (c) Dimensionamento e sequenciamento de lotes com preparação contínua (*The Continuous Setup Lot-Sizing and Scheduling Problem – CSLP*);
- (d) Dimensionamento e sequenciamento de lotes discretos (*The Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem – DLSP*);
- (e) Dimensionamento e sequenciamento de lotes proporcional (*The Proportional Lot-Sizing and Scheduling Problem – PLSP*);
- (f) Dimensionamento e sequenciamento de lotes generalizado (*The General Lot-Sizing and Scheduling Problem – GLSP*).

Nesta revisão tratamos apenas do modelo DLSP devido à similaridade com a aplicação no estudo de caso (apresentada no próximo capítulo). Para uma revisão mais completa, veja Drexel e Kimms (1997), Staggemeier e Clark (2001), Araújo (2003) e Karimi *et al.* (2003), e para aplicações desta teoria em situações reais, veja Toso (2003), Toso e Morabito (2005), Luche (2003) e Luche e Morabito (2005).

O modelo DLSP consiste em um problema monoestágio, multiproduto (ou multiprocesso), dinâmico, capacitado e que combina decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes. A pressuposição principal deste tipo de modelo é que em um período de análise só poderá ser utilizado um lote, ou seja, temos um modelo de produção *tudo ou nada* (ou *small Bucket*). Logo, só ocorre custo de preparação (ou custo de *setup*) quando a produção de um novo lote for iniciada.

A formulação que segue ilustra o modelo DLSP que procura maximizar a contribuição ao lucro:

$$\max Z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (r_{it} - c_{it}) X_{it} - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (s_i z_{it} + h_i I_{it}) \quad (23)$$

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + X_{it} - D_{it}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$p_i X_{it} = C_t Y_{it}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_{it} \leq 1, \quad t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$z_{it} \geq Y_{it} - Y_{i,t-1}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (27)$$

$$Y_{it} \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$I_{it}, X_{it}, z_{it} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (29)$$

A notação adotada neste modelo [equações (23) a (29)] está descrita a seguir:

- Z Função objetivo de contribuição ao lucro gerada por todos os produtos durante os períodos analisados;
- r_{it} Receita obtida na venda do produto i no período t ;
- c_{it} Custo de produzir o produto i no período t ;
- X_{it} Quantidade produzida do produto i no período t ;
- s_i Custo de preparação para produzir o produto i ;
- z_{it} Variável binária que determina a ocorrência ($z_{it}=1$), ou não ($z_{it}=0$), dos custos de preparação para produzir o produto i no período t ;
- h_i Custo de estocar o produto i ;
- I_{it} Variável de estoque do produto i no fim do período t ;
- D_{it} Demanda do produto i no período t ;
- p_i Capacidade necessária para produzir uma unidade do produto i ;
- C_t Capacidade disponível no período t ;
- Y_{it} Variável binária que determina se houve preparação da máquina ($Y_{it}=1$), ou não ($Y_{it}=0$), para produzir o produto i no período t .

A função objetivo [equação (23)] é a margem de contribuição ao lucro gerada pela produção dos produtos i em todos os períodos t analisados. A restrição (24) faz o balanceamento de estoque de cada produto i em cada período t , a igualdade (25) indica a produção *tudo ou nada*, ou seja, produção do produto i com a capacidade total em todo período t . A inequação (26) restringe a produção a apenas um produto i por período t , a equação (27) identifica quando acontece a troca de lotes, e as restrições (28) e (29) definem os domínios da variável de seleção de processos (Y_{it}) e das demais variáveis de decisão (I_{it}, X_{it}, z_{it}).

É interessante notar que a combinação das restrições (27), (28) e (29), juntamente com a função objetivo, fazem com que a variável Y_{it} assumam valores binários

(1 quando houver uma troca de produtos e 0 quando não houver). Este modelo não considera o tempo necessário para fazer a preparação (*setup*) nem a possibilidade de utilização de pedidos pendentes (atraso na entrega dos produtos).

Na literatura clássica de dimensionamento de lotes e programação da produção, os lotes são constituídos por produtos (como mostrado no modelo DLSP). Para esta dissertação, consideramos o dimensionamento de lotes de processos de produção, que por sua vez podem produzir vários produtos ao mesmo tempo (como apresentado na seção 3.2.4). Esta modificação traz a possibilidade de utilizar a teoria de dimensionamento e programação da produção para empresas que possuam processos com produção simultânea de múltiplos produtos, como é o caso das usinas de açúcar e álcool. Para mais detalhes sobre este tipo de modelo, consultar Luche (2003) e Luche e Morabito (2005), em que se utiliza o dimensionamento de lotes de processos para modelar o problema da produção de grãos eletrofundidos.

Além da modificação de lotes de produtos para lotes de processos, no modelo que apresentamos a seguir considera-se que o custo de preparação de processos é nulo ($s_i = 0$). Seguindo estas considerações, apresentamos a extensão do modelo DLSP para tratar lotes de processos sem custo de preparação, denominado modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes (SPDL).

$$\max Z = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J_t} \sum_{i=1}^n (r_{it} a_{ij} - c_{jt}) X_{jt} - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n h_{it} I_{it} \quad (30)$$

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \left(\sum_{j=1}^{J_t} a_{ij} X_{jt} \right) - D_{it}, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^{J_t} X_{jt} \leq 1, \quad t = 1, \dots, T \quad (32)$$

$$X_{jt} \in \{0, 1\}, \quad I_{it} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad t = 1, \dots, T \quad (33)$$

A simbologia adotada neste modelo [equações (30) a (33)] está descrita a seguir:

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

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

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

- c_{jt} Custo de utilizar o processo j no período t ;
 X_{jt} Variável binária que determina a utilização ($X_{jt}=1$), ou não ($X_{jt}=0$), do processo j no período t ;
 h_{it} Custo de estocar o produto i no período t ;
 I_{it} Variável de estoque do produto i no período t ;
 D_{it} Demanda do produto i no período t .

Neste modelo, a equação (30) maximiza a margem de contribuição ao lucro em todos os períodos t analisados, de acordo com a produção de i gerada pela escolha dos processo j ; a restrição (31) faz o balanceamento de estoque, produção e demanda de cada produto i em cada período t ; a inequação (32) indica a utilização de apenas um processo por período t , visto que X_{jt} é um valor binário; e a equação (33) define o domínio das variáveis de seleção de processos (X_{jt}) e da variável de estoque (I_{it}).

Esta formulação [equações (30) a (33)] é equivalente ao “modelo 4” apresentado por Luche (2003) para tratar o problema da produção de grãos eletrofundidos. Nesta dissertação, este modelo será utilizado como base para o modelo de planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool (apresentado no capítulo 45), devido às semelhanças do sistema de produção de grãos eletrofundidos e de açúcar, álcool, melado e subprodutos (produção divergente) e à facilidade de definir processos de produção para estas duas indústrias.

Quanto à dificuldade computacional de resolução de um problema deste tipo (SPDL com formulação de PIM), Luche e Morabito (2005) mostram aplicações práticas para problemas de seleção de processo em indústria de grãos eletrofundidos, tendo alcançado resultados ótimos com tempos computacionais relativamente baixos para as instâncias analisadas. Entretanto, convém lembrar que problemas DLSP com formulação de PIM são problemas NP-difíceis (Brüggemann & Jahnke, 2000).

Os modelos apresentados nesta seção constituem apenas um pequeno resumo sobre a quantidade de modelos determinísticos relacionados com planejamento da produção. Outros modelos que podem ser úteis para tratar estas questões podem ser encontrados em Johnson e Montgomery (1974), Williams (1978) Hax e Candea (1984), Winston (1991), Askin e Standridge (1993), Nahmias (1995), Hillier e Lieberman (1995), Drexel e Kimms (1997), Staggemeier e Clark (2001) e Karimi *et al.* (2003).

Uma opção para estender os modelos apresentados seria a utilização do artifício da programação de metas (*goal programming*), como pode ser visto em Munhoz (2000) e Munhoz e Morabito (2001). Este artifício consiste em uma extensão de modelos (geralmente de PL) que permite a resolução simultânea de um sistema com múltiplos objetivos em detrimento de um único objetivo. Entretanto, esta extensão acarreta dificuldades de tratamento quando os modelos são de PIM (Ravindra *et al.*, 1987).

Outra opção seria a extensão do modelo determinístico para modelos estocásticos, que consideram as incertezas inerentes ao valor dos parâmetros de entrada, tais como os modelos em dois estágios, modelos baseados em restrição de chance e modelos estocásticos com distribuição de probabilidade (Joshi, 1995; Birge & Louveaux, 1997; Sen & Hingle, 1999; Diwekar, 2002; Sahinidis, 2004; Herroelen & Leus, 2005). Dentre os modelos estocásticos podemos destacar a otimização robusta como uma técnica promissora para os fins deste trabalho, devido à flexibilidade que esta técnica proporciona no tratamento do conservadorismo da análise, devido à possibilidade de tratar problemas de PIM sem agregar complexidade e devido à facilidade de aplicação em problemas com uma grande quantidade de variáveis reais (Bertsimas & Sim, 2003a; Bertsimas & Sim, 2003b; Bertsimas & Sim, 2004; Bertsimas *et al.*, 2004).

No próximo capítulo apresentamos o desenvolvimento do modelo deste trabalho e ilustramos como a linguagem de modelagem GAMS pode ser usada para gerar parâmetros e para solucionar este tipo de modelo de otimização.

4 MODELAGEM DO PROBLEMA

Como visto anteriormente, o objeto de estudo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de planejamento agregado da produção que seja capaz de apoiar parte das principais decisões envolvidas em uma usina de açúcar e álcool. Neste modelo, os *trade-offs* entre aproveitamento do potencial da matéria-prima e as exigências e oportunidades do mercado devem ser analisados em conjunto com as restrições de disponibilidade de matéria-prima, capacidade de moagem, capacidade de estoque, fluxo de caixa e intolerância ao atraso nos pedidos. Esta análise deve auxiliar a determinação da moagem em cada período, da seqüência de processos produtivos e da política de atendimento da demanda utilizada, de forma que se atinja uma máxima margem de contribuição e sejam respeitadas as restrições do problema.

Este problema de PCP pode ser caracterizado como monoestágio, multiprocesso (ou multiproduto), dinâmico e que combina decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes. Além disso, entende-se que o tempo *setup* é de segunda ordem em relação ao período de análise e, desta forma, pode ser desconsiderado (*vide* explicação a seguir). Assim, podemos adotar uma visão *tudo ou nada* de produção em períodos de análise semanais.

Setup são todas as atividades necessárias para efetuar uma troca entre processos de produção. Estas atividades podem ser um simples fechamento e/ou abertura de válvulas, podem ser a troca de um sistema de duas massas para um de três massas ou o início da operação de uma coluna de desidratação. De uma forma geral, estas atividades de preparação não apresentam custos nem tempos representativos dado o período de análise adotado. Por outro lado, sabe-se que as usinas de açúcar e álcool pretendem produzir durante 24 horas por dia e 7 dias por semana no período de safra; entretanto, podem ocorrer paradas para manutenção, paradas por chuva ou paradas por motivos imprevistos (p.ex., falta de cana devido à falhas na logística de transporte, problemas operacionais na indústria, entre outros). Sendo assim, o tempo de *setup* pode ser incluído no percentual de tempo aproveitado durante cada semana e desta forma ser retirado do modelo.

A consideração de produção *tudo ou nada* está baseada na 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, conseqüentemente, perda de rentabilidade da empresa. Portanto, utilizamos um, e somente um, processo produtivo em cada semana.

Quanto à formulação linear adotada no modelo, podemos dizer que estamos desconsiderando possíveis não-linearidades nos custos de produção (p.ex., quanto maior a qualidade da cana fornecida, menores são os custos dos produtos químicos), nos rendimentos dos processos (p.ex., quanto maior a qualidade da cana fornecida, maiores são os rendimentos dos processos) e na mistura de melaço e caldo para formar o mosto da fermentação do álcool (p.ex., a fermentação alcoólica possui um rendimento um pouco menor quando trabalhamos com mel esgotado no lugar do mel rico). Neste modelo, consideramos que os parâmetros de rendimento e os custos de produção podem ser admitidos como lineares para o nível de análise desejado.

É importante destacar, também, que os custos considerados no modelo proposto são custos variáveis e as receitas são valores líquidos (desconsiderando impostos e custos de comercialização); Isto se deve 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, podemos utilizar esta simplificação e retirar estes valores da análise.

Na seção 3.2.4, discutimos as características comuns entre o processo de produção da indústria canavieira, da indústria petroquímica, da indústria de mineração e da indústria de papel e celulose, mostrando que todas estas indústrias possuem processos produtivos divergentes e que podem ser representados por meio do modelo de produção simultânea de múltiplos produtos. Na seção 3.2.5, mostramos a extensão deste tipo de modelo para problemas com múltiplos períodos de análise e, na seção 3.2.6, mostramos o modelo DLSP, que pode ser aplicado em problemas monoestágio, multiproduto, dinâmicos, capacitados e que combinam decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

O modelo SPDL, apresentado na seção 3.2.6 como um caso particular do modelo DLSP sem custo de *setup*, foi utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento de um modelo de planejamento agregado da produção aplicado a usinas. Esta escolha se deve à possibilidade de desconsiderar o *setup*, a possibilidade de

representar matematicamente os rendimentos de cada processo produtivo, e por estarmos tratando de um problema monoestágio, multiprocesso e dinâmico.

Uma vez delineados os principais itens da análise, a formulação matemática do modelo pode ser desenvolvida e posteriormente validada por meio da variação dos parâmetros de entrada e/ou das variáveis de decisão para verificar se os resultados do modelo são consistentes. Também se utilizou a opinião dos tomadores de decisão da empresa para validar os planos gerados pelo modelo.

Nas próximas seções, apresentamos toda a estrutura do modelo matemático desenvolvido neste trabalho. A Figura 9 auxilia na compreensão deste modelo por meio do fluxograma que representa o processo industrial modelado nesta dissertação. Nesta figura podemos perceber as macro-operações envolvidas no processo de produção de uma usina (*pesagem, estocagem, lavagem, moagem, clarificação do caldo, evaporação, cozimento/turbinação*) e de uma destilaria (*fermentação/centrifugação, destilação*). Também podemos perceber 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*), bem como o local onde estas perdas são geradas. Entretanto, o mais importante na Figura 9 é perceber o local onde as mudanças de processo podem acontecer (*TS 1, TS 2, TM, SJM, I-SJM*), fazendo com que os diversos tipos de açúcares, méis e álcoois sejam produzidos por uma combinação de processos envolvendo estes e outros parâmetros que são apresentados a seguir.

4.1 Método para geração dos parâmetros do modelo

4.1.1 Cálculo da matriz de rendimentos

O cálculo da matriz de rendimentos de produtos da indústria sucroalcooleira não é um processo imediato. 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 (processos 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, conseqüentemente, no rendimento industrial obtido.

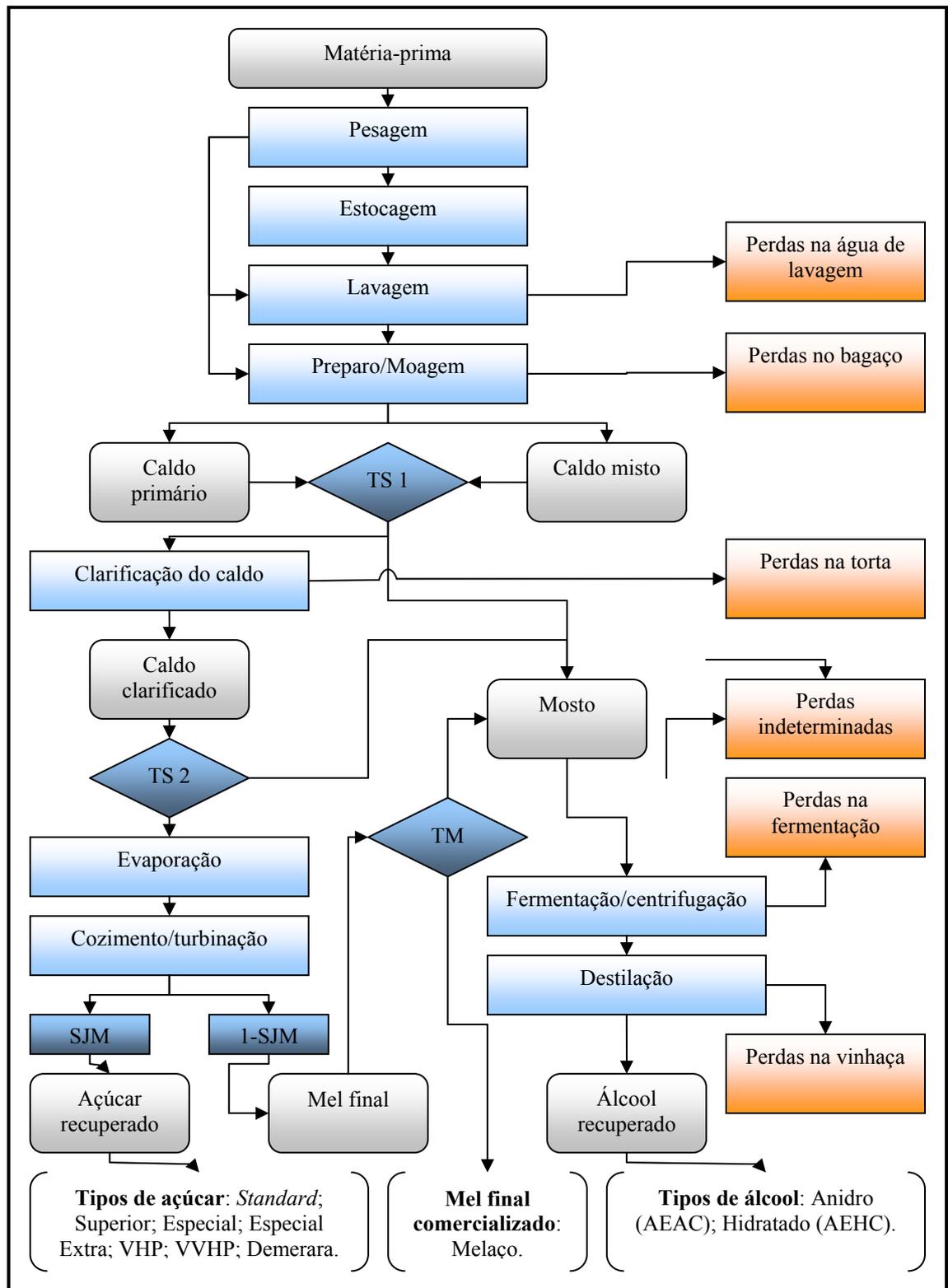


Figura 9. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço

O próprio setor sucroalcooleiro brasileiro leva em consideração estas peculiaridades no momento de determinar o valor a ser pago pela matéria-prima.

Atualmente, o sistema CONSECANA (Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool) calcula a remuneração do fornecedor, por meio do valor do ATR (Açúcares Totais Recuperáveis). Levando em consideração o *mix* de produção adotado pelas usinas, o valor médio obtido pela venda dos produtos finais, a qualidade da matéria-prima obtida e a eficiência industrial padrão das usinas da região (CONSECANA-SP, 2005). Este sistema é uma evolução do sistema PCTS (Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose), que foi implantado no final da década de 1970, na regulamentação do pagamento pela qualidade da cana-de-açúcar fornecida no Brasil.

Nesta dissertação, utilizamos a literatura de tecnologia açucareira e alcooleira (Hugot, 1977; Castro *et al.*, 2002; Fernandes, 2003; Medeiros, 2005) e as recomendações do sistema CONSECANA (CONSECANA-SP, 2005; CONSECANA-AL, 2005) como base para definir a formulação da matriz de rendimentos. Esta matriz de rendimentos (A_{pkt}) é o parâmetro que determina a quantidade de cada produto p (açúcares, álcoois e melão), obtida pela utilização de cada processo k , em cada período t .

Após a obtenção da matriz de rendimentos, podemos determinar a produção teórica dos vários produtos e estabelecer o cálculo de custos, receitas, eficiências, margem de contribuição e, finalmente, efetuar o planejamento de safra.

A seguir apresentamos os índices e os parâmetros necessários para o cálculo de A_{pkt} . Os valores entre parênteses representam o processo produtivo da USC na safra 2004/2005 e servem de base para a apresentação do método de geração de parâmetros.

Índices do cálculo da matriz de rendimentos

- k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool (processo 01,..., processo K). O valor de K pode variar bastante, de acordo com as características de cada unidade. Para o estudo de caso deste trabalho (safra 2004/2005 da USC), K é igual a 252;
- t Períodos de análise: determinados pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar (semana 01,..., semana T). Este valor depende de condições climáticas e do grau de maturação da cana-

de-açúcar. Na USC, o número total de semanas de safra varia em torno de 22 a 28 semanas. Para a safra 2004/2005, T é igual a 22;

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). Para o cálculo da matriz de rendimentos, estes produtos são subdivididos em produtos da fábrica de açúcar, produtos da destilaria de álcool e co-produtos da fábrica de açúcar, por meio dos subíndices ps , pa , px , mostrados a seguir:

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

pa Subconjunto de produtos da destilaria (AEHC, AEAC);

px Subconjunto de resíduos da usina (Melaço).

Parâmetros do cálculo da matriz de rendimentos

BMF Brix do mel final adotado pela fábrica (°brix);

$PzaM$ Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%). Em algumas usinas, especialmente na região C/S, o valor de $PzaM$ pode variar em função do processo k que está sendo utilizado, gerando um parâmetro $PzaM_k$. No caso da USC, este valor deve estar sempre próximo de seus limites inferiores e, portanto, podemos simplificar a análise e considerar este parâmetro como uma constante;

TM_k Desvio de melaço para a destilaria em cada processo k (valor unitarizado);

TS_k Determinação do desvio de caldo para a fábrica em cada processo k (valor unitarizado). A Figura 9 apresenta dois parâmetros TS ($TS 1$ e $TS 2$). Isto se deve ao fato de que, quando se produz açúcar de consumo direto, o processo de sulfitação durante a fase de clarificação do caldo impede que este caldo clarificado seja utilizado diretamente na destilaria. Portanto, este estudo considera que o fator TS terá variação independente deste problema; porém, quando for produzido açúcar de consumo direto, o desvio de caldo será feito em $TS 1$ e, quando for produzido açúcar bruto, o desvio de caldo será feito em $TS 2$.

Pol_k Polarização dos açúcares produzidos em cada processo k (°Z). Parâmetro referente à qualidade do açúcar que se pretende produzir;

$Umid_k$ Umidade dos açúcares produzidos em cada processo k (%). Parâmetro referente à qualidade do açúcar que se pretende produzir;

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

$MAP_{pa,k}$ Matriz de determinação dos álcoois pa produzidos em cada processo k (valor unitarizado);

$MSP_{ps,k}$ Matriz auxiliar de determinação dos açúcares ps produzidos em cada processo k (valor unitarizado).

Os parâmetros Pol_k , $Umid_k$ e $MSP_{ps,k}$ são utilizados sempre em conjunto para determinar as características do tipo de açúcar ps produzido em cada processo k . Os parâmetros R_{pa} e $MAP_{pa,k}$, também são utilizados em conjunto para representar as combinações possíveis da produção dos álcoois pa pelos processos k .

Todos os parâmetros apresentados dependem exclusivamente da forma como a fábrica está sendo operada e do tipo e qualidade do produto que se pretende produzir, ou seja, são estes parâmetros que definem a quantidade de processos que estão sendo modelados. Por exemplo, considerando que uma usina pode ser modelada com TM_k assumindo três valores (0,33; 0,66; e 1) e com TS_k podendo assumir quatro valores (0,7; 0,8; 0,9; e 1). Considere também que, Pol_k , $Umid_k$ e $MSP_{ps,k}$ determinam sete tipos de açúcares diferentes (*Standard* – 99,3 e 0; *Superior* – 99,5 e 0; *Especial* – 99,7 e 0; *Extra* – 99,8 e 0; *VHP* – 99,3 e 0,1; *VVHP* – 99,6 e 0,1; e *Demerara* – 98,8 e 0,2), e que R_{pa} e $MAP_{pa,k}$ determinam três combinações possíveis para o rendimento teórico da produção dos álcoois (*AEHC* – 67,87; *AEAC* – 65,03; e *AEHC* – 33,94 e *AEAC* – 32,52). Este conjunto de dados gera um número de processos igual a $3 \times 4 \times 7 \times 3$, ou seja, 252 processos necessários para representar esta usina. O exemplo citado representa a modelagem estabelecida para a USC no estudo de caso desta dissertação (seção 5.2).

O segundo grupo de parâmetros, que é apresentado em seguida, é composto por parâmetros que podem variar com o tempo de safra, tais como as eficiências de processo. Estes valores podem variar devido ao desgaste ou a uma variação na qualidade da matéria-prima, por exemplo, o aumento da quantidade de fibra dificultando a extração na moenda e a quantidade de caldo existente na matéria-prima.

$Elbti_t$ Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool (%).

Entende-se por parte comum de produção as operações de Pesagem, Estocagem, Lavagem, Moagem e Clarificação do caldo (ver Figura 9), gerando um índice de

eficiência que representa as perdas ocorridas na Lavagem, no Bagaço, na Torta e as Indeterminadas (daí a sigla *lbt*);

Efd_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 (daí a sigla *fd*);

pc_t Pol da cana em cada semana t (%). Este parâmetro se refere à qualidade da cana que está sendo fornecida;

$PzaC_t$ Pureza da cana em cada semana t (%). Este parâmetro se refere à qualidade da cana que está sendo fornecida;

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

Fernandes (2003) cita outras características da matéria-prima que podem influenciar os rendimentos agroindustriais, tais como: a quantidade de polissacarídeos no caldo (dextrana, amido, ácidos orgânicos, compostos fenólicos), a umidade da cana, as impurezas minerais e as impurezas vegetais existentes na matéria-prima. Para esta dissertação entende-se que os parâmetros apresentados são suficientes para efetuar a análise desejada.

Cálculo da matriz de rendimentos

Tendo definido os dados de entrada e os índices de variação destes dados, é possível calcular a matriz de rendimentos por meio da formulação que segue:

$$PzaJ_t = PzaC_t - 1, \quad t = 1, \dots, T \quad (34)$$

A equação (34) (Castro *et al.*, 2002; Fernandes, 2003) calcula a pureza do caldo misto ($PzaJ_t$) em cada semana t (%). Este dado é importante para caracterizar a qualidade do caldo que está sendo utilizado. Esta é uma fórmula empírica utilizada no setor para relacionar a pureza do caldo bruto da cana ($PzaC_t$) e $PzaJ_t$ (caldo extraído pela moenda e que está misturado com água). Esta redução de pureza se deve à adição de água no processo de moagem (processo chamado de *embebição*). Assim, o caldo bruto da cana tem uma pureza maior do que o caldo misto que é utilizado no processo de fabricação do açúcar e destilação de álcool.

Em algumas usinas, o caldo de primeira prensagem (caldo extraído do primeiro terno da moenda e que não recebe embebição) é separado do caldo dos demais ternos (denominado caldo embebido ou caldo misto). Caso esta separação seja feita, o

modelador deve utilizar o índice k (processos) para separar estes dois tipos de caldos. Os processos que utilizam o caldo de primeira prensagem devem ter uma pureza do caldo ($PzaJ_{kt}$) maior do que os processos que utilizam o caldo embebido. A usina utilizada para o estudo de caso desta dissertação opta por não diferenciar os caldos e, portanto, a equação (34) pode ser utilizada.

$$PzaS_k = \frac{Pol_k}{\left(1 - \frac{Umid_k}{100}\right)}, \quad k = 1, \dots, K \quad (35)$$

A equação (35) (Hugot, 1977; Medeiros, 2005) calcula a pureza dos açúcares produzidos ($PzaS_k$) em cada processo k (%). Esta equação é obtida por meio de uma equação que relaciona a definição de pureza ($Pol_k/brix_k$) e uma equação que determina o brix de cristais de açúcar ($brix_k = 1 - Umid_k$). A divisão por 100 é apenas a conversão de dados percentuais para valores unitários. A pureza do açúcar é função dos valores da pol do açúcar e da umidade do açúcar e, portanto, é um parâmetro determinante para a geração dos processos.

$$SJM_{kt} = \frac{PzaS_k (PzaJ_t - PzaM)}{PzaJ_t (PzaS_k - PzaM)}, \quad k = 1, \dots, K; \quad t = 1, \dots, T \quad (36)$$

A equação (36) (Hugot, 1977; Medeiros, 2005; Castro *et al.*, 2002; Fernandes, 2003) calcula a recuperação de açúcares (SJM_{kt}) 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 (ver Figura 9). Esta equação é deduzida por meio de um balanço de brix utilizando o processo de cozimento da fábrica de açúcar como fronteira de controle. Em última instância, só aparecem os fluxos de entrada do xarope e a saída de melaço e açúcar para serem considerados no balanço. Nesta análise consideramos que a pureza do xarope é igual à pureza do caldo misto ($PzaJ_t$), como visto na equação (36).

$$SMF = \frac{BMF \cdot PzaM}{100}, \quad k = 1, \dots, K \quad (37)$$

A equação (37) (Hugot, 1977; Medeiros, 2005; Castro *et al.*, 2002; Fernandes, 2003) determina a quantidade de sacarose (SMF) existente no melaço (%). Esta equação é apenas uma aplicação direta da definição de pureza de um fluido ($Pza = Pol/brix$), em que a pol do melaço foi definida como SMF , o brix do melaço foi definido

como BMF e a pureza do melão foi definida como $PzaM$. A divisão por 100 é apenas a conversão para valores percentuais.

$$RD_{pa,t} = \frac{R_{pa} \cdot Efd_t}{100}, \quad pa=AEHC, AEAC; \quad t = 1, \dots, T \quad (38)$$

A equação (38) (Fernandes, 2003; CONSECANA-AL, 2005; CONSECANA-SP, 2005) determina a recuperação teórica da destilaria ($RD_{pa,t}$) para os álcoois pa , em cada período t (%). Como mostrado anteriormente, Efd_t é o parâmetro que representa as perdas ocorridas na destilaria de álcool durante as etapas de produção e R_{pa} representa o rendimento estequiométrico teórico dos álcoois pa em cada processo k . Portanto, a recuperação teórica é o valor de rendimento obtido em condições ideais descontado das perdas ocorridas no processo de produção.

$$RS_{ps,k,t} = pc_t \cdot 10 \left(\frac{Elbti_t}{100} \right) SJM_{kt} \cdot TS_k \cdot MSP_{k,ps}, \quad \begin{cases} ps=standard, \dots, demerara; \\ k = 1, \dots, K; \quad t = 1, \dots, T \end{cases} \quad (39)$$

A equação (39) (adaptada de Fernandes, 2003) determina o rendimento industrial ($RS_{ps,k,t}$) obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t . Os parâmetros pc_t , $Elbti_t$, TS_k , $MSP_{k,ps}$ são dados de entrada do modelo e o parâmetro SJM_{kt} é a recuperação de açúcares, calculado pela equação (36). A partir dos valores obtidos nesta equação, temos a quantidade de açúcar ps (valores em kg) que será produzida por qualquer processo k em qualquer período t , propiciando a geração de parâmetros de produção dos açúcares.

$$RM_{px,k,t} = \frac{pc_t \cdot Elbti_t (1 - SJM_{kt}) \cdot TS_k \cdot 100 (1 - TM_k)}{10 \cdot SMF_k}, \quad \begin{cases} px = \text{Melão}; \\ k = 1, \dots, K; \quad t = 1, \dots, T \end{cases} \quad (40)$$

A equação (40) (adaptada de Fernandes, 2003) determina o rendimento industrial ($RM_{px,k,t}$) obtido na produção do melão px , pelo processo k , no período t . Os parâmetros pc_t , $Elbti_t$, TS_k , TM_k são dados de entrada do modelo. O parâmetro SJM_{kt} é a recuperação de açúcares, calculada pela equação (36) e o valor de SMF , sacarose no melão, é calculado pela equação (37). Esta equação é complementar à equação (39), para os casos em que $TM_k=0$. A partir dos valores obtidos, temos a quantidade de melão px (valores em kg) que será produzida por qualquer processo k em qualquer período t . Propiciando a geração de parâmetros de produção do melão.

$$RA_{pa,k,t} = \left(\left(\frac{Elbti_t}{10} \right) \left(\frac{RD_{pa,t}}{100} \right) \left(\frac{pc_t}{0,95} (1 - SJM_{kt}) + AR_t \right) TS_k \cdot TM_k + \right. \\ \left. \left(\frac{pc_t}{0,95} + AR_t \right) (1 - TS_k) \right) MAP_{k,pa}, \quad (41)$$

$pa=AEHC,AEAC; k=1,\dots,K; t=1,\dots,T$

A equação (41) (adaptada de Fernandes, 2003) determina o rendimento industrial ($RA_{pa,k,t}$) obtido na produção do álcool pa , pelo processo k , no período t . Os parâmetros pc_t , $Elbti_t$, AR_t , $MAP_{k,pa}$, TS_k , TM_k são dados de entrada do modelo, SJM_{kt} é calculado pela equação (36) e $RD_{pa,k,t}$ é calculado pela equação (38). A partir dos valores obtidos nesta equação, temos 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 (41) representa a conversão da sacarose em açúcares redutores (AR), por meio da hidrólise da molécula de sacarose em glicose e frutose.

$$A_{pkt} = \frac{RS_{ps,k,t} + RM_{px,k,t} + RA_{pa,k,t}}{1000}, \quad \begin{cases} p=standard,\dots,AEAC; \\ k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \end{cases} \quad (42)$$

A equação (42) determina o rendimento (A_{pkt}) de cada produto p , em cada processo k , no período t . Esta equação é obtida por meio da junção dos rendimentos obtidos nas equações (39), (40), (41) e convertidos para uma unidade apropriada (t ou m³), finalizando a geração da matriz de rendimentos.

Durante o estudo de caso desenvolvido nesta dissertação, este método foi utilizado para gerar processos de acordo com as características da USC. Esta geração mostrou-se adequada para os padrões da empresa em questão, como pode ser visto no capítulo de resultados.

A linguagem de modelagem GAMS (Brooke *et al.*, 1997), apresentada no Anexo A desta dissertação, foi escolhida para implementar o cálculo da matriz A_{pkt} . Para ilustrar este tipo de aplicação, o Anexo B apresenta um exemplo deste tipo de código no cálculo da matriz de rendimentos. Estes cálculos podem ser utilizados tanto para análises de planejamento de safra, quanto para projetos de novas unidades industriais, cálculo de pagamento de cana pela qualidade ou determinações de rendimentos e eficiências utilizadas no controle operacional das empresas.

Os cálculos apresentados nesta seção possibilitam uma geração livre de infinitos processos, bastando para isso utilizar todos os números reais entre zero e um ao alimentar os dados de desvio de melaço (TM_k) e desvio de caldo (TS_k). A simplificação adotada nesta modelagem foi a discretização destes parâmetros, fazendo com que o conjunto de processos se tornem finitos e representativos das limitações de capacidade de processamento da usina (como visto nos parâmetros do cálculo da matriz de rendimentos). Entretanto, esta simplificação pode levar a resultados subótimos quando aplicamos este modelo em processos reais.

Uma alternativa para aumentar o número de processos considerados, sem acarretar em um crescimento exagerado da quantidade de variáveis do modelo, é a utilização do método de geração de colunas para gerar os processos, similarmente ao que é feito nos problemas de corte e empacotamento (Morabito & Arenales, 1992). Desta forma podemos considerar, implicitamente, um número muito maior de processos e/ou produtos e com isso, melhorar os resultados obtidos na análise. A utilização desta técnica também abre portas para uma análise do planejamento de expansão da empresa, tendo em vista possíveis processos ainda não utilizados, ou melhorias nos processos existentes. Outras considerações sobre a utilização da geração de colunas em problemas deste tipo são apresentadas no último capítulo desta dissertação, no qual são discutidas as possibilidades de pesquisas futuras.

4.1.2 Cálculo da matriz de custos industriais

Além da matriz de rendimentos (A_{pkt}), utilizamos alguns cálculos preliminares para determinar os custos da etapa industrial e os custos da etapa agrícola. Nesta seção, apresentamos os cálculos preliminares adotados para determinar os custos industriais, utilizando os mesmos índices e subíndices do cálculo de A_{pkt} . As equações apresentadas nesta seção foram obtidas com a orientação dos gerentes da USC, durante a coleta de dados para o estudo de caso desta dissertação.

A intenção é adotar um custo unitário por kg de ART produzido e determinar o custo industrial a partir da multiplicação deste custo unitário de produção pela quantidade de ART produzido em cada processo. Para tanto, cada produto deve ser convertido para esta mesma unidade de medida (ART), proporcionando o cálculo do custo industrial de cada processo, como mostramos a seguir:

Parâmetros do cálculo da matriz de custos industriais

c_{proc} Custo de produção de cada kg de ART, nos produtos finais, pelos processos da USC (u.m./kg ART);

ARm Açúcares redutores contidos no mel final produzido pelos processos da USC (%);

$Fator_{pa}$ Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (adimensionais).

Cálculo da matriz de custos industriais

Tendo os parâmetros do cálculo da matriz de custos industriais, é possível calculá-la por meio da seguinte formulação:

$$ConvS_{ps,k,t} = RS_{ps,k,t} \cdot \left(\frac{pol_k}{100} \right) \left(1 - \left(\frac{Umid_k}{100} \right) \right) \cdot MSP_{k,ps}, \quad \begin{cases} ps=standard, \dots, demerara; \\ k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \end{cases} \quad (43)$$

A equação (43) determina o parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente ($ConvS_{ps,k,t}$), para cada processo k e durante cada período t . Este parâmetro representa a conversão de todos os açúcares produzidos em sacarose pura (kg de Sacarose). Os parâmetros pol_k , $Umid_k$ e $MSP_{k,ps}$ são dados de entrada do modelo para cada açúcar ps produzido pelo processo k . O parâmetro $RS_{ps,k,t}$ é o rendimento industrial dos açúcares, calculado pela equação (39).

$$ConvM_{px,k,t} = \left(\frac{RM_{px,k,t} \cdot \left(\frac{SMF}{100} \right)}{0,95} \right) + RM_{px,k,t} \cdot \frac{ARm}{100}, \quad \begin{cases} px=Melaço \\ k=1, \dots, K; t=1, \dots, T \end{cases} \quad (44)$$

A equação (44) determina o parâmetro de conversão do melaço px em ART equivalente ($ConvM_{px,k,t}$), para cada processo k e durante cada período t . Este parâmetro representa a conversão do melaço produzido em ART (kg ART). Nesta equação, 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 (ARm). O parâmetro ARm é o valor padrão que determina a quantidade de AR presente no melaço. O parâmetro $RM_{px,k,t}$ é o rendimento industrial do melaço, calculado pela equação (40) e o parâmetro SMF é o valor da quantidade de sacarose existente no melaço, calculada pela equação (37). O valor 0,95, que aparece no numerador do primeiro termo da soma, é o valor que converte a sacarose em AR.

$$ConvA_{pa,k,t} = RA_{pa,k,t} \cdot Fator_{pa} \cdot MAP_{k,pa}, \quad pa=AEHC,AEAC; \quad k=1,\dots,K; \quad t=1,\dots,T \quad (45)$$

A equação (45) determina o parâmetro de conversão de álcoois pa em etanol absoluto ($ConvA_{pa,k,t}$), para cada processo k e durante todos os períodos t . Este parâmetro representa a conversão de todos os álcoois produzidos em etanol absoluto (1 de Etanol). Os parâmetros $Fator_{pa}$ e $MAP_{k,pa}$ são dados de entrada do modelo para cada álcool pa produzido pelos processos k . O parâmetro $RA_{pa,k,t}$ é o rendimento industrial dos álcoois, calculado pela equação (41).

$$ARTproc_{kt} = \sum_p \left(\frac{ConvS_{pkt}}{0,95} + ConvM_{pkt} + \frac{ConvA_{pkt}}{0,6475} \right), \quad k=1,\dots,K; \quad t=1,\dots,T \quad (46)$$

Tendo os três valores de conversão calculamos ($ConvS_{pkt}$, $ConvM_{pkt}$ e $ConvA_{pkt}$), o valor total do ART produzido ($ARTproc_{kt}$) em cada processo k e durante todos os períodos t é calculado pela equação (46) (valores em kg ART). Novamente, 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.

$$CK_{kt} = ARTproc_{kt} \cdot Cproc, \quad k=1,\dots,K; \quad t=1,\dots,T \quad (47)$$

O valor total do ART produzido ($ARTproc_{kt}$) é o parâmetro necessário para calcular o custo industrial (CK_{kt}) de cada processo k , em cada período t . O valor de CK_{kt} (u.m./t de cana) é obtido pela multiplicação de $ARTproc_{kt}$ pelo custo de produção ($Cproc$) de cada kg de ART, que é um dado de entrada. A equação (47) mostra este cálculo final na geração dos parâmetros de custos industriais.

4.1.3 Cálculo da matriz de custos agrícolas

O último conjunto de parâmetros determinados por meio de cálculos preliminares são os custos da etapa agrícola. Para estes cálculos é necessário introduzir alguns índices e subíndices que ainda não foram utilizados. As equações apresentadas nesta seção foram obtidas com a orientação dos gerentes da USC, durante a coleta de dados para o estudo de caso desta dissertação.

m Matérias-primas: determinado de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana é proveniente (cana própria em reforma, cana própria para socaria, cana arrendada em reforma, cana arrendada para socaria, cana de acionistas, cana de fornecedor, cana de outras fontes). Para o cálculo da matriz

de custos agrícolas é necessário criar um subconjunto das matérias-primas próprias (subíndice mp), como segue:

mp Subconjunto de canas que são administradas pela própria usina (cana própria em reforma, cana própria para socaria, cana arrendada em reforma, cana arrendada para socaria).

Parâmetros do cálculo da matriz de custos agrícolas

$carr$ Custo de arrendamento (t de cana/ha). Média dos contratos de todas as fazendas arrendadas no período;

$ATRarr$ ATR padrão para a cana arrendada (Kg/t);

δ_m Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana de algum tipo de fornecedor (u.m./t cana);

ATR_t ATR contido na cana (Kg/t). Parâmetro referente à qualidade da cana que está sendo fornecida;

$pATR_t$ Preço do ATR no período de fornecimento (u.m./Kg);

cp_t Custo de reforma do canavial (u.m./ha);

cts_t Custo do tratamento da soqueira (u.m./ha);

$cir_{mp,t}$ Custo de irrigação de cada tipo de cana mp em cada período t (u.m./ha);

$proda_{mp,t}$ Produtividade agrícola de cada tipo de cana mp em cada período t (t/ha). Neste parâmetro só são levados em consideração os dados para as canas próprias e as canas arrendadas.

Cálculo da matriz de custos agrícolas

Tendo os parâmetros do cálculo da matriz de custos agrícolas, é possível calculá-la por meio das equações (48) a (54).

Primeiramente, é necessário determinar o valor que será pago pela cana (u.m./t). A equação (48) determina o valor da cana arrendada ($VTCarr_t$) para cada período t e a equação (49) determina o valor da cana (VTC_t) para cada período t , calculada pelo sistema CONSECANA.

$$VTCarr_t = ATRarr \cdot pATR_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (48)$$

$$VTC_t = ATR_t \cdot pATR_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (49)$$

A diferença entre as equações (48) e (49) é que o cálculo do $VTCarr_t$ considera que o valor do $ATRarr$ da cana arrendada é fixo durante toda a safra. Isto se

deve à forma como os acordos de arrendamento se dão, sendo que o valor de ATR_t representa a variação deste valor obtida em cada período t .

As demais equações [equação (50) até (54)] determinam o custo agrícola (C_{mt}) de obtenção de cada tipo de matéria-prima m em cada período t (com valores em u.m./t de cana), para as quais se adotou as seguintes nomenclaturas: $cpropR$ – cana própria em reforma; $cpropS$ – cana própria para socaria; $carrR$ – cana arrendada em reforma; $carrS$ – cana arrendada para socaria; $caci$ – cana de acionistas; $cfor$ – cana de fornecedor; e $cout$ – cana de outras fontes.

$$C_{cpropR}^t = \frac{cp_t}{proda_{cpropR}^t} + \frac{cir_{cpropR}^t}{proda_{cpropR}^t} + \delta_{cpropR}^t, \quad m=cpropR; \quad t=1, \dots, T \quad (50)$$

A equação (50) determina o custo agrícola da cana própria em reforma $cpropR$ em cada período t (C_{cpropR}^t). Este valor é obtido pelo custo de plantio (cp_t), mais o custo de irrigação (cir_{cpropR}^t), mais um eventual delta para regular o preço da cana (δ_{cpropR}^t), divididos pela produtividade agrícola da área colhida ($proda_{cpropR}^t$).

$$C_{cpropS}^t = \frac{cts_t}{proda_{cpropS}^t} + \frac{cir_{cpropS}^t}{proda_{cpropS}^t} + \delta_{cpropS}^t, \quad m=cpropS; \quad t=1, \dots, T \quad (51)$$

A equação (51) determina o custo agrícola da cana própria para socaria $cpropS$ em cada período t (C_{cpropS}^t). Este valor é obtido pelo custo de tratos culturais da soqueira (cts_t), mais o custo de irrigação (cir_{cpropS}^t), mais um eventual delta para regular o preço da cana (δ_{cpropS}^t), divididos pela produtividade agrícola da área colhida ($proda_{cpropS}^t$).

$$C_{carrR}^t = \frac{cp_t}{proda_{carrR}^t} + \frac{cir_{carrR}^t}{proda_{carrR}^t} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrR}^t} + \delta_{carrR}^t, \quad m=carrR; \quad t=1, \dots, T \quad (52)$$

A equação (52) determina o custo agrícola da cana arrendada em reforma $carrR$ em cada período t (C_{carrR}^t). Este valor é obtido pelo custo de plantio (cp_t), mais o custo de irrigação (cir_{carrR}^t), mais o custo do arrendamento ($carr$) multiplicado pelo preço da cana arrendada [equação (48)], mais um eventual delta para regular o preço da cana (δ_{carrR}^t), tudo isso dividido pela produtividade agrícola da área colhida ($proda_{carrR}^t$).

$$C_{carrS}^t = \frac{cts_t}{proda_{carrS}^t} + \frac{cir_{carrS}^t}{proda_{carrS}^t} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrS}^t} + \delta_{carrS}^t, \quad m=carrS; \quad t=1, \dots, T \quad (53)$$

A equação (53) determina o custo agrícola da cana arrendada para socaria $carrS$ em cada período t (C_{carrS}^t). Este valor é obtido pelo custo de tratos culturais da soqueira (cts_t), mais o custo de irrigação (cir_{carrS}^t), mais o custo do arrendamento ($carr$) multiplicado pelo preço da cana arrendada [equação (48)], mais um eventual delta para regular o preço da cana (δ_{carrS}), tudo isso dividido pela produtividade agrícola da área colhida ($proda_{carrS}^t$).

$$C_{caci}^t = C_{cform}^t = C_{cout}^t = VTC_t + \delta_m, \quad m=caci, cform, cout; \quad t = 1, \dots, T \quad (54)$$

A equação (54) determina o custo agrícola da cana dos acionistas ($caci$), da cana dos fornecedores ($cform$) e de outras fontes ($cout$) em cada período t . Este preço é obtido pelo custo de comprar cana de terceiros [equação (49)], acrescentado um valor δ_m que determina um acréscimo para o valor da cana.

Tendo determinado a matriz A_{pkt} (seção 4.1.1), a matriz CK_{kt} (seção 4.1.2) e a matriz C_{mt} (seção 4.1.3), podemos apresentar o modelo matemático que representa o planejamento agregado da produção de açúcar, álcool e melação proposto nesta dissertação.

4.2 Modelo matemático proposto

Como mostrado anteriormente, o modelo SPDL (seção 3.2.6) foi utilizado como ponto da partida para o desenvolvimento deste modelo de planejamento agregado da produção. Esta escolha se deve à possibilidade de não considerar o *setup*, a possibilidade de representar matematicamente os rendimentos de cada processo produtivo, e por estarmos tratando de um problema monoestágio, multiprocesso e dinâmico.

O modelo matemático que apresentamos nesta seção pretende determinar qual será a moagem semanal (M_t) e os processos de produção (X_{kt}) 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 foi denominado *modelo de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes aplicado ao Planejamento agregado da produção em Usinas de açúcar e álcool* (SPDL/PU).

A seguir apresentamos o modelo SPDL/PU, utilizando os mesmos índices apresentados no método de geração de parâmetros (seção 4.1). Os índices, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições são apresentadas a seguir (alguns deles são reapresentados para facilitar a leitura do modelo). Vale lembrar que consideramos apenas os custos variáveis e as receitas líquidas neste modelo (ver explicação na seção 4)

Índices

- k Processos dentro da fábrica (processo 01,..., processo K). Para o estudo de caso deste trabalho, safra 2004/2005 da USC, K é igual a 252. Índice apresentado na seção 4.1.1;
- t Períodos de análise (semana 01,..., semana T). Para o estudo de caso deste trabalho, safra 2004/2005 da USC, T é igual a 22. Índice apresentado na seção 4.1.1;
- p Produtos fabricados (*Standard*, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara, Melaço, AEHC, AEAC). Índice apresentado na seção 4.1.1;
- m Matérias-primas ($cpropR$, $cpropS$, $carrR$, $carrS$, $caci$, $cform$, $cout$). Índice apresentado na seção 4.1.3;
- f Serviços de transporte: determinado de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado (transporte próprio, transporte terceirizado). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, $Fprop$, $Fterc$;
- e Locais de estoque: determinado de acordo com o local onde o estoque está sendo feito (estoque próprio, estoque terceirizado). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, $Eprop$, $Eterc$.

Assim, como na explicação do método de geração de parâmetros, os limitantes apresentados entre parênteses representam o processo produtivo da USC, adotando os dados da safra 2004/2005.

Parâmetros do modelo

Em alguns parâmetros apresentamos duas unidades de medida (t ou m³). Isto se deve à modificação do produto final que está sendo analisado. Para o caso dos

açúcares e do melaço, utiliza-se a unidade de peso (t) e, para os álcoois, utiliza-se a unidade volumétrica (m³).

M^{min} Moagem mínima de cana (t/sem);

M^{max} Moagem máxima de cana (t/sem);

C_{giro} Capital de giro disponível para rodar a safra (u.m.);

CT Capacidade de transporte da frota própria (t/sem);

α_t Porcentagem de cana de fornecedores em cada período t (%);

β_t Disponibilidade da frota própria em cada período de análise t (%);

$C_{est_{pe}}$ Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques (t ou m³) no período t ;

φ_t Porcentagem de tempo efetivo de moagem durante um período de análise t (%);

L_{ft} Custo variável de corte, carregamento e transporte pelo tipo f , no período t (u.m./t);

h_{pe} Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e (u.m./t ou m³);

DS_{pt} Demanda do produto p , em cada período t (t ou m³/sem);

V_{pt} Valor líquido do produto p , em cada período t (u.m./t ou m³). Este é o valor de mercado de cada produto;

VC_{pt} Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto p , em cada período t (u.m./t ou m³). Este é o valor pago semanalmente pela cooperativa para viabilizar a safra das usinas cooperadas;

I_{pe0} Estoque inicial de cada produto p , no tipo de estoque e (t ou m³);

$Prev_{m0}$ Previsão de safra por tipo de fornecimento m (t).

As matrizes obtidas pelo método de geração de parâmetros (A_{pkt} , CK_{kt} , C_{mt}), apresentadas na seção 4.1, também são dados de entrada do modelo SPDL/PU, como segue:

A_{pkt} Matriz de rendimentos industriais de cada produto p , em cada processos k , nos períodos t . Calculada na seção 4.1.1, com dados em t ou m³;

CK_{kt} Matriz de custos industriais de cada processo k , nos períodos t . Calculada na seção 4.1.2, com dados em unidades monetárias por tonelada de cana processada (u.m./t de cana);

C_{mt} Matriz de custos agrícolas de cada fonte de matéria-prima m , nos períodos t . Calculada na seção 4.1.3, com dados em unidades monetárias por tonelada de cana obtida (u.m./t de cana).

Variáveis de decisão

Este modelo possui duas variáveis principais X_{kt} e M_t , apresentadas a seguir:

X_{kt} Variável de seleção de processos (adimensional) – Decisão de utilizar ($X_{kt} = 1$) ou não utilizar ($X_{kt} = 0$) o processo k , no período t ;

$$X_{kt} \in \{0,1\};$$

M_t Variável de decisão de quantidade de cana moída por semana (t/sem) – Quantidade de cana moída no período t ;

$$M_t \geq 0.$$

As outras variáveis são secundárias, dado que são calculadas com os resultados obtidos nas variáveis principais. A terceira, a quarta e a quinta são variáveis secundárias de moagem, a sexta é uma variável secundária de disponibilidade de cana e a última é uma variável secundária de estoque de produtos acabados:

M'_{mt} Variável de decisão de quantidade de cana colhida por semana (t/sem) – Quantidade obtida em cada fornecedor m , no período t ;

$$M'_{mt} \geq 0;$$

M''_{ft} Variável de decisão de quantidade de cana transportada por semana (t/sem) – Quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte f , no período t ;

$$M''_{ft} \geq 0;$$

M'''_{kt} Variável de decisão de quantidade de cana por processo por semana (t/sem) – Quantidade de cana moída pelo processo k , no período t ;

$$M'''_{kt} \geq 0;$$

$Disp_{mt}$ Variável de disponibilidade de matéria-prima (t ou m³/sem) – Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de matéria-prima m , no período t ;

$$Disp_{mt} \geq 0;$$

I_{pet} Variável de estoque (t ou m³/sem) – Quantidade estocada do produto p , pelo estoque tipo e , no período t ;

$$I_{pet} \geq 0.$$

Função objetivo

Tendo estabelecido os índices, os parâmetros e as variáveis de decisão, podemos apresentar as equações do modelo SPDL/PU.

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} \right) \right) \quad (55)$$

A função objetivo [equação (55)] estabelece a margem de contribuição agroindustrial de produção dos produtos p , por meio dos processos k , da matéria-prima m , do tipo de transporte da matéria-prima f e do tipo de estoque e , nos períodos t .

Esta equação calcula, em seu primeiro termo, a receita obtida pela venda de cada produto p , gerado pelo processo k , em cada período t . No segundo termo faz a somatória do custo de obtenção da matéria-prima m (C_{mt}), com o custo de transporte da matéria-prima f (L_{ft}), com o custo de utilização de cada processo k (CK_{kt}) e com o custo de estocagem de cada produto p produzido em cada tipo de estoque e (h_{pe}), tudo isso computado em todos os períodos t .

Comparando a função objetivo do modelo SPDL/PU [equação (55)] com a função objetivo do modelo SPDL [equação (30)], percebemos que, em ambos os casos, a margem de contribuição é obtida considerando tanto a receita de venda dos produtos quanto os custos de produção e estocagem dos mesmos durante um certo período de tempo.

Restrições

$$\sum_e I_{pet} = \sum_e I_{p,e,t-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DS_{pt}, \quad p=Standard, \dots, AEAC; \quad t = 1, \dots, T \quad (56)$$

A equação (56) representa a restrição de balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t . Assim como na função objetivo, o balanceamento de estoque também pode ser encontrado no modelo SPDL, por meio da equação (31). Na revisão da literatura relacionada, o balanceamento de estoque foi introduzido na seção 3.2.5 onde tratamos do planejamento da produção em múltiplos períodos.

No modelo SPDL/PU, o balanceamento do estoque é feito tanto em função do produto p , quanto do tipo de estoque e que está sendo utilizado. Desta forma, a decisão de estocar em lugares diferentes (p.ex., $Eprop$ ou $Eterc$) em cada período t está contemplada. A demanda de cada produto p é estabelecida pelo parâmetro DS_{pt} e a quantidade de p produzida em cada período t é determinada pela somatória dos processos k selecionados ($\sum_k A_{pkt} \cdot M_t$).

A determinação da demanda está baseada nas considerações expostas na classificação das usinas em função de sua estratégia de comercialização (seção 2.4). Neste modelo estamos considerando uma empresa que está situada na classe **d**.

$$\sum_k X_{kt} = 1, \quad t = 1, \dots, T \quad (57)$$

A equação (57) representa a restrição *tudo ou nada*, também encontrada nos modelos DLSP e SPDL [equações (25) e (26) do modelo DLSP e (32) do modelo SPDL]. A diferença neste caso, é que a equação (57) determina que a somatória de X_{kt} em k deve assumir o valor 1 em todos os períodos de análise t . Ou seja, a usina deve estar sempre produzindo durante os períodos analisados e deve utilizar apenas um processo durante cada período t , já que X_{kt} é uma variável binária.

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (58)$$

A equação (58) representa a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana colhida (M'_{mt}), a quantidade de cana transportada (M''_{ft}), a quantidade de cana nos processos (M'''_{kt}) e a quantidade de cana moída (M_t), em todos os períodos t da safra. Esta restrição estabelece que o modelo SPDL/PU é monoestágio. Ou seja, apesar do processo de produção de açúcar, álcool, melação e subprodutos (seção 2.2) ser definido em três etapas distintas (etapa agrícola, CCT e etapa industrial), estas etapas devem ocorrer simultaneamente e sem modificar o estoque intermediário existente entre as etapas.

$$Disp_{mt} = Disp_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt}, \quad m = cpropR, \dots, cout; \quad t = 1, \dots, T \quad (59)$$

A equação (59) determina a disponibilidade de cana tipo m no início de cada período de análise t . Esta equação também restringe a quantidade de cana do tipo m colhida em todos os períodos t (M'_{mt}) a um valor menor ou igual à disponibilidade de cana m , no início do período t ($Disp_{mt}$). Ou seja, a usina não pode colher mais cana do que está disponível em cada uma de suas várias fontes de suprimento m ($cpropR$, $cpropS$, $carrR$, $carrS$, $caci$, $cforn$, $cout$).

$$\sum_m Disp_{m1} = \sum_t M_t \quad (60)$$

A restrição (60) determina que a cana disponível no início do primeiro período de análise deve ser inteiramente processada durante a safra. Ou seja, a usina não pode deixar cana de uma safra para a outra. Outra observação desta restrição é que a

parcela à esquerda da equação é numericamente igual à previsão de safra de cana-de-açúcar.

Percebemos por meio destas restrições (59) e (60) que a variável de disponibilidade de matéria-prima ($Disp_{mt}$) possui comportamento complementar ao valor acumulado da quantidade de cana moída por semana ($\sum_t M_t$), sendo a soma destes dois valores igual a previsão de safra para cada fonte de fornecimento m em qualquer período t . Esta propriedade é utilizada, no capítulo 5, para representar graficamente os resultados do plano de produção e apresentar a moagem acumulada durante os períodos de safra (ver explicação da Figura 10).

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \leq M_t \leq M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100}, \quad t = 1, \dots, T \quad (61)$$

A equação (61) é a restrição de moagem em cada período de análise t . O valor de moagem máxima (M^{\max}) se deve à regulagem, estabelecida no início da safra, de abertura e velocidade de rotação dos rolos da moenda. O valor de moagem mínima (M^{\min}) se deve ao estabelecimento de um balanço térmico adequado para a usina, ou seja, a moenda deve fornecer uma quantidade mínima de combustível (bagaço) para que a usina não tenha problemas de pressão de vapor das caldeiras. O parâmetro φ_t é o percentual de tempo aproveitado durante o período de análise t . Este parâmetro pode determinar quando ocorre uma parada programada para manutenção ou quando um período é mais propício para ter um tempo aproveitado menor devido à ocorrência de chuvas.

$$\sum_p \sum_k VC_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t + Cgiro_t \geq \left(\begin{array}{l} \sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} \\ + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pet} \cdot I_{pet} \end{array} \right), \quad t = 1, \dots, T \quad (62)$$

A equação (62) é a restrição de fluxo de caixa em cada período t . Esta restrição determina que a receita líquida obtida pelo adiantamento repassado pela CRPAAA para a USC (VC_{pt}), devido à produção de p , em cada período t , somada com o capital de giro que a empresa está disposta a disponibilizar para cada período ($Cgiro_t$), deve ser maior ou igual aos custos de produção e estocagem em cada período t .

Esta equação existe pelo fato da CRPAAA utilizar o sistema de adiantamento parcial da receita, obtida na venda dos produtos, para viabilizar a safra das usinas associadas. Este repasse é a única fonte de renda da USC durante o período de

safra e, por isso, é importante definir uma restrição de fluxo de caixa por período t de análise. O repasse total da receita e do prêmio de qualidade dos produtos é feito no final do período de safra.

Em outras palavras, esta restrição analisa se a empresa tem recursos financeiros suficientes para honrar suas dívidas em cada semana que está sendo analisada. É importante deixar claro que as despesas e receitas de cada atividade estão sendo alocadas no mesmo período em que a atividade é executada. Esta é uma simplificação para não ser necessário modelar o caixa real da empresa.

Para uma análise mais criteriosa desta restrição pode ser interessante interagir este modelo com o ERP da empresa e fazer com que os dados financeiros sejam alimentados por meio do ERP utilizado.

$$M'_{\text{"cform"}_t} + M'_{\text{"caai"}_t} + M'_{\text{"cout"}_t} \leq \alpha_t \cdot M_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (63)$$

A equação (63) é a restrição de quantidade de cana não administrada (cana fornecida, cana de acionistas e cana de outras fontes) em cada período t . Esta restrição determina um limite máximo para a moagem de cana não administrada em cada período t . Este limite é definido por meio de um valor percentual (α_t) arbitrado pelos tomadores de decisão e por meio da quantidade de cana processada no período (M''_{kt}).

$$M''_{\text{"Fprop"}_t} \leq \frac{\beta_t}{100} \cdot CT, \quad t = 1, \dots, T \quad (64)$$

A equação (64) é a restrição de capacidade de transporte com frota própria em cada período t . Esta restrição indica quanto de cana a frota própria da usina é capaz de transportar em cada período t . Este valor é estabelecido por meio da multiplicação da capacidade total de transporte da frota própria (CT) pelo valor percentual de disponibilidade desta mesma frota (β_t) em cada período de análise t . O parâmetro β_t pode ser utilizado, por exemplo, para indicar uma diminuição da disponibilidade da frota própria devido a problemas mecânicos nos caminhões no decorrer da safra.

$$I_{pet} \leq Cest_{pe}, \quad p=\text{Standard}, \dots, \text{AEAC}; \quad e=\text{Eprop}, \text{Eterc}; \quad t = 1, \dots, T \quad (65)$$

A equação (65) é a restrição de capacidade de estoque para cada produto p , em cada tipo de estoque e , nos períodos de análise t . O valor de $Cest_{pe}$ é a capacidade de estoque de cada produto p em cada tipo de estoque e .

$$M_{kt}''' \leq M^{\max} \cdot X_{kt}, \quad k=1, \dots, K; \quad t=1, \dots, T \quad (66)$$

A equação (66) é uma restrição auxiliar para que não seja necessário utilizar a variável X_{kt} na função objetivo. Utilizando esta restrição, evitamos que o modelo se transforme em um problema não-linear (PNL).

A interpretação para esta restrição é a seguinte: X_{kt} é uma variável binária e M^{\max} é a capacidade máxima de moagem semanal da usina, ou seja, um número grande. Quando X_{kt} for zero, o valor de M_{kt}''' também será nulo, pois, M_{kt}''' é um número não negativo [equação (67)]. Caso contrário, M_{kt}''' poderá assumir qualquer valor entre zero e M^{\max} . Esta restrição é utilizada para ligar a moagem do processo k com a utilização deste mesmo processo k .

$$X_{kt} \in \{0, 1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; Disp_{mt} \geq 0; I_{pet} \geq 0; \quad (67)$$

As equações apresentadas em (67) são as restrições de domínio das variáveis de decisão deste modelo.

O modelo SPDL/PU considera a produção de $p=1, \dots, P$ produtos, por meio de $k=1, \dots, K$ processos, $m=1, \dots, M$ matérias-primas, $f=1, \dots, F$ tipos de transporte da matéria-prima, $e=1, \dots, E$ tipos de estoque, em todos os $t=1, \dots, T$ períodos. No total temos $T(P \cdot E + F + 2M + 2K) + 1$ variáveis, onde $K \cdot T$ são binárias, e $T(2M + P \cdot E + P + K + 8) + 2$ restrições. De acordo com os índices apresentados para o estudo de caso da USC ($M=7, K=252, F=2, E=2, P=10, T=22$), que representam a safra 2004/2005 desta empresa, temos um conjunto de 11.881 variáveis, sendo 5.544 binárias, e 6.690 restrições.

A implementação e solução computacional do modelo SPDL/PU [equação (55) até equação (67)] foi desenvolvida por meio da linguagem de modelagem GAMS utilizando o *solver* CPLEX (Brooke *et al.*, 1997).

Na seção 4.3, apresentamos a Linguagem de Modelagem (LM) GAMS. O Anexo A apresenta os elementos básicos utilizados para este tipo de modelagem, além de uma breve revisão sobre a teoria e os métodos envolvidos neste tipo de LM; o Anexo B apresenta o código implementado para solucionar o cenário VI do exemplo ilustrativo (seção 5.1); o Anexo C apresenta o código implementado para solucionar o modelo SPDL/PU, aplicado ao cenário VI do exemplo ilustrativo (seção 5.1); e o Anexo D apresenta de forma resumida o modelo algébrico SPDL/PU apresentado nesta seção.

4.3 Linguagem de modelagem GAMS

Nas décadas de 1950 e 1960 foi feito um progresso substancial no desenvolvimento de algoritmos e códigos computacionais para resolver grandes problemas de programação matemática. Entretanto, durante a década posterior não houve um grande número de aplicações das ferramentas que foram desenvolvidas. Muito disso se deve ao fato de que grande parte do tempo requerido para o desenvolvimento de um modelo era despendido na preparação dos dados e dos relatórios de saída, fazendo com que o esforço de modelagem continuasse grande, apesar dos avanços no desenvolvimento dos algoritmos (Brooke *et al.*, 1997).

O primeiro passo para a redução do esforço empreendido na resolução de problemas de programação matemática foi o surgimento dos *geradores de matrizes* para programação linear, que faziam a transformação dos modelos matemáticos para a forma algorítmica requerida pelo computador (Fernandes & Morabito, 1993). Entretanto, o grande salto no desenvolvimento do processo de modelagem só foi dado na década de 1980, com o advento das chamadas LMs. Segundo Fernandes e Morabito (1993), as LMs utilizam, em diferentes graus, os conceitos de modelagem estruturada, que têm por objetivo fornecer uma estrutura matemática formal e um ambiente computacional para conceber, representar e manipular uma grande variedade de modelos. As LMs podem ser definidas como geradores de sistemas de apoio à decisão.

Dentre as LMs que se destacaram na década de 1980 e início da década de 1990, podemos citar a CML (*Conversational Modeling Language*), a LPM (*system for constructing Linear Programming Models*), a LAMP (*LAnguage for Mathematical Programming*), LINGO (*LAnguage for INteractive General Optimization*) e o GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Tais linguagens vêm adquirindo cada vez mais importância para os modeladores, visto que os problemas analisados estão se tornando cada vez maiores e mais complexos e as LMs propiciam que os modeladores dediquem cada vez mais do seu tempo para solucionar problemas referentes ao modelo, e não à implementação computacional.

Como foi dito anteriormente, GAMS é uma LM e foi projetada para o desenvolvimento e solução de modelos de programação matemática complexos (Brooke *et al.*, 1997). As principais vantagens intrínsecas à utilização de GAMS são: (a) fornecer uma linguagem de alto nível para uma representação compacta de modelos extensos e

complexos; (b) permitir mudanças na especificação dos modelos de forma simples e segura; (c) permitir relações algébricas enunciadas de forma não ambígua; (d) permitir descrições de modelos independentes dos algoritmos de solução; (e) simplificar a preparação de dados de entrada e relatórios de saída; (f) transformar automaticamente os dados para a forma requerida pelos pacotes de programação matemática.

Além destas vantagens, GAMS é um compilador baseado na teoria de banco de dados (quando se faz manipulação dos dados) e na teoria de programação matemática (para descrição e solução dos problemas). GAMS também disponibiliza um conjunto de *solvers*, que são pacotes com opções de várias técnicas de solução de problemas de programação matemática (p.ex., PL, PNL, PIM), e que podem ser utilizados de acordo com a escolha do modelador.

Nesta dissertação foi utilizado o GAMS/CPLEX, para a solução do problema de PIM resultante no modelo SPDL/PU. A escolha do GAMS se deve ao fato do laboratório de modelagem do DEP/UFSCar possuir a licença de uso acadêmico desta LM e a escolha do *solver* CPLEX se deve ao fato deste ser o melhor pacote disponível em linguagem GAMS para solucionar problemas de PIM. A versão disponível e utilizada nesta dissertação foi a GAMS 19.6 e CPLEX 7.0.

5 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a aplicação do modelo descrito no capítulo 4, equações (34) a (67) (apresentado de forma resumida no Anexo D). Inicialmente, apresenta-se uma análise da consistência deste modelo por meio da solução de um exemplo ilustrativo. Logo em seguida apresentamos outra análise da consistência deste modelo por meio de algumas aplicações com dados reais. Por fim, apresentamos algumas considerações sobre a utilização prática deste modelo.

Para estas aplicações foi utilizado um computador pessoal com processador INTEL Pentium IV 3GHz, com 2GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP, versão 2002, com *service pack 2*. O *software* utilizado foi o GAMS 19.6 aplicando o *solver* CPLEX 7.0, conforme mencionado na seção 4.3.

5.1 Exemplo ilustrativo

Antes de apresentar os dados obtidos no estudo de caso, apresentamos os resultados do modelo SPDL/PU aplicado a um exemplo ilustrativo, que tem por objetivo validar o planejamento que foi realizado. O exemplo ilustrativo foi elaborado com um número de índices inferior ao número de índices do caso real, e sem utilizar o método de geração de parâmetros (os dados obtidos pelo método de geração de parâmetros, A_{pkt} , C_{mt} , CK_{kt} foram inseridos como dados de entrada). Estas simplificações foram feitas para que possamos conferir os resultados obtidos em todos os cálculos executados e verificar a consistência do modelo apresentado. A Tabela 4 apresenta a diferença de complexidade do exemplo ilustrativo e de um exemplo de tamanho típico no estudo de caso da USC.

Tabela 4. Comparação do tamanho do exemplo ilustrativo e do caso USC

Parâmetros	Exemplo ilustrativo	Caso USC (SPDL/PU)
Fontes de fornecimento de matéria-prima (m)	02	07
Formas de transporte da matéria-prima (f)	02	02
Formas de estocar os produtos finais (e)	02	02
Produtos fabricados (p)	03	10
Processos disponíveis em cada período (k)	05	252
Períodos analisados durante a safra (t)	05	22
Nº de variáveis	111	11881
Nº de variáveis binárias	25	5544
Nº de restrições	132	6690

As simplificações feitas, tanto nos índices quanto nos dados de entrada do exemplo ilustrativo, respeitam a proporcionalidade da aplicação real. A seguir são apresentadas estas considerações.

O exemplo ilustrativo considera a existência de 2 fontes de matéria-prima ($m \rightarrow$ cana própria e cana de fornecedor); 2 formas de transportar esta matéria-prima para a indústria ($f \rightarrow$ frota própria e frota terceirizada); 2 formas de estocar os produtos finais ($e \rightarrow$ estoque próprio e estoque terceirizado); 3 produtos finais ($p \rightarrow$ açúcar VHP, álcool hidratado e melado); 5 processos de produção ($k \rightarrow$ processo 1 a processo 5); com um horizonte de planejamento de 5 períodos semanais ($t \rightarrow$ semana 1 a semana 5).

Para evitar a ocorrência de dados fracionados dos limitantes de moagem [restrição (61)], o valor do tempo efetivo de moagem (φ_t) foi retirado deste exemplo. Para representar a variação de φ_t , utilizamos unicamente os valores de M^{min} e M^{max} , que neste exemplo ilustrativo são definidos como M_t^{min} e M_t^{max} (apresentados na Tabela 5). Outro parâmetro, retirado da análise para fins de simplificação, foi a disponibilidade da frota própria (β_t) [restrição (64)]. Para representar a variação β_t , utilizamos unicamente o valor da capacidade de transporte CT , que neste exemplo ilustrativo é definida como CT_t (Tabela 5).

Admite-se que os custos das atividades agrícolas são constantes nos períodos analisados: preparo do solo, cultivo, sulcação, adubação e plantio (1324,66 u.m./ha), tratos culturais de socaria (207,71 u.m./ha) e irrigação do canavial (7,18 u.m./ha). Porém, a produtividade agrícola da cana própria, os valores de ATR da cana de fornecedor e os preços do ATR variam durante estes mesmos períodos, o que gera uma variação nos custos agrícolas de obtenção da cana própria e da cana de fornecedor durante as semanas de análise (apresentados na Tabela 10).

Da mesma forma, o custo de transporte da matéria-prima (L_{ft}) por frete próprio (7,24 u.m./t) e frete terceirizado (10,00 u.m./t), e a receita (V_{pt}) sobre o açúcar VHP (250,00 u.m./t), o álcool AEHC (449,00 u.m./m³) e o melado (120,00 u.m./t) não variam durante os períodos analisados.

Admite-se também que a usina pode utilizar toda a cana de um período sendo proveniente dos fornecedores ($\alpha_t = 100\%$), que existe um estoque próprio inicial ($I_{p, "Eprop", 0}$) de açúcar VHP (500 t) e de AEHC (1000 m³), que o valor do adiantamento

da cooperativa por produto (VC_{pt}) é igual a V_{pt} e que o capital de giro (C_{giro}) é nulo, ou seja, a empresa não pode ter saldo negativo durante qualquer período.

A Tabela 5 apresenta os valores e unidades de medida dos dados que possuem variação semanal (variação em t). São eles: a capacidade de transporte de cana pela frota própria (CT_t); a moagem mínima para atender a balanço térmico da fábrica (M_t^{min}); e a moagem máxima suportada pela fábrica (M_t^{max}).

Tabela 5. Dados de entrada com variação semanal

Períodos	CT_t (t/sem)	M_t^{min} (t/sem)	M_t^{max} (t/sem)
Sem 1	47250	47400	58000
Sem 2	47250	42400	51800
Sem 3	51975	47400	58000
Sem 4	51975	42400	51800
Sem 5	51975	47400	58000

Na Tabela 6 estão apresentados os custos de estocagem de cada produto (h_{pet}). A Tabela 7 apresenta a demanda de cada produto p durante os períodos que estão sendo analisados (DS_{pt}) e a Tabela 8 apresenta a capacidade de estocagem de cada produto p em cada tipo de estoque e ($Cest_{pe}$).

Tabela 6. Dados de custo de estoque de produtos acabados em cada tipo de estoque

h_{pet}		sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Eprop	VHP (u.m./t)	5	5	5	5	5
	Melaço (u.m./t)	2	2	2	2	2
	AEHC (u.m./m ³)	8	8	8	8	8
Eterc	VHP (u.m./t)	7	7	7	7	7
	Melaço (u.m./t)	0	0	0	0	0
	AEHC (u.m./m ³)	10	10	10	10	10

Tabela 7. Dados da demanda de cada produto

DS_{pt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
VHP (t)			16000		10000
Melaço (t)		1000		1000	
AEHC (m ³)			500		300

Tabela 8. Dados de capacidade de estocagem dos produtos em cada tipo de estoque

$Cest_{pe}$	Estoque Próprio	Estoque Terceirizado
VHP (t)	15000	10000
Melaço (t)	3000	0
AEHC (m ³)	14000	3000

Na Tabela 9 são apresentados os dados de custo de cada processo k em cada período t (CK_{kt}). Neste exemplo ilustrativo foi considerada uma variação deste parâmetro; porém, isto nem sempre é válido. No exemplo real analisado, caso USC,

estes dados foram considerados constantes no tempo, tendo variação apenas nos processos k .

A Tabela 10 apresenta os dados de custo de obtenção da matéria-prima por fonte de suprimento m em cada semana t (C_{mt}). A Tabela 11 apresenta a matriz de rendimentos de cada produto p , em cada processo k e em cada período t (A_{pkt}). Como mostrado na seção 4.1, o método para geração de parâmetros calcula A_{pkt} , C_{mt} e CK_{kt} a partir de cálculos preliminares utilizando dados de entrada tecnológicos e econômicos. Entretanto, este artifício não foi utilizado neste exemplo ilustrativo, já que o objetivo aqui é validar os cálculos executados pela implementação computacional e ganhar sensibilidade sobre a modelagem. A Tabela 12 apresenta os dados de previsão de safra ($Prev_{m0}$) para cada fonte m de fornecimento de matéria-prima.

Tabela 9. Dados de custo de cada processo em cada período

CK_{kt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Processo 1 (u.m./t)	8,35	8,4	8,3	8,4	8,4
Processo 2 (u.m./t)	8,35	8,4	8,3	8,4	8,4
Processo 3 (u.m./t)	8,35	8,4	8,3	8,4	8,4
Processo 4 (u.m./t)	8,35	8,4	8,3	8,4	8,4
Processo 5 (u.m./t)	8,35	8,4	8,3	8,4	8,4

Tabela 10. Dados de custo de matéria-prima por fonte de suprimento em cada período

C_{mt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cana própria (u.m./t)	7,3	6,74	6,26	6,26	6,26
Cana fornecida (u.m./t)	35,1	34,58	34	32,64	31,44

Tabela 11. Dados da matriz de rendimentos industriais por período, produto e processo

A_{pkt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	
proc1	VHP (t)	0,1125	0,113	0,1135	0,1135	0,113
	Melaço (t)	0,04	0,04	0,045	0,045	0,04
	AEHC (m ³)					
proc2	VHP (t)	0,1125	0,113	0,1135	0,1135	0,113
	Melaço (t)					
	AEHC (m ³)	0,0128	0,013	0,0133	0,0133	0,0128
proc3	VHP (t)	0,0709	0,0739	0,0768	0,0768	0,0739
	Melaço (t)	0,035	0,0362	0,0375	0,0375	0,0362
	AEHC (m ³)	0,0291	0,0302	0,0313	0,0313	0,0302
proc4	VHP (t)	0,0565	0,057	0,0575	0,0575	0,057
	Melaço (t)	0,02	0,02	0,025	0,025	0,02
	AEHC (m ³)	0,04	0,042	0,043	0,043	0,042
proc5	VHP (t)	0,0565	0,057	0,0575	0,0575	0,057
	Melaço (t)					
	AEHC (m ³)	0,0464	0,0474	0,048	0,048	0,0474

Tabela 12. Dados de previsão de safra para cada tipo de fornecimento de matéria-prima

Prev _{m0}	Cana Própria	Cana de Fornecedor
Previsão de safra (t)	150000	100000

A seguir, apresentamos uma síntese dos resultados encontrados pelo modelo SPDL/PU para o exemplo ilustrativo. Este modelo foi executado inicialmente com os dados apresentados nesta seção (Cenário base) e posteriormente com seis modificações impostas em parâmetros específicos (Cenário I a VI), tendo como objetivo avaliar se os resultados obtidos estão de acordo com as expectativas do modelador no momento da imposição de cada cenário. Desta forma, apresentamos inicialmente o cenário base e, logo em seguida, os seis cenários com modificações.

Cenário base

O cenário base utiliza os dados apresentados anteriormente como parâmetros de entrada para o exemplo ilustrativo (implementação em GAMS apresentada no Anexo C). A seguir apresentamos os resultados obtidos.

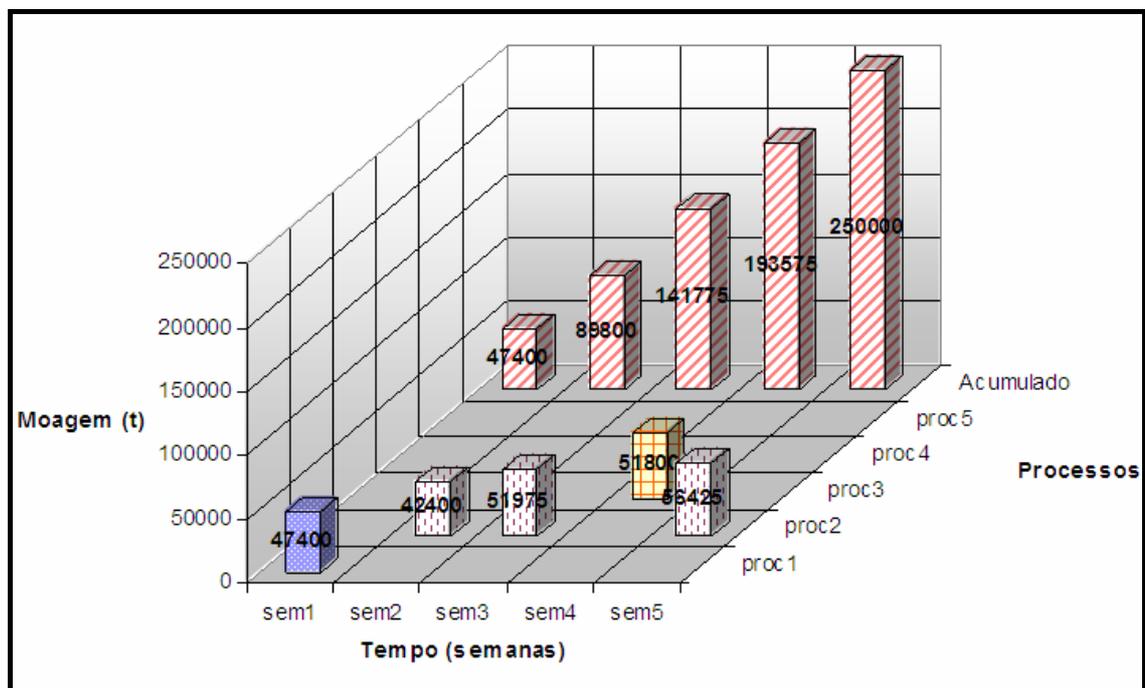


Figura 10. Plano de produção obtido para o cenário base

A Figura 10 apresenta o plano de produção encontrado na análise do cenário base (*tempo x processos* – variável de decisão X_{kt}), bem como o valor acumulado da quantidade de cana processada durante os períodos de safra (*tempo x*

acumulado) e os valores de quantidade de cana processada em cada processo e em cada período (*tempo x moagem* – variável de decisão M''_{kt}).

Por meio da análise da Figura 10 e dos dados de entrada do cenário base, podemos perceber que toda a cana que estava disponível no início da primeira semana foi processada durante as cinco semanas seguintes (250 mil t). Percebemos também que a moagem na semana 4 atingiu o limitante superior de capacidade de moagem (51800 t), e as semanas 1 e 2 atingiram o limitante inferior de moagem (47400 t e 42400 t, respectivamente). Também se percebe que a semana com maior quantidade de cana processada foi a semana 5 (56425 t), que o processo mais utilizado foi o processo 2, e que a usina não ficou parada durante os períodos analisados.

As considerações feitas a partir da Figura 10 apontam as decisões referentes à etapa industrial. Para analisar mais detalhadamente os dados de estoque de produtos finais, fontes de fornecimento de matéria-prima (etapa agrícola) e do transporte de cana utilizado (etapa de CCT), apresentamos mais alguns dados de saída obtidos ao solucionar o cenário base.

A Tabela 13 apresenta, novamente, a demanda de cada produto e o impacto do plano de produção no estoque de produtos acabados no final de cada período (I_{pet}). A Tabela 14 apresenta a decisão de quantidade de cana processada por fonte de fornecimento (M'_{mt}), e a Tabela 15 apresenta a divisão estabelecida entre os tipos de transporte de cana para a indústria (M''_{ft}).

Tabela 13. Estoque e demanda relativa ao cenário base

I_{pet}		sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Eprop	VHP (t)	5832,5	10623,7	522,86	4501,1	877,13
	Melaço (t)	1896	896	896	1838,5	1838,5
	AEHC (m ³)	1000	1551	1742,47	3363,81	3786,05
DS_{pt}		sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
VHP (t)				16000		10000
Melaço (t)			1000		1000	
AEHC (m ³)				500		300

Tabela 14. Decisão sobre o fornecimento de matéria-prima no cenário base

M'_{mt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cana própria (t)	31783,37	35083,96	29316,83	22486,77	31329,06
Cana fornecida (t)	15616,63	7316,04	22658,17	29313,23	25095,94

Tabela 15. Decisão sobre o tipo de transporte utilizado no cenário base

M''_{ft}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Frete próprio (t)	47250	42400	51975	51800	51975
Frete terceiros (t)	150				4450

Por meio destas tabelas temos a complementação dos dados obtidos pelo cenário base do exemplo ilustrativo. Assim, podemos dizer que, em nenhum momento os estoques terceiros foram utilizados (Tabela 13), e que ocorre um estoque de VHP (877,13 t), Melaço (1838,5 t) e AEHC (3786,05 m³) no final do último período (Tabela 13). Observamos também que o único período em que a cana fornecida ultrapassa a cana própria é na semana 4 com 22486,77 t de cana fornecida e 29313,23 t de cana própria (Tabela 14). Percebemos que o frete terceirizado foi utilizado apenas em pequenas quantidades na semana 1 e na semana 5 (Tabela 15).

O valor encontrado para a margem de contribuição agroindustrial (função objetivo) neste cenário base foi de 2,25 milhões de u.m.

Para testarmos a consistência do modelo, vamos modificar alguns parâmetros do exemplo ilustrativo, para gerar perturbações no cenário base e analisar os resultados obtidos. É importante lembrar que cada modificação foi feita sempre tendo como base o cenário inicial, ou seja, apenas um parâmetro é perturbado por vez e os outros parâmetros continuam com os mesmos valores do cenário base (Tabela 16). As modificações impostas seguem o seguinte roteiro:

- I. Eliminação de toda a capacidade de transporte da frota própria. Neste cenário, a frota própria é simplesmente desconsiderada, ou seja, só é utilizado o transporte de cana por meio de fretistas. Espera-se que não exista solução para este cenário, pois a restrição de fluxo de caixa [equação (62)] não é atendida;
- II. Redução do percentual máximo (α_t) de cana do fornecedor que pode ser aceito durante cada período. Espera-se que o modelo reduza a quantidade de cana de fornecedor na semana 4 e realoque esta cana em outro período, tendo uma perda de margem de contribuição devido a esta modificação;
- III. Utilização de limitantes inferiores (M_t^{min}) e superiores (M_t^{max}) de moagem constantes, e com valores médios se compararmos com os limitantes adotados no cenário base. Espera-se que o modelo redistribua a cana processada durante os períodos, modificando principalmente os valores de moagem na semana 2

(devido a uma valor maior de M_t^{min}) e semana 5 (devido a um valor menor de M_t^{max});

- IV. Como os produtos finais não foram armazenados em estoque terceirizados, reduzimos a capacidade própria de estocagem do açúcar VHP e do melaço. Espera-se que o modelo utilize o estoque terceirizado para estes produtos, tendo uma perda de margem de contribuição devido a esta modificação;
- V. Modificação nos valores dos produtos finais. O açúcar VHP e o álcool AEHC tiveram seus valores incrementados e o melaço teve seu valor decrescido, porém estes valores ainda continuam constantes durante os períodos de análise. Espera-se que o valor da margem de contribuição suba por meio de uma modificação na utilização dos processos de produção;
- VI. Modificação nos valores e no período da demanda de cada produto. Aqui a demanda está concentrada na última semana. Espera-se que o modelo modifique a utilização dos estoques e a utilização dos processos de produção em cada período analisado.

A Tabela 16 apresenta os parâmetros alterados, segundo modificações apresentadas (itens I até VI). Os dados que foram alterados estão sublinhados.

Tabela 16. Modificações nos parâmetros do exemplo ilustrativo

Parâmetros	Índices	Cenários						
		Base	I	II	III	IV	V	VI
CT_t (t/sem)	sem1	47250	<u>0</u>	47250	47250	47250	47250	47250
	sem2	47250	<u>0</u>	47250	47250	47250	47250	47250
	sem3	51975	<u>0</u>	51975	51975	51975	51975	51975
	sem4	51975	<u>0</u>	51975	51975	51975	51975	51975
	sem5	51975	<u>0</u>	51975	51975	51975	51975	51975
α_t (%)	sem1	100	100	<u>50</u>	100	100	100	100
	sem2	100	100	<u>50</u>	100	100	100	100
	sem3	100	100	<u>50</u>	100	100	100	100
	sem4	100	100	<u>50</u>	100	100	100	100
	sem5	100	100	<u>50</u>	100	100	100	100
M_t^{min} (t/sem)	sem1	47400	47400	47400	<u>45000</u>	47400	47400	47400
	sem2	42400	42400	42400	<u>45000</u>	42400	42400	42400
	sem3	47400	47400	47400	<u>45000</u>	47400	47400	47400
	sem4	42400	42400	42400	<u>45000</u>	42400	42400	42400
	sem5	47400	47400	47400	<u>45000</u>	47400	47400	47400
M_t^{max} (t/sem)	sem1	58000	58000	58000	<u>55000</u>	58000	58000	58000
	sem2	51800	51800	51800	<u>55000</u>	51800	51800	51800
	sem3	58000	58000	58000	<u>55000</u>	58000	58000	58000

Parâmetros (cont.)	Índices		Cenários (Continuação)						
			Base	I	II	III	IV	V	VI
M_t^{\max} (t/sem)	sem4		51800	51800	51800	<u>55000</u>	51800	51800	51800
	sem5		58000	58000	58000	<u>55000</u>	58000	58000	58000
$Cest_{pe}$ (t ou m ³)	Eterc	VHP	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
		Melaço	0	0	0	0	0	0	0
		AHEC	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	Eprop	VHP	15000	15000	15000	15000	<u>10000</u>	15000	15000
		Melaço	3000	3000	3000	3000	<u>1500</u>	3000	3000
		AHEC	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000
V_{pt} (u.m./t ou m ³)	VHP	sem1	250	250	250	250	250	<u>251</u>	250
		sem2	250	250	250	250	250	<u>251</u>	250
		sem3	250	250	250	250	250	<u>251</u>	250
		sem4	250	250	250	250	250	<u>251</u>	250
		sem5	250	250	250	250	250	<u>251</u>	250
	Melaço	sem1	120	120	120	120	120	<u>119</u>	120
		sem2	120	120	120	120	120	<u>119</u>	120
		sem3	120	120	120	120	120	<u>119</u>	120
		sem4	120	120	120	120	120	<u>119</u>	120
		sem5	120	120	120	120	120	<u>119</u>	120
V_{pt} (u.m./t ou m ³)	AHEC	sem1	449	449	449	449	449	<u>455</u>	449
		sem2	449	449	449	449	449	<u>455</u>	449
		sem3	449	449	449	449	449	<u>455</u>	449
		sem4	449	449	449	449	449	<u>455</u>	449
		sem5	449	449	449	449	449	<u>455</u>	449
DS_{pt} (t ou m ³)	VHP	sem1							
		sem2							
		sem3	16000	16000	16000	16000	16000	16000	
		sem4							
		sem5	10000	10000	10000	10000	10000	10000	<u>25000</u>
	Melaço	sem1							
		sem2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
		sem3							
		sem4	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
		sem5							<u>2000</u>
	AHEC	sem1							
		sem2							
		sem3	500	500	500	500	500	500	
		sem4							
		sem5	300	300	300	300	300	300	<u>1000</u>

As modificações e os resultados que forem relevantes para cada novo cenário são apresentados a seguir:

Cenário I

Para desconsiderar a utilização da frota própria, basta alterar o valor do parâmetro CT_t , como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17. Cenário I: utilização apenas do transporte com frota terceirizada

CT_t (t/sem)	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cenário base	47250	47250	51975	51975	51975
Cenário I	0	0	0	0	0

Esta modificação gera um resultado infactível; ou seja, não existe solução para este cenário. Podemos atribuir este resultado ao fato de que a restrição de fluxo de caixa [equação (62)] não é atendida, pois os custos de transporte terceirizado (10,00 u.m./t) são maiores que os custos de transporte utilizando a frota própria (7,24 u.m./t). Esta é uma explicação possível, dado que os custos de transporte da matéria-prima (L_{ft}) são constantes ao longo das cinco semanas. Portanto, caso o cenário I fosse factível, isto não acarretaria em alterações no planejamento da produção.

Cenário II

Para modificar o percentual de cana do fornecedor que pode ser aceito durante cada período, basta alterarmos o valor do parâmetro α_t (Tabela 18).

Tabela 18. Cenário II: diminuição do percentual semanal máximo de cana do fornecedor

α_t (%)	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cenário base	100	100	100	100	100
Cenário II	50	50	50	50	50

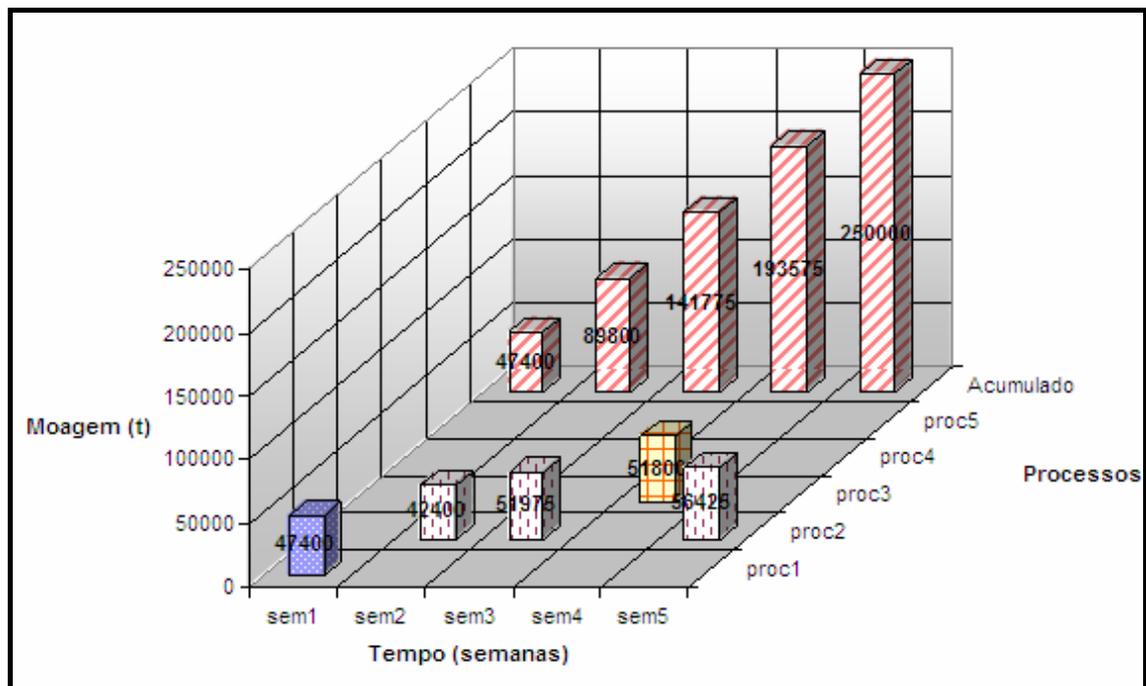


Figura 11. Plano de produção encontrado para o cenário II

Na análise deste exemplo ilustrativo foi utilizado um valor constante de α_t em todos os períodos t , tanto para o cenário base quanto para o cenário II; entretanto, isto se deve apenas à simplificação adotada nesta análise. O plano de produção encontrado quando rodamos o GAMS/CPLEX para os dados do cenário II está apresentado na Figura 11.

Comparando a Figura 11 com a Figura 10, percebemos que não houve alteração na seleção dos processos de produção, nem na determinação da moagem semanal. Este cenário apresentou apenas uma realocação da cana de fornecedores, de um período para o outro, como podemos perceber comparando a Tabela 14 com a Tabela 19 (os valores alterados estão sublinhados), para respeitar a restrição imposta para os valores da semana 4.

Tabela 19. Decisão sobre o fornecimento de matéria-prima no cenário II

M'_{mt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cana própria (t)	31783,37	<u>31670,73</u>	29316,83	<u>25900</u>	31329,06
Cana fornecida (t)	15616,63	<u>10729,27</u>	22658,17	<u>25900</u>	25095,94

Desta forma, como os valores de custo de obtenção da matéria-prima dos fornecedores é maior na semana 2 que na semana 4 (ver Tabela 10), temos um decréscimo no valor da margem de contribuição para 2,2 milhões de u.m.

Cenário III

Para modificar os limitantes superior de moagem e inferior de moagem para valores intermediários, basta alterar os parâmetros M_t^{min} e M_t^{max} , como mostrado na Tabela 20.

Tabela 20. Cenário III: mudança nos limitantes de moagem semanal

M_t^{min} (t/sem)	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cenário base	47400	42400	47400	42400	47400
Cenário III	45000	45000	45000	45000	45000
M_t^{max} (t/sem)	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cenário base	58000	51800	58000	51800	5800
Cenário III	55000	55000	55000	55000	55000

Na análise deste cenário procuramos verificar o comportamento do modelo quando os limitantes de moagem máxima e mínima não apresentam variações durante os períodos. Neste cenário pretendemos verificar se as restrições de limite de moagem estão se comportando bem e analisar se uma moagem mais uniforme durante a

safra pode trazer benefícios para a margem de contribuição. O plano de produção encontrado quando rodamos o GAMS/CPLEX para os dados do cenário III está apresentada na Figura 12.

A partir da comparação da Figura 10 com a Figura 12, percebemos que a seleção dos processos produtivos não foi alterada; entretanto, a moagem semanal foi modificada para atender aos novos limitantes impostos neste cenário. Sendo assim, foram modificados os valores de M''_{ft} , M'_{mt} e I_{pet} , como mostrado a seguir:

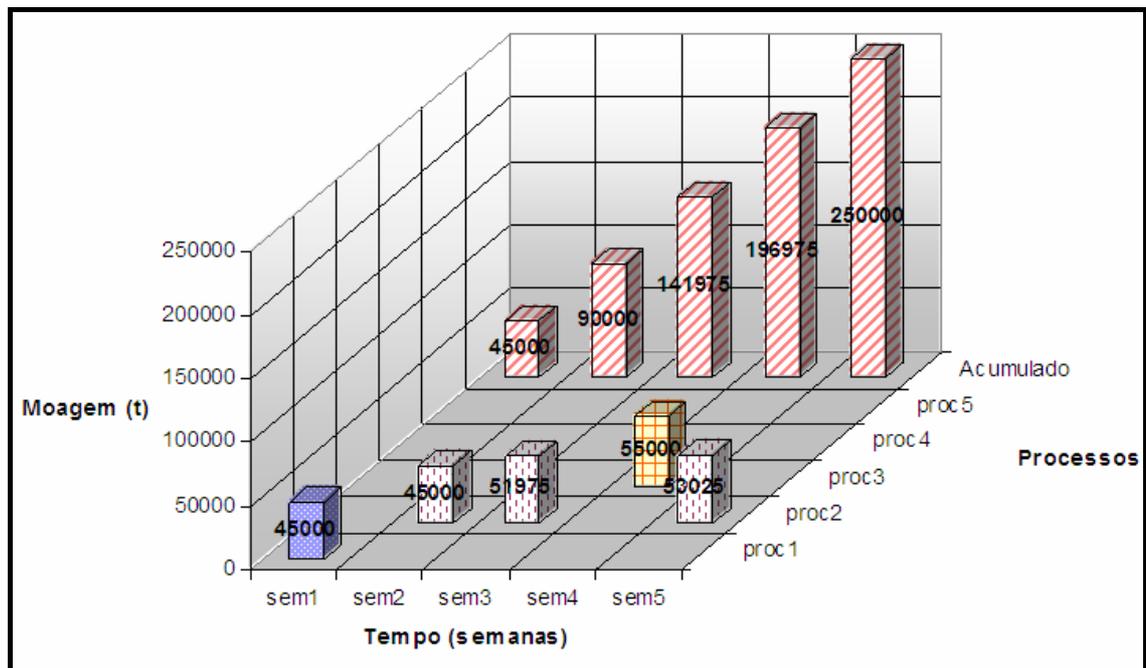


Figura 12. Plano de produção encontrado para o cenário III

Tabela 21. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário III

I_{pet}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Eprop VHP (t)	<u>5562,5</u>	<u>10647,5</u>	<u>546,66</u>	<u>4770,66</u>	<u>762,49</u>
Melaço (t)	<u>1800</u>	<u>800</u>	<u>800</u>	<u>1862,5</u>	<u>1862,5</u>
AEHC (m ³)	<u>1000</u>	<u>1585</u>	<u>1776,27</u>	<u>3497,77</u>	<u>3876,49</u>

Tabela 22. Decisão sobre o fornecimento de matéria-prima no cenário III

M'_{mt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cana própria (t)	<u>30179,08</u>	<u>37137,73</u>	<u>29323,94</u>	<u>24161,62</u>	<u>29197,62</u>
Cana fornecida (t)	<u>14820,92</u>	<u>7862,27</u>	<u>22651,06</u>	<u>30838,38</u>	<u>23827,38</u>

Tabela 23. Decisão sobre a forma de transporte de cana no cenário III

M''_{ft}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Frete próprio (t)	<u>45000</u>	<u>45000</u>	<u>51975</u>	<u>51975</u>	<u>51975</u>
Frete terceiros (t)			<u>3025</u>	<u>1050</u>	

Como esperado, o modelo redistribuiu a cana processada durante os períodos, modificando principalmente os valores de moagem na semana 2, devido a um maior valor do limitante inferior, e na semana 5, devido a um menor valor do limitante superior (ver Figura 12). Esta modificação teve influência nos valores das outras variáveis de decisão (Tabela 21 a Tabela 23) e melhorou o valor da margem de contribuição em comparação com os cenários anteriores, chegando a um valor de 2,4 milhões de u.m.

Cenário IV

Este cenário pretende forçar a utilização do estoque terceirizado impondo uma redução da capacidade de armazenamento do açúcar VHP e do melão nos armazéns e tanques próprios. Para modificar estes parâmetros procedemos como mostrado na Tabela 24:

Tabela 24. Cenário IV: mudança na capacidade de estoque próprio

	$Cest_{pc}$	Estoque Próprio	Estoque Terceirizado
Cenário base	VHP (t)	15000	10000
	Melão (t)	3000	0
	AEHC (m ³)	14000	3000
Cenário IV	VHP (t)	10000	10000
	Melão (t)	1500	0
	AEHC (m ³)	14000	3000

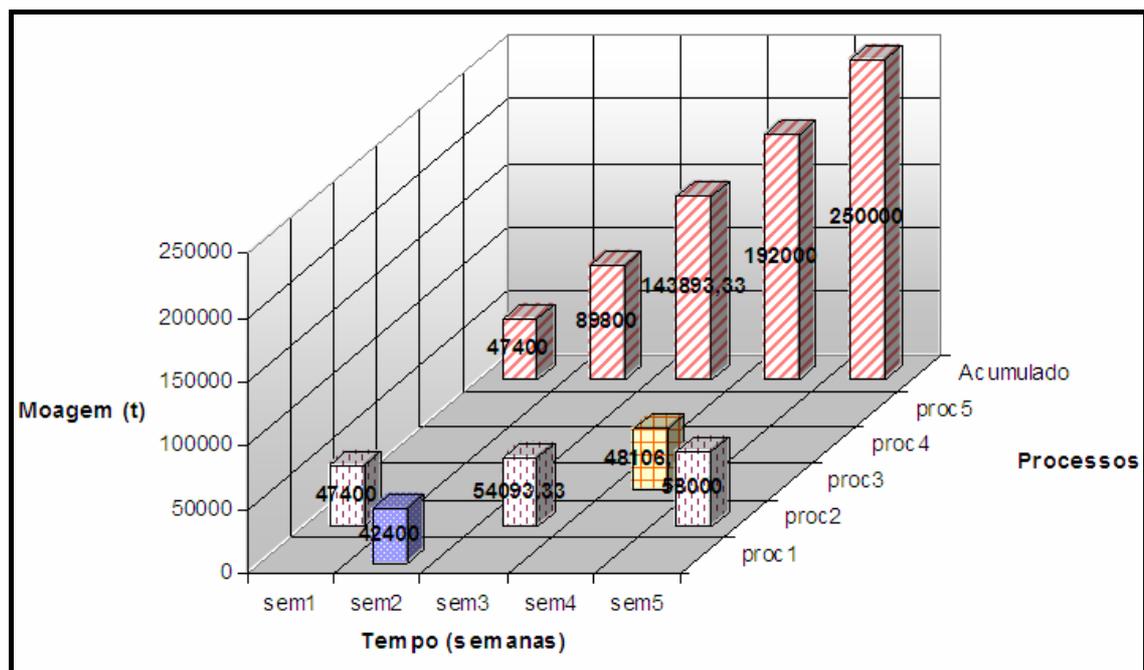


Figura 13. Plano de produção encontrado para o cenário IV

Seguindo o mesmo roteiro de apresentação seguido pelos cenários anteriores, podemos analisar a modificação por meio da Figura 13.

Neste cenário observamos que houve modificação na seleção dos processos de produção e na moagem semanal, decorrente da modificação imposta (ver Figura 13 comparando com a Figura 10). Fica claro que as outras variáveis de decisão também sofreram alteração em seus valores; porém, é suficiente apresentar a variável de estoque dos produtos finais para corroborar a hipótese feita ao implementar o cenário IV.

Tabela 25. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário IV

	I_{pt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Eterc	VHP (t)		<u>623,7</u>			
Eprop	VHP (t)	5832,5	<u>10000</u>	<u>763,29</u>	<u>4457,89</u>	<u>1011,89</u>
	Melaço (t)		<u>696</u>	<u>696</u>	<u>1500</u>	<u>1500</u>
	AHEC (m ³)	<u>1606,72</u>	<u>1606,72</u>	<u>1826,16</u>	<u>3331,9</u>	<u>3774,3</u>

O resultado está de acordo com o esperado. Percebemos o estoque de açúcar VHP, sendo utilizado na semana 3 e o estoque de melaço, sendo limitado pelo valor imposto por este cenário. A margem de contribuição também apresenta comportamento adequado, visto que esta modificação faz com que o valor da função objetivo decresça para de 1,98 milhões de u.m.

Cenário V

O cenário V modifica a receita obtida pela venda dos produtos em questão (VHP, AEHC e melaço). Pretende-se, com isso, constatar um acréscimo no valor da margem de contribuição. Para modificar o valor dos produtos, basta alterar o parâmetro V_{pt} como apresentado na Tabela 26. Por simplificação, os valores foram considerados constantes durante as cinco semanas de análise.

Tabela 26. Cenário V: mudança no valor de mercado dos produtos

	V_{pt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cenário base	VHP (u.m./t)	250	250	250	250	250
	Melaço (u.m./t)	120	120	120	120	120
	AEHC (u.m./m ³)	449	449	449	449	449
Cenário III	VHP (u.m./t)	251	251	251	251	251
	Melaço (u.m./t)	119	119	119	119	119
	AEHC (u.m./m ³)	455	455	455	455	455

As modificações do cenário V fizeram com que a moagem obtida no cenário base fosse mantida, tendo apenas uma modificação no sequenciamento dos

processos (troca entre a utilização do processo 1 e do processo 2 nas duas primeiras semanas). Podemos comparar a Figura 14 com a Figura 10 para verificar esta afirmação.

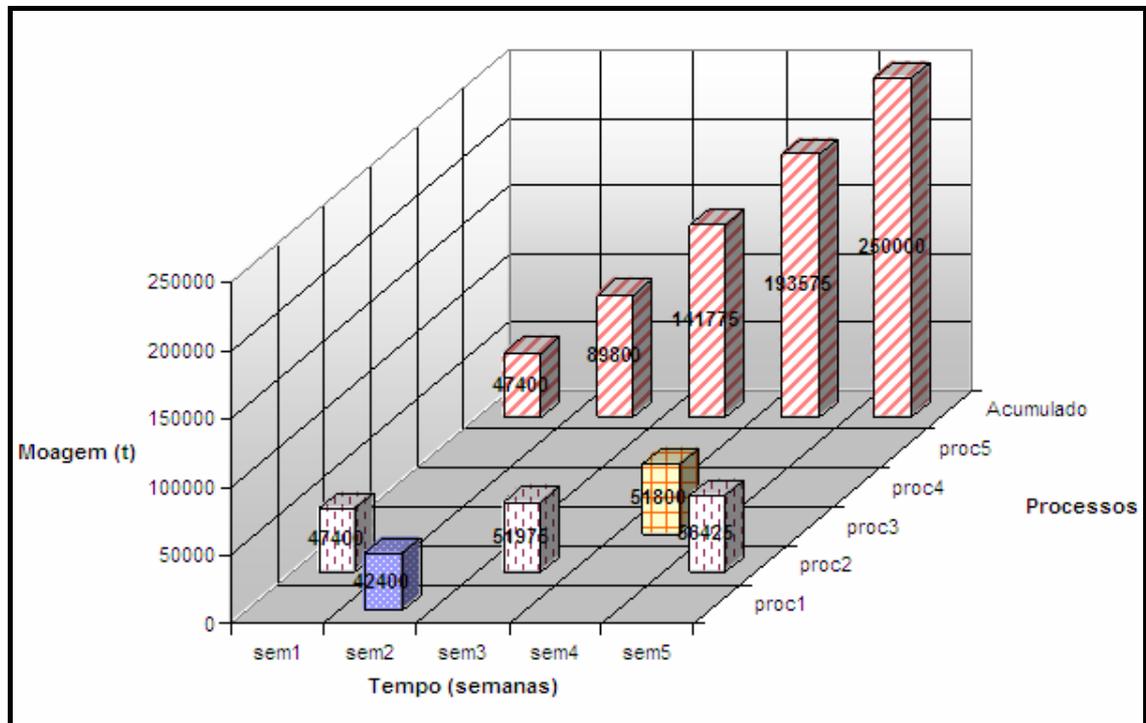


Figura 14. Plano de produção encontrado para o cenário V

Percebemos que esta modificação foi feita para dar preferência na produção de álcool (que agora apresenta um rendimento mais atrativo), já que o processo 2 foi utilizado numa semana com moagem maior e proporcionou um maior rendimento do AEHC em detrimento do melão. Observamos também que, apesar do melão ter tido seu valor de mercado decrescido, este produto continua sendo fabricado, o que mostra que a restrição de atendimento a demanda está sendo respeitada. A Tabela 27 ilustra o estoque de produtos acabados.

Tabela 27. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário V

I_{pet}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	
Eprop	VHP (t)	5832,5	10623,7	522,86	4501,1	877,13
	Melão (t)		696	696	1638,5	1638,5
	AEHC (m ³)	1606,72	1606,72	1797,99	3419,33	3841,57

A margem de contribuição também apresenta comportamento adequado, visto que esta modificação faz com que o resultado da função objetivo aumente consideravelmente para o valor de 2,71 milhões de u.m.

Cenário VI

Neste cenário modificamos o período de entrega e a demanda de cada produto, concentrando os valores na última semana. Espera-se que o modelo apresente uma maior utilização dos estoques e modifique consideravelmente o plano de produção. Os novos valores da demanda são mostrados na Tabela 28 (implementação apresentada no Anexo C desta dissertação).

Tabela 28. Cenário VI: mudança na demanda dos produtos

	DS_{pt}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Cenário base	VHP (t)			16000		10000
	Melaço (t)		1000		1000	
	AEHC (m ³)			500		300
Cenário VI	VHP (t)					25000
	Melaço (t)					2000
	AEHC (m ³)					1000

A seleção dos processos de produção e a moagem semanal encontrada, quando rodamos o GAMS/CPLEX para os dados do cenário VI, está apresentada na Figura 15. Por meio desta figura podemos perceber a grande modificação na seleção dos processos, embora os processos 4 e 5 continuem sem utilização. Neste cenário, os processos 2 e 3 foram privilegiados e a moagem atingiu seu pico no período de maiores rendimentos industriais (semana 3).

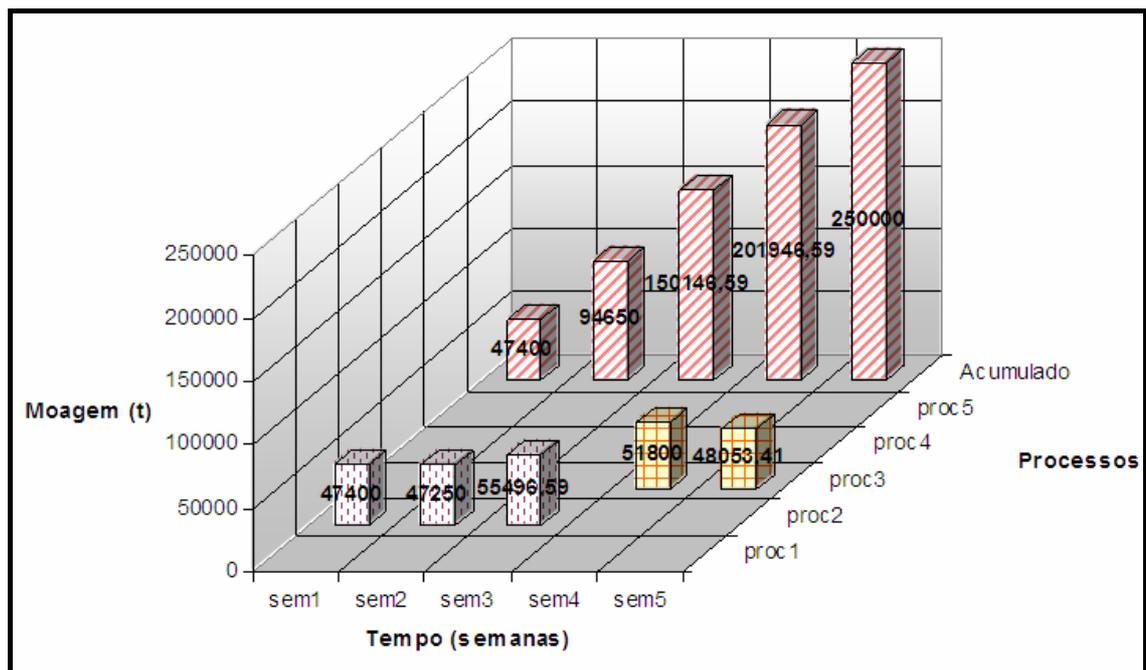


Figura 15. Plano de produção encontrado para o cenário VI

Fica claro novamente que as outras variáveis de decisão também sofreram alteração em seus valores devido à modificação do plano de produção. Porém, apresentamos apenas a variável de estoque dos produtos finais para corroborar a hipótese de maior utilização do estoque (Tabela 29), e o valor da função objetivo para corroborar a hipótese de diminuição da margem de contribuição pela estratégia de carregamento de estoque durante estes períodos. O valor obtido para a margem de contribuição no cenário VI foi de 1,68 milhões de u.m. durante o período analisado, como esperado.

Tabela 29. Estoque de produtos acabados relativo ao cenário VI

	I_{pet}	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
Eterc	VHP (t)			<u>2470,61</u>	<u>6448,85</u>	
	VHP (t)	5832,5	<u>11171,75</u>	<u>15000</u>	<u>15000</u>	
Eprop	Melaço (t)				<u>1942,5</u>	<u>1682,03</u>
	AHEC (m ³)	<u>1606,72</u>	<u>2220,97</u>	<u>2959,07</u>	<u>4580,41</u>	<u>5031,63</u>

Estes resultados indicam que as variáveis de decisão do modelo e o valor da função objetivo estão se comportando de forma consistente e esperada para as modificações que foram impostas. Portanto, podemos inferir que o modelo [representado nas equações (34) a (67)] e sua implementação no GAMS/CPLEX representam de forma adequada o problema em questão.

Os tempos computacionais obtidos ao solucionar os cenários apresentados nesta seção foram da ordem de poucos segundos, não sendo um fator complicador na análise deste exemplo ilustrativo.

Analisando os resultados obtidos, podemos apresentar algumas considerações preliminares sobre o comportamento deste sistema de produção que foi modelado. Por meio do cenário I, podemos dizer que o custo de transporte terceirizado é representativo e pode inviabilizar o planejamento de safra, dado que o capital de giro da empresa pode não ser suficiente. O cenário II mostra que é importante negociar a forma de entrada da cana de terceiros, regulando de forma adequada o parâmetro α_t . O cenário III nos sugere que uma moagem mais regular (sem grandes modificações durante as semanas) proporciona uma margem de contribuição mais favorável à empresa. O cenário IV e o cenário VI sugerem que o planejamento da produção deve ser feito de forma que se evite a utilização de estoques terceirizados. O cenário V mostra que a

variação dos preços do mercado pode modificar consideravelmente o planejamento da produção, podendo gerar uma necessidade de replanejamento constante.

Entendemos que este replanejamento deve ser executado uma vez por semana. Neste momento a empresa deve adicionar os novos dados colhidos, referentes à última semana, e rever suas ações para os períodos que restam até o fim da safra. Este tipo de planejamento pode ser definido como um planejamento dinâmico com horizonte rolante, porém, com redução progressiva dos períodos analisados. Nesta dissertação adotaremos a nomenclatura *planejamento rolante com horizonte decrescente* ou *planejamento minguate* para representar este tipo de planejamento.

5.2 Exemplo com dados reais do estudo de caso

O estudo de caso desenvolvido caracteriza-se pela aplicação do modelo SPDL/PU aos dados colhidos na USC durante a safra 2004/2005. A intenção é verificar a adequação do modelo e verificar o tempo computacional requerido, quando são utilizados dados com ordem de grandeza equivalente aos problemas encontrados na prática.

A apresentação dos resultados deste estudo de caso está dividida em quatro etapas. Na primeira etapa apresentamos a forma como a coleta de dados foi feita e as considerações sobre a utilização do método de geração de parâmetros (seção 5.2.1). Na segunda etapa apresentamos os resultados de um cenário preliminar e, logo em seguida, utilizamos este mesmo cenário como ponto de partida para o processo de validação (seção 5.2.2). Na terceira etapa apresentamos as sugestões que foram colhidas no processo de validação e apresentamos as modificações que foram feitas no modelo SPDL/PU para atender estas sugestões dos decisores da USC (seção 5.2.3). Na quarta etapa apresentamos os resultados encontrados no cenário final e fazemos uma análise por meio de uma comparação entre os resultados obtidos e os dados reais obtidos pela USC durante a safra 2004/2005 (seção 5.2.4).

Durante o processo de validação, um conjunto de sugestões foram colhidas, uma parte destas sugestões foi incorporada neste trabalho (modificações de dados de entrada, informações de saída, índices do modelo) e outra parte foi agrupada como sugestões para pesquisas futuras (capítulo 6). A seguir apresentamos a coleta de dados e as considerações sobre a utilização do método de geração de parâmetros.

5.2.1 Coleta de dados e resultados do método de geração de parâmetros

Os parâmetros de entrada deste estudo de caso foram obtidos por meio de uma análise dos dados de custeio, dos dados de controle de qualidade de cana, dos dados de controle laboratorial da USC e dos dados fornecidos pela CRPAAA. Todos estes dados foram coletados e/ou calculados pelos funcionários da USC e da CRPAAA, durante a safra 2004/2005 e foram disponibilizados por estas empresas para utilização neste trabalho. O Anexo E apresenta os dados que foram utilizados no cenário preliminar (apresentado na seção 5.2.2) e o Anexo G apresenta os dados utilizados no cenário final (apresentado na seção 5.2.3), com exceção dos dados de geração da matriz de rendimentos, que estão apresentados no Apêndice A. A seguir, apresentamos alguns comentários sobre os dados utilizados no cenário preliminar.

Parâmetros do cálculo da matriz de rendimentos A_{pkt} (seção 4.1.1)

Para a utilização do método de geração de parâmetros, foi preciso determinar como seria feita a divisão dos processos de produção, ou seja, foi preciso determinar quantos processos são necessários para modelar a usina e a destilaria da USC. Esta decisão foi baseada no conjunto de valores que os parâmetros TM_k , TS_k , Pol_k , $Umid_k$, R_{pa} , $MAP_{pa,k}$, $MSP_{ps,k}$, BMF e $PzaM$ podem assumir.

No caso da USC, o parâmetro BMF pode ser considerado constante e com valor de 85%; o parâmetro $PzaM$ também é constante e com valor de 40%; o parâmetro TM_k assume três valores (0,33; 0,66; e, 1); e o parâmetro TS_k assume quatro valores (0,7; 0,8; 0,9; e 1). Os parâmetros Pol_k , $Umid_k$ e $MSP_{ps,k}$, que são analisados sempre em conjunto, determinam sete tipos de açúcares diferentes (*Standard* – 99,3 e 0; *Superior* – 99,5 e 0; *Especial* – 99,7 e 0; *Extra* – 99,8 e 0; *VHP* – 99,3 e 0,1; *VVHP* – 99,6 e 0,1; e *Demerara* – 98,8 e 0,2), e os parâmetros R_{pa} e $MAP_{pa,k}$ determinam três combinações possíveis para o rendimento teórico da produção dos álcoois (*AEHC* – 67,87; *AEAC* – 65,03; e *AEHC* – 33,94 e *AEAC* – 32,52). Este conjunto de dados gera um número de processos igual a $3 \times 4 \times 7 \times 3$, ou seja, 252 processos necessários para representar a USC. O Apêndice A apresenta a lista completa dos processos utilizados para o modelo SPDL/PU.

Para calcular a matriz A_{pkt} (seção 4.1.1), além dos dados mencionados, ainda é necessário coletar os valores de $Elbti_t$, Efd_t , pc_t , $PzaC_t$ e AR_t . Estes valores foram obtidos no boletim de rendimentos industriais da USC. O boletim industrial é o relatório

elaborado pelo laboratório das usinas para divulgar os dados de qualidade da matéria-prima, de qualidade dos produtos finais, dados de rendimentos dos processos e dados de produtividade da empresa. Portanto, os dados utilizados para estes parâmetros são as médias semanais obtidas na safra 2004/2005, de cada um destes itens.

Parâmetros do cálculo dos custos industriais CK_{kt} (seção 4.1.2)

Além de alguns dados que já foram citados, o cálculo dos custos industriais necessita da determinação dos parâmetros $cproc$, ARm e $Fator_{pa}$. O valor do custo de produção de cada kg de ART, nos produtos finais, pelos processos da USC ($cproc$), foi obtido por meio de uma análise dos custos de produção da própria usina, considerando os custos de mão-de-obra variável, os custos dos produtos químicos e insumos, e os custos com combustível e energia na safra 2004/2005.

O $Fator_{pa}$ é um parâmetro estequiométrico constante que determina a conversão dos álcoois em etanol absoluto, obtido em Fernandes (2003). O valor de ARm também foi considerado constante; entretanto, este parâmetro foi obtido por meio do boletim de rendimentos industriais da USC, no qual consideramos a média obtida na safra 2004/2005.

Parâmetros do cálculo dos custos agrícolas C_{mt} (seção 4.1.3)

Na coleta dos parâmetros do cálculo dos custos agrícolas foram analisados os contratos de arrendamento de fazendas para determinar o custo de arrendamento ($carr$) médio de todas as fazendas arrendadas que forneceram cana na safra 2004/2005 e, também, verificar qual o ATR padrão para a cana arrendada ($ATRarr$) previsto nesses contratos. Além dos contratos de arrendamento, procuramos representar no modelo, por meio do parâmetro δ_m , um eventual acordo para acrescer o valor da cana de uma determinada fonte de fornecimento.

Dos parâmetros restantes, o valor de ATR_t e $proda_{mp,t}$ foram obtidos no boletim de análises e controle da qualidade da cana. Este boletim tem função análoga ao boletim industrial, em se tratando da área agrícola. O boletim agrícola é o relatório elaborado pelo setor agrícola das usinas para divulgar os dados de qualidade, de produtividade e da matéria-prima, e dados de eficiência e acompanhamento do CCT de cana. Portanto, os dados do ATR contido na cana e produtividade agrícola são valores médios obtidos em cada semana da safra 2004/2005 da USC.

O valor do $pATR_t$ (preço do ATR em cada semana) foi obtido por meio do relatório de fechamento da safra 2004/2005 da CRPAAA. Os valores de cp_t , cts_t , $cir_{mp,t}$ foram colhidos nos relatórios de custos agrícolas, considerando os custos variáveis de cada processo da etapa agrícola, como descrito na seção 2.2.1.

Parâmetros do modelo SPDL/PU (seção 4.2)

Os parâmetros necessários para rodar o modelo SPDL/PU são divididos em duas categorias, os que são fornecidos pelo modelador ou pelo usuário (M^{min} , M^{max} , $Cgiro$, CT , α_t , β_t , φ_t , $Cest_{pe}$, L_{ft} , h_{pe} , DS_{pt} , V_{pt} , VC_{pt} , I_{pe0} , $Prev_{m0}$) e os que são obtidos por meio do método de geração de parâmetros (A_{pkt} , CK_{kt} , C_{mt}). Para os parâmetros A_{pkt} , CK_{kt} , C_{mt} , os comentários apresentados anteriormente (seções 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3, respectivamente) já mostram como estes valores foram obtidos. A seguir, apresentamos os parâmetros que são fornecidos pelo usuário no momento de rodar o modelo SPDL/PU.

Os parâmetros M^{min} e M^{max} foram determinados por indicação dos responsáveis pelo PCP da USC, já que estes parâmetros são de ordem técnica, devido à regulamentação de funcionamento da moenda. Estes parâmetros estão relacionados com o tempo efetivo de moagem durante as semanas de safra (φ_t), que foi obtido no boletim industrial da USC. Além da capacidade mínima e máxima de moagem, o capital de giro semanal que a USC disponibiliza para rodar a safra ($Cgiro$) e a porcentagem máxima de cana de fornecedores (α_t) também foram definidos pelos responsáveis pelo PCP da USC, pois são dados mais subjetivos e relacionados a um nível de decisão de diretoria.

A capacidade de transporte da frota própria (CT) é um dado constante e se refere a capacidade total dos veículos utilizados na etapa de CCT da USC. Este valor está relacionado com a disponibilidade da frota própria (β_t), que foi obtida por meio dos sistemas internos de controle logístico da USC. Além disso, o custo de CCT (L_{ft}), também foi coletado por meio dos sistemas de controle logístico da USC.

Os dados referentes à estocagem de produtos ($Cest_{pe}$, h_{pe} , I_{pe0}) foram obtidos na CRPAAA e na USC, dependendo do local onde cada produto foi estocado na safra 2004/2005. Os valores de mercado dos produtos (V_{pt}) e o valor do adiantamento da cooperativa (VC_{pt}) foram obtidos por meio do relatório de fechamento da safra 2004/2005 da CRPAAA.

A previsão de safra ($Prev_{m0}$) foi estabelecida pelo resultado de quantidade de cana efetivamente moída na safra 2004/2005 e a demanda DS_{pt} foi estimada, já que as metas estabelecidas pela CRPAAA são apenas metas para todo o período de safra.

Definição do tamanho da safra

Outra questão que necessitou de análise prévia foi a delimitação dos períodos de análise. Neste caso, a decisão foi tomada a partir da quantidade de períodos necessários para processar toda a cana disponível, levando em consideração uma moagem semanal média contida entre os limitantes superior e inferior de moagem estabelecidos nos dados de entrada. Esta análise preliminar fornece o valor de 22 semanas para o processamento de toda a cana disponível, definindo o tamanho do índice t . O período inicial adotado foi definido de forma que a safra no modelo, e a safra na USC coincidissem ao menos no primeiro período de moagem. Portanto, temos o primeiro período como sendo a semana 1 e, conseqüentemente, o último período a semana 22.

Com os dados colhidos temos condições de aplicar o modelo SPDL/PU para a instância da safra 2004/2005 da USC. Os dados de entrada desta aplicação preliminar estão detalhados no Anexo E e os dados de saída estão detalhados no Anexo F. A seguir apresentamos a avaliação dos resultados encontrados e algumas considerações sobre o comportamento do modelo.

5.2.2 Cenário preliminar

Os dados de entrada utilizados no cenário preliminar estão detalhados no Anexo E e os resultados encontrados, ao rodarmos o modelo SPDL/PU com estes dados, estão no Anexo F. A seguir destacamos os principais resultados e as observações decorrentes desta análise.

A primeira variável de decisão apresentada pelo modelo indica a variação do estoque de produtos acabados durante os períodos de safra (I_{pet}). Analisando estes dados, verificamos que foi necessário utilizar os estoques terceirizados e que, além disso, temos uma quantidade representativa de produtos em estoque no final da semana 22 (Figura 16). Isto se deve à necessidade de processar toda a cana disponível, mesmo que a demanda seja inferior à capacidade de produção da usina.

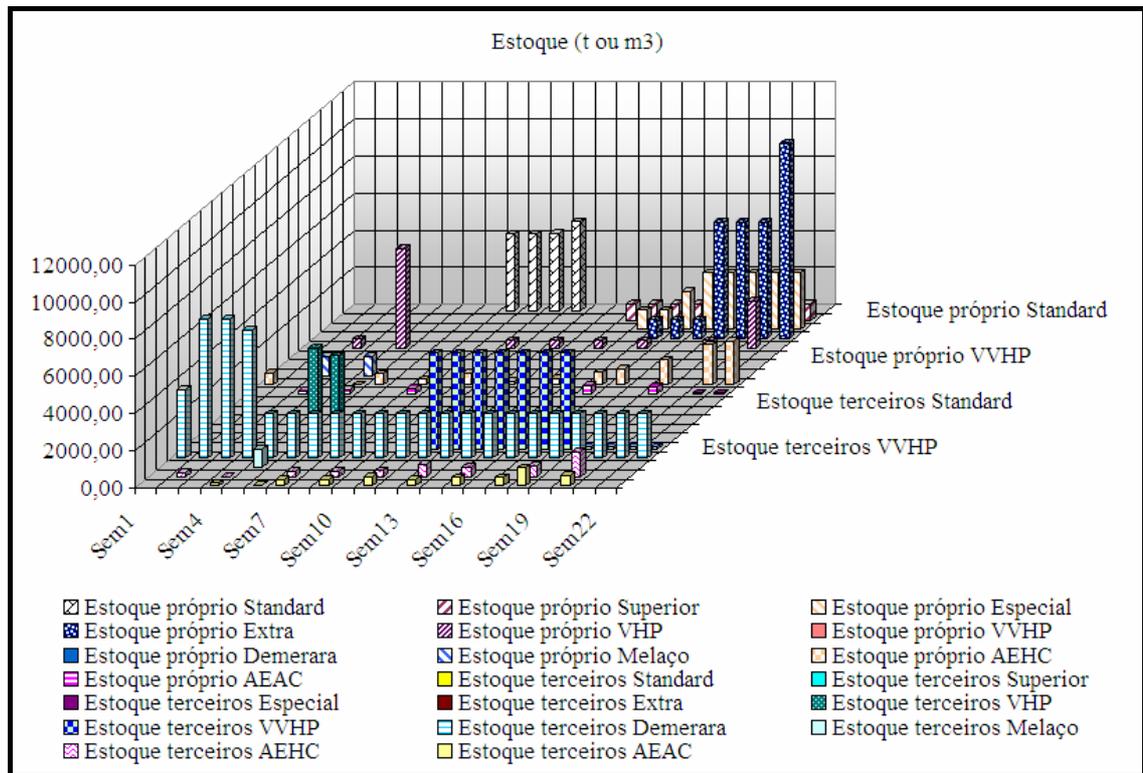


Figura 16. Esquema gráfico da evolução do estoque próprio e terceirizado (cenário preliminar)

A segunda variável de decisão apresentada pelo modelo é a variável de disponibilidade de cana por período. Analisando esta variável, podemos perceber que toda a cana foi processada durante as 22 semanas que formaram a safra. Esta confirmação se dá quando comparamos os valores de disponibilidade ($Disp_{mt}$) de cada fonte de fornecimento m na semana 22 com os valores de moagem (M''_f) de cada fonte de fornecimento m na semana 22 (Tabela 30).

Tabela 30. Disponibilidade de cana e moagem por fonte de fornecimento no período 22

Disponibilidade (m,"sem22")		Moagem (m,"sem22")	
Própria reforma		Própria reforma	
Própria socaria	28350 t	Própria socaria	28350 t
Arrendada reforma		Arrendada reforma	
Arrendada socaria		Arrendada socaria	
Acionistas		Acionistas	
Fornecedores	12150 t	Fornecedores	12150 t
Outras fontes		Outras fontes	

Seguindo com a análise das variáveis de decisão, temos a variável M'_{mt} , que indica a quantidade de cana de cada fonte de fornecimento. Percebe-se que a restrição de quantidade de cana de fornecedor processada por semana foi respeitada. Além disso, foi dada preferência ao processamento deste tipo de cana entre as semanas

7 e 11, apesar do modelo também sugerir que uma quantidade razoável de cana de fornecedor seja colhida nas semanas 3, 21 e 22 (Figura 17).

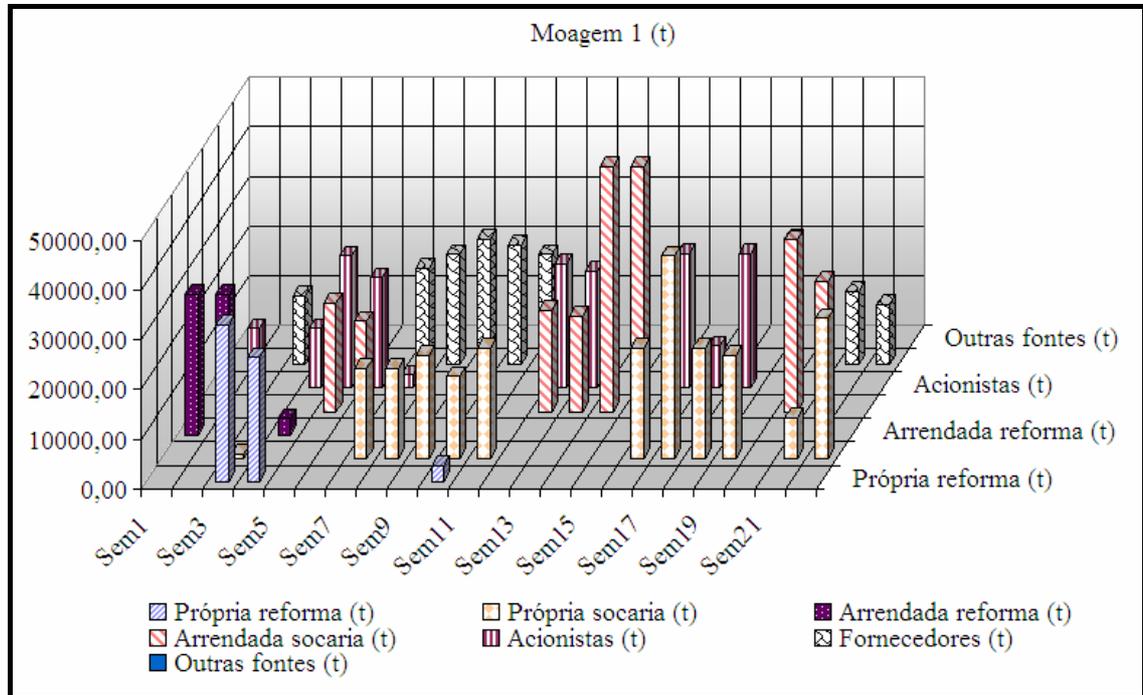


Figura 17. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por fonte de fornecimento (cenário preliminar)

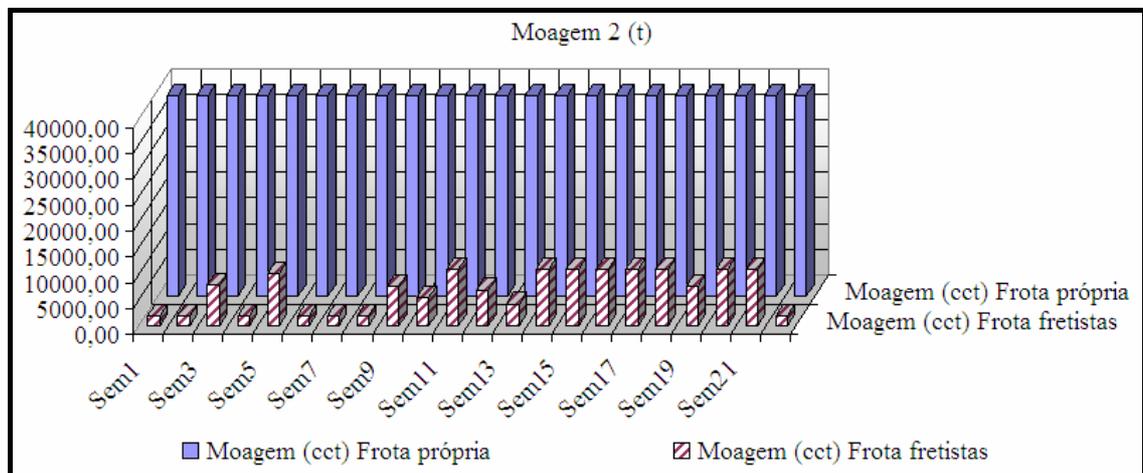


Figura 18. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por serviço de transporte (cenário preliminar)

A variável M''_{ft} aponta para a necessidade de utilização de serviços de transporte terceirizado durante parte da safra, visto que a capacidade de transporte da frota própria (43000 t/sem) é inferior ao limitante inferior de moagem (45000 t/sem). Esta necessidade aumentou nos períodos finais, já que a moagem foi maior nestes períodos (Figura 18).

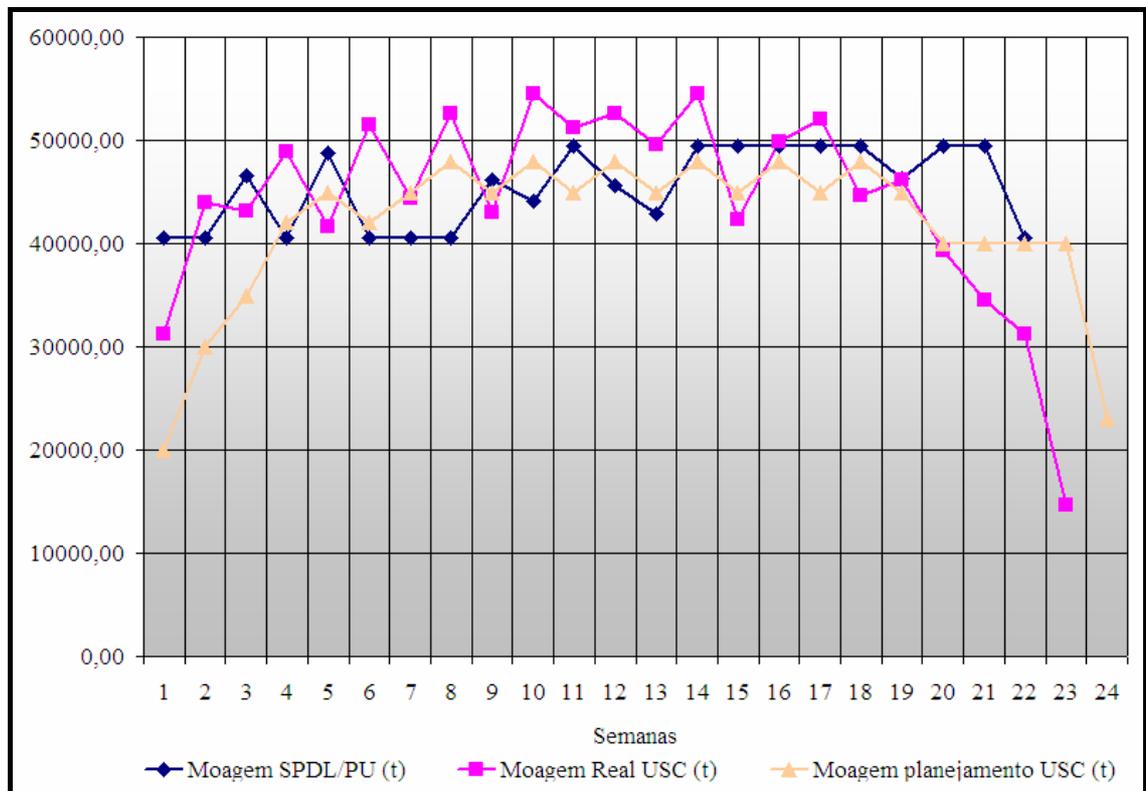


Figura 19. Evolução e comparação da moagem durante a safra (cenário preliminar)

Para uma análise mais detalhada do comportamento do modelo proposto nesta dissertação, podemos comparar a variação da moagem total M_t , com os dados de moagem real e com os dados de moagem planejada da USC para a safra 2004/2005. Nesta análise, percebemos que a moagem sugerida teve uma tendência ascendente, enquanto a moagem real e a moagem planejada tiveram uma tendência parabólica com ponto de máxima moagem entre as semanas 10 e 17. A Figura 19 ilustra esta comparação.

A Figura 20 apresenta o plano de produção encontrado na análise deste cenário preliminar, ilustrando o comportamento da variável de seleção de processos X_{kt} (utilizar ou não o processo k , no período t) e da moagem acumulada durante os períodos de safra. Nesta figura, podemos perceber que foram necessários 14 processos diferentes para atender ao plano de moagem. Percebe-se também que o processo 172, o processo 175 e o processo 187 foram os mais utilizados (três semanas), seguidos pelo processo 171 e processo 183 (duas semanas).

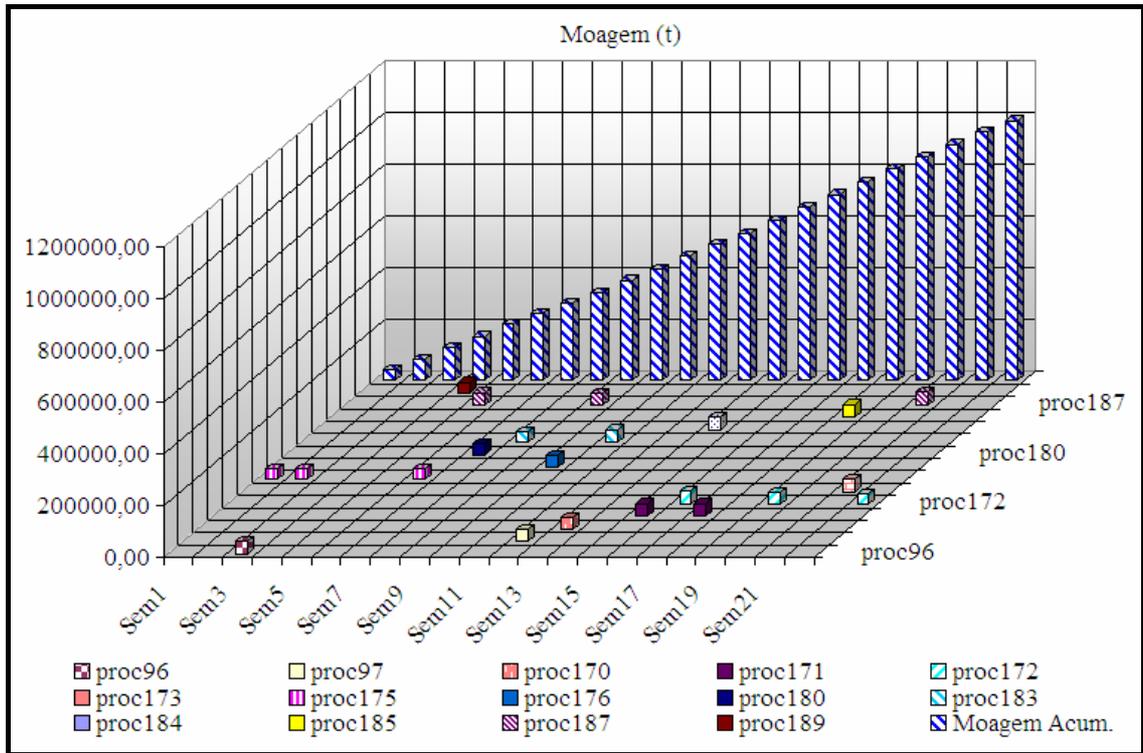


Figura 20. Esquema gráfico do plano de produção (cenário preliminar)

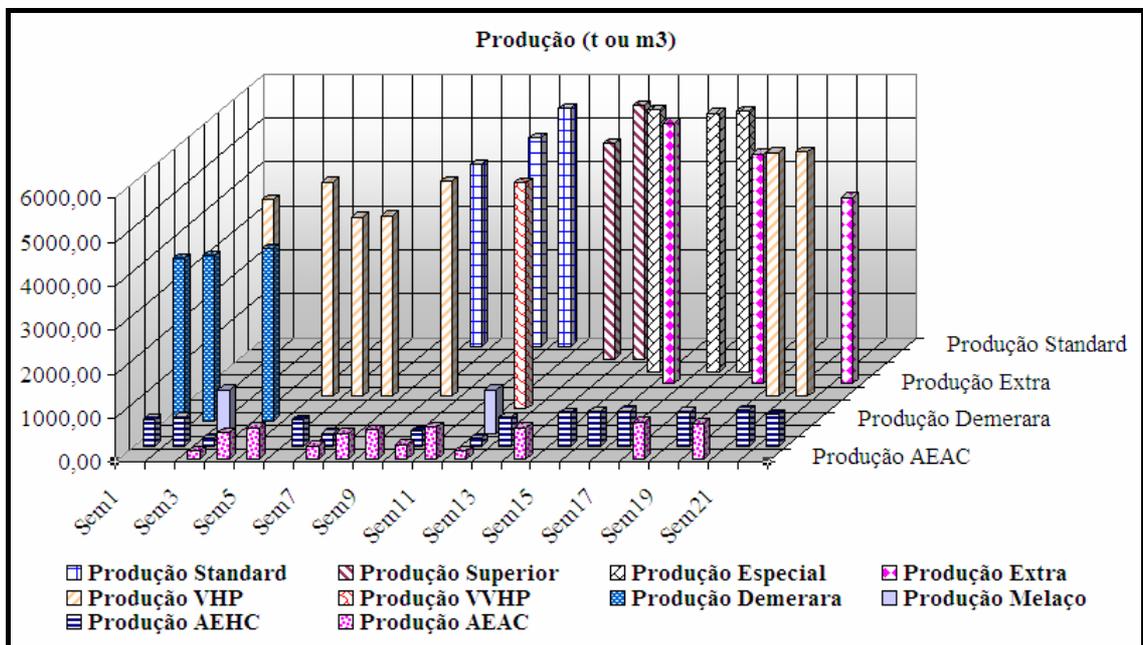


Figura 21. Esquema gráfico de produção (cenário preliminar)

A Figura 21 ilustra a produção de açúcar, álcool e melação em todas as 22 semanas do cenário preliminar. Analisando esta figura, percebemos que o plano gerado contempla a produção de todos os sete tipos de açúcares, todos os dois tipos de álcoois (inclusive com produção semanal simultânea destes álcoois) e a produção de melação.

Ao utilizar o modelo SPDL/PU para solucionar este cenário preliminar foi estabelecida uma tolerância (ou *gap*) admissível de 0,5% entre a solução encontrada e o limitante superior da melhor solução inteira possível. Isto se deve à dificuldade encontrada para alcançar a solução comprovadamente ótima (*gap* de 0%). Tentativas de encontrar a solução comprovadamente ótima não obtiveram solução em 12 horas de processamento.

Tendo estabelecido esta tolerância, a margem de contribuição encontrada para este cenário preliminar foi de 27,5 milhões de unidades monetárias. Este valor tem um *gap* de 0,49% em relação ao limitante superior da melhor solução inteira possível para este cenário (27,64 milhões de unidades monetárias).

Tempo computacional necessário para solucionar o cenário preliminar

O processamento computacional destes dados teve duração de aproximadamente 1000 segundos (cerca de 17 minutos). O *gap* entre o limitante superior e o valor da solução corrente evoluiu da forma apresentada na Figura 22; ou seja, as primeiras soluções encontradas pelo CPLEX já apresentaram resultados inferiores a 1%, continuando com um avanço rápido até os 100 segundos (*gap* pouco superior a 0,5%) e obtendo uma solução satisfatória com cerca de 1000 segundos.

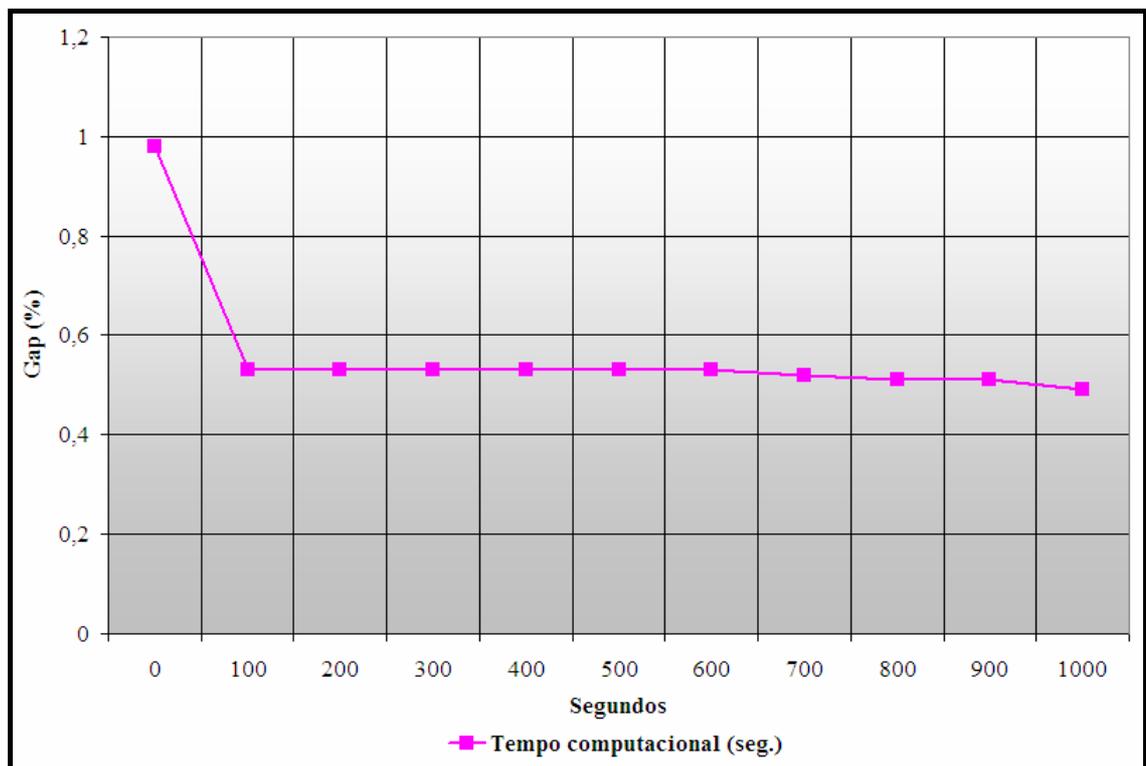


Figura 22. Evolução do *gap* da solução (cenário preliminar)

Validação do modelo SPDL/PU

Todos os resultados apresentados nesta seção e todos os dados do Anexo E e Anexo F foram utilizados para iniciar o processo de validação do modelo SPDL/PU junto com os decisores da USC. O ponto de partida para este processo de validação foi o cenário preliminar e as sugestões dos decisores ajudaram a elaborar vários outros cenários, decorrentes de eventuais modificações do primeiro; entretanto, por motivo de espaço, estes cenários não serão apresentados nesta dissertação. Na seção 5.2.3 listamos estas modificações relacionando-as com as sugestões e/ou observações apresentadas pelos decisores e na seção 5.2.4 apresentaremos o cenário final, resultado das modificações que foram adotadas e que possibilita algumas comparações interessantes com os dados da USC.

A Tabela 31 relaciona os profissionais que foram consultados durante este processo de validação.

Tabela 31. Nomenclatura adotada e função dos profissionais consultados no processo de validação

Nomenclatura adotada	Função
Decisor A	Diretor Industrial
Decisor B	Diretor Administrativo/Financeiro
Decisor C	Assessor Diretoria Agrícola
Decisor D	Gerente Industrial
Decisor E	Supervisor de Manutenção Elétrica

Durante esta análise, os decisores utilizaram da experiência adquirida na atividade de planejamento para apresentar uma análise crítica dos dados e resultados do cenário preliminar. As observações e sugestões decorrentes desta análise foram utilizadas como ponto de partida para eventuais modificações no modelo. A seguir, apresentamos as observações e sugestões de melhoria dos dados de entrada, das informações de saída e dos índices considerados nesta análise.

- I. Dado que a USC teve uma safra de 23 semanas, seria interessante modificar o modelo SPDL/PU para considerar as mesmas 23 semanas de safra (Decisores A, C e E);
- II. Não existe uma utilização de estoque terceirizado tão intensa como observado na Figura 16. Normalmente, o estoque terceirizado só é utilizado em casos extremos (Decisores A, B, C, D e E);

- III. Muitos produtos apresentaram valores positivos de estoque na semana 22 (Figura 16). Normalmente a quantidade e a variedade de produtos em estoque no último período de safra são pequenas (Decisor B);
- IV. A Figura 17 mostra a moagem obtida por tipo de fonte de fornecimento de cana-de-açúcar. A sugestão é desconsiderar a diferença entre cana de reforma e cana de socaria neste nível de análise (Decisores B, C e D);
- V. Outra sugestão relacionada com a fonte de fornecimento de cana-de-açúcar é a de retirar da análise a cana de outras fontes (*cout*). Segundo o Decisor C, este tipo de fonte de fornecimento pode ser incorporado na cana fornecida sem maiores problemas;
- VI. A Figura 17 mostra uma quantidade razoável de cana de fornecedor sendo colhida nas semanas 3, 21 e 22. Normalmente os fornecedores iniciam a moagem na quarta semana e encerram em torno da vigésima semana (Decisores B e C);
- VII. A Figura 18 mostra a moagem obtida por tipo de fornecedor de serviço de transporte. Seria interessante considerar o transporte em condomínio, executado por um grupo de acionistas desde a safra 2004/2005 (Decisores B e C);
- VIII. Seria interessante separar o tempo aproveitado na indústria (φ_t) do tempo efetivo disponível de moagem. Isto ajudaria a modelar situações em que, por exemplo, a moagem terminasse na metade da última semana, deixando apenas 50% do tempo disponível nesta semana (Decisores A e D);
- IX. O dado de entrada de tempo aproveitado na indústria (φ_t) não está considerando as paradas programadas para manutenção (Anexo E). Normalmente a USC intercala paradas, com duração em torno de 10 horas, a cada 3 semanas para limpeza de incrustações e manutenção em equipamentos (Decisores A e D);
- X. O dado de entrada de disponibilidade da frota própria (β_t) não está considerando uma queda de eficiência do transporte com frota própria nas últimas semanas de safra (Anexo E). Normalmente esta redução gira em torno de 5% para o caso da USC (Decisores C e D);
- XI. A Figura 19 mostra que a moagem sugerida pelo modelo SPDL/PU teve uma tendência ascendente, enquanto o comportamento típico das decisões de moagem está de acordo com a moagem real e a moagem planejada (Decisor A);

- XII. A demanda estabelecida no cenário preliminar (DS_{pt}) contempla todos os produtos possíveis de ser produzidos na USC (Anexo E). Normalmente a USC produz um subconjunto de produtos estabelecido pela CRPAAA (Decisores A, D e E);
- XIII. Os dados de produtividade agrícola reais da cana arrendada não estão de acordo com os dados utilizados no cenário preliminar. Na safra 2004/2005 o valor da produtividade da cana arrendada foi superior ao valor de produtividade da cana própria (Decisores B e C);
- XIV. A margem de contribuição deste cenário preliminar foi de 27,5 milhões de unidades monetárias. Este valor é muito superior aos valores obtidos nas últimas safras pela USC (Decisor B);
- XV. Seria interessante disponibilizar como dado de saída os valores obtidos para a margem de contribuição semanal acumulada, para a receita total da safra, para os gastos na etapa agrícola, na etapa de CCT, na etapa industrial, para os gastos com estoque de produtos acabados e também para a eficiência industrial teórica do plano de produção gerado (Decisores A, B e C);
- XVI. Com a observação detalhada dos valores encontrados para os novos dados de saída, foi possível observar que os gastos com cana-de-açúcar foram inferiores aos gastos contabilizados pela USC. Na opinião dos decisores do USC (Decisores A, B e C), os gastos que foram considerados como variáveis na etapa agrícola (gastos com plantio, tratamento de socaria e irrigação) não são gastos variáveis para uma análise que utiliza a indústria como ponto de vista principal. A última sugestão foi considerar toda a cana processada pela USC como se fosse comprada pelo valor do ATR, da mesma forma como se faz para a cana de acionistas e a cana de fornecedor.

5.2.3 Modificações decorrentes do processo de validação

Com os resultados do cenário preliminar, as sugestões e as observações dos decisores, foi feita uma análise da necessidade de modificação do modelo. A seguir apresentamos a atitude tomada para cada item apresentado na seção anterior.

- I. Para incluir mais uma semana na análise do cenário final foi necessário incluir a semana 23 no índice de t . Conseqüentemente, os parâmetros com variação em t

também tiveram um acréscimo de um dado de entrada, como pode ser observado no Anexo G;

- II. No cenário preliminar, o custo de estocagem foi considerado nulo, para avaliar o funcionamento do modelo. Portanto, no cenário final foi necessário estabelecer valores não nulos para o custo de estocagem dos produtos (h_{pe}), como pode ser observado no Anexo G;
- III. Para penalizar a existência de estoque no último período de análise, foi criado um parâmetro de custo de estoque de entressafra (hs_{pe}). Significa dizer que a função objetivo apresentada anteriormente [equação (55)] fica acrescida de um termo que representa o custo de estocagem dos produtos na entressafra. Este custo foi estimado como sendo dez vezes o custo de estocagem semanal (h_{pe}), dado que o período de estocagem média dos produtos na entressafra é de dez semanas;

Função objetivo anterior [equação (55)]:

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} \right) \right)$$

Nova função objetivo:

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e hs_{pe} \cdot I_{pe}^{sem23} \right) \right) \quad (68)$$

- IV. Para desconsiderar a cana de reforma e a cana de socaria neste nível de análise, foi necessário retirar as fontes de fornecimento de cana $cpropR$, $cpropS$, $carrR$, $carrS$ do índice m e incluir apenas a cana própria ($prop$) e a cana arrendada (arr). Conseqüentemente, os parâmetros com variação em m também tiveram um decréscimo no número de dados de entrada;
- V. Para desconsiderar as “outras fontes” ($cout$) de fornecimento de cana-de-açúcar, foi necessário retirar este tipo de fonte de fornecimento do índice m .

Conseqüentemente, os parâmetros com variação em m tiveram um decréscimo de um dado de entrada, como pode ser observado no Anexo G;

- VI. Para impedir a utilização de cana de fornecedores e de acionistas durante as primeiras e as últimas semanas analisadas, basta modificar o valor de α_t , como mostrado no Anexo G;
- VII. Para considerar o transporte em condomínio, é necessário apenas acrescentar este tipo de fornecedor de serviço de transporte de cana (F_{cond}) e fazer a capacidade de transporte e a disponibilidade de transporte variando no índice f (CT_f e β_{ft}), como pode ser visto no Anexo G;
- VIII. Para separar o tempo aproveitado na indústria (φ_t) e o tempo efetivo disponível de moagem, foi criado um novo parâmetro (γ_t) que representa o tempo efetivo de moagem. Sendo assim, foi necessário modificar as restrições (61) e (64) para incorporar este novo parâmetro, como pode ser visto abaixo;

Restrições anteriores [(61) e (64) respectivamente]:

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \leq M'_t \leq M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100}, \quad t = 1, \dots, T$$

$$M''_{Fprop} \leq \frac{\beta_t}{100} \cdot CT, \quad t = 1, \dots, T$$

Novas restrições:

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \leq M'_t \leq M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100}, \quad t = 1, \dots, T \quad (69)$$

$$M''_{ft} \leq \frac{\beta_{ft}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \cdot CT_f, \quad t = 1, \dots, T \quad (70)$$

- IX. Para considerar as paradas programadas para manutenção, basta utilizar o novo parâmetro γ_t para definir o tempo que se dispõe para o funcionamento da usina. No Anexo G apresentamos estes dados de entrada;
- X. Da mesma forma que o parâmetro γ_t , podemos definir novos dados de entrada para a disponibilidade de transporte da frota (β_t) e, desta forma, considerar a queda de eficiência do transporte próprio nos últimos períodos de safra;
- XI. Nenhuma modificação foi feita para evitar o comportamento ascendente da curva de moagem proposta pelo modelo. Esta observação serve apenas como informação para verificar a adequação do plano de produção encontrado;

- XII. A nova demanda estabelecida para o cenário final procura estabelecer valores próximos aos valores da produção realizada semanalmente ou quinzenalmente pela USC na safra 2004/2005, como pode ser visto no Anexo G;
- XIII. Os dados de produtividade do canavial ($proda_{mp,t}$) do cenário final sofreram modificações, tanto pelo fato de desconsiderarmos a cana de reforma e a cana de socaria neste nível de análise (sugestão IV) quanto por termos tido acesso a dados mais representativos da produtividade do canavial arrendado da USC. Estas modificações estão apresentadas no Anexo G;
- XIV. Nenhuma modificação foi feita para controlar o comportamento da margem de contribuição;
- XV. Para fins de melhoria na análise do comportamento do modelo proposto, foram adicionados os dados de saída sugeridos pelos decisores (margem de contribuição semanal acumulada, receita total da safra, gastos na etapa agrícola, gastos na etapa de CCT, gastos na etapa industrial, gastos com estoque de produtos acabados e eficiência industrial teórica do plano de produção);
- XVI. Esta última sugestão gerou uma modificação um pouco maior no modelo, mais especificamente no cálculo da matriz de custos agrícolas (seção 4.1.3). Para atender a esta sugestão, foi necessário retirar da análise os custos de plantio (cp_t), de tratamento de socaria (cts_t) e de irrigação ($cirr_t$), e também substituir as equações (50) e (51) pela equação (71) e as equações (52) e (53) pela equação (72), como mostrado abaixo.

Equações anteriores [(50), (51), (52) e (53) respectivamente]:

$$C_{cpropR}^n = \frac{cp_t}{proda_{cpropR}^n} + \frac{cir_{cpropR}^n}{proda_{cpropR}^n}, \quad m=cpropR; \quad t = 1, \dots, T$$

$$C_{cpropS}^n = \frac{cts_t}{proda_{cpropS}^n} + \frac{cir_{cpropS}^n}{proda_{cpropS}^n}, \quad m=cpropS; \quad t = 1, \dots, T$$

$$C_{carrR}^n = \frac{cp_t}{proda_{carrR}^n} + \frac{cir_{carrR}^n}{proda_{carrR}^n} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrR}^n}, \quad m=carrR; \quad t = 1, \dots, T$$

$$C_{carrS}^n = \frac{cts_t}{proda_{carrS}^n} + \frac{cir_{carrS}^n}{proda_{carrS}^n} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrS}^n}, \quad m=carrS; \quad t = 1, \dots, T$$

Novas equações:

$$C_{prop}^n = VTC_t + \delta_{prop}^n, \quad m=prop; \quad t = 1, \dots, T \quad (71)$$

$$C_{arr^m}^t = VTC_t + \delta_{arr^m}^t + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrR^m}^t}, \quad m=arr; t = 1, \dots, T \quad (72)$$

Dado que foram necessárias algumas modificações nas equações do modelo SPDL/PU para atender as sugestões dos decisores da USC, apresentamos no Anexo I o modelo completo SPDL/PU2 decorrente das modificações impostas.

5.2.4 Cenário final

Com as modificações mostradas na seção anterior, o modelo SPDL/PU2 passou a ter $T(P \cdot E + F + 2M + 2K) + 1$ variáveis, das quais $K \cdot T$ são binárias, e $T(2M + P \cdot E + P + K + F + 7) + 2$ restrições. De acordo com os índices apresentados para o cenário final ($M=4$, $K=252$, $F=3$, $E=2$, $P=10$, $T=23$), temos um conjunto de 12.306 variáveis, sendo 5.796 binárias e 6902 restrições (Tabela 32).

Tabela 32. Comparação do tamanho do cenário preliminar e do cenário final

Parâmetros	Cenário preliminar (SPDL/PU)	Cenário final (SPDL/PU2)
Fontes de fornecimento de matéria-prima (m)	07	04
Formas de transporte da matéria-prima (f)	02	03
Formas de estocar os produtos finais (e)	02	02
Produtos fabricados (p)	10	10
Processos disponíveis em cada período (k)	252	252
Períodos analisados durante a safra (t)	22	23
Nº de variáveis	11881	12306
Nº de variáveis binárias	5544	5796
Nº de restrições	6690	6902

Resultados do cenário final

Os dados de entrada utilizados no cenário final estão detalhados no Anexo G e os resultados encontrados estão no Anexo H. A seguir, utilizamos a mesma seqüência adotada na apresentação dos resultados do cenário preliminar para apresentar os principais resultados e as observações do cenário final.

Analisando a variação do estoque de produtos acabados durante os períodos de safra (I_{pet}), podemos perceber que só foi necessário utilizar o estoque terceirizado nas semanas 8, 9 e 10, como pode ser visto na Figura 23. Este fato está de acordo com o observado na safra 2004/2005 na USC, onde também foi necessário utilizar o estoque terceirizado para o produto VHP, gerando inclusive uma modificação do processo produtivo por restrição de espaço de estocagem.

Quanto ao estoque no último período de safra, este cenário final apresenta valores muito menores que os valores do cenário preliminar, e também, está de acordo com os resultados da USC, segundo os decisores A e D.

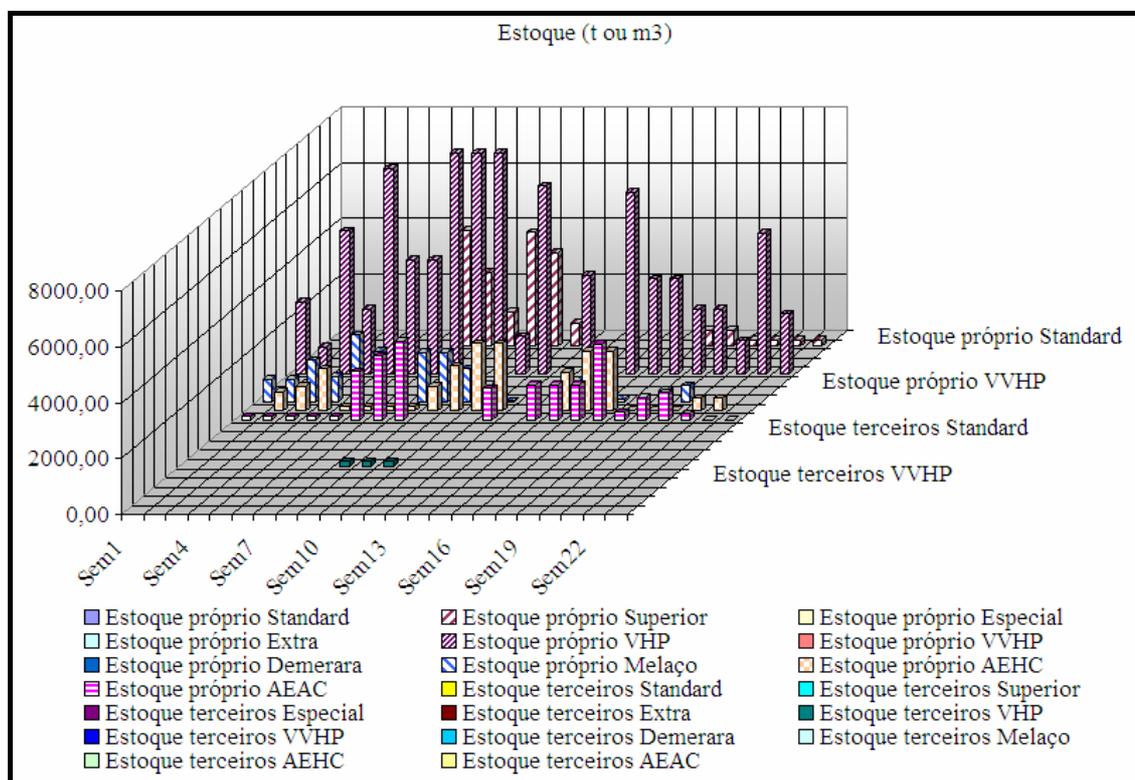


Figura 23. Esquema gráfico da evolução do estoque próprio e terceirizado (cenário final)

Analisando a variável de disponibilidade de cana por período, podemos perceber que toda a cana foi processada durante as 23 semanas que formaram a safra. A Tabela 33 ilustra esta constatação.

Tabela 33. Disponibilidade de cana e moagem por fonte de fornecimento no período 23

Disponibilidade (m,"sem23")		Moagem (m,"sem23")	
Própria	28080 t	Própria	28080 t
Arrendada		Arrendada	
Acionistas		Acionistas	
Fornecedores		Fornecedores	

Analisando o resultado obtido para a variável M'_{mt} , temos que a restrição de quantidade de cana de fornecedores e acionistas foi respeitada. Neste cenário temos toda a colheita destas duas fontes de fornecimento sendo executadas entre as semanas 4 e 20 (Figura 24), fato que corresponde a realidade da USC nas últimas safras (Decisores B e C). Outra observação interessante deste resultado é que a colheita da cana de

acionistas e da cana de fornecedores não está sendo executada simultaneamente e o mesmo ocorre com a cana própria e a cana arrendada.

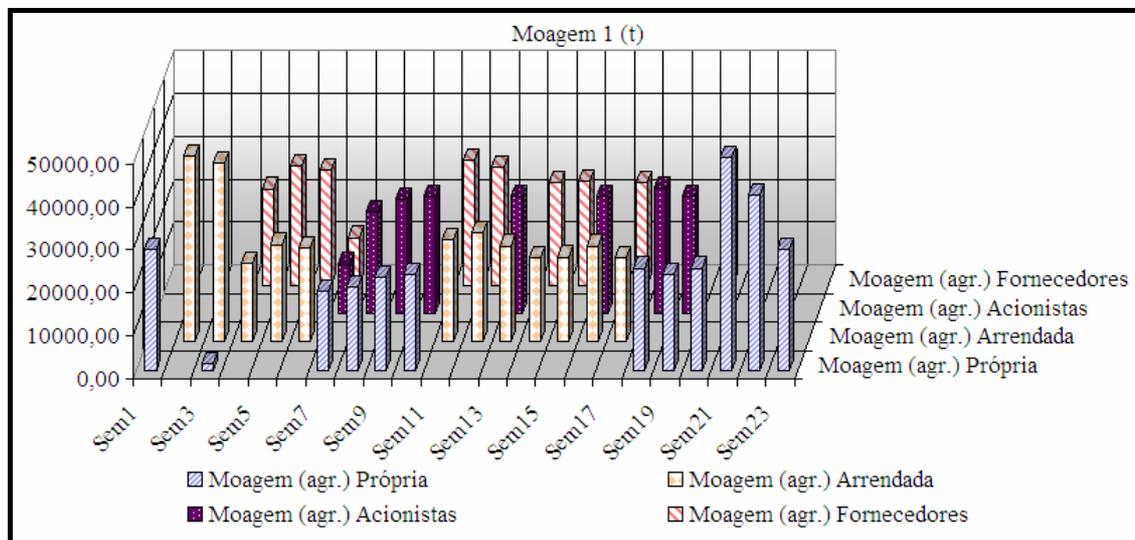


Figura 24. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por fonte de fornecimento (cenário final)

Na análise da variável M''_{ft} , temos que foi necessário utilizar o frete terceirizado, mesmo com a existência da frota do condomínio (Figura 25). Esta constatação também está de acordo com o acontecido na safra 2004/2005 da USC, em que o custo do transporte terceirizado de cana foi considerado um dos maiores gastos da safra (Decisor C).

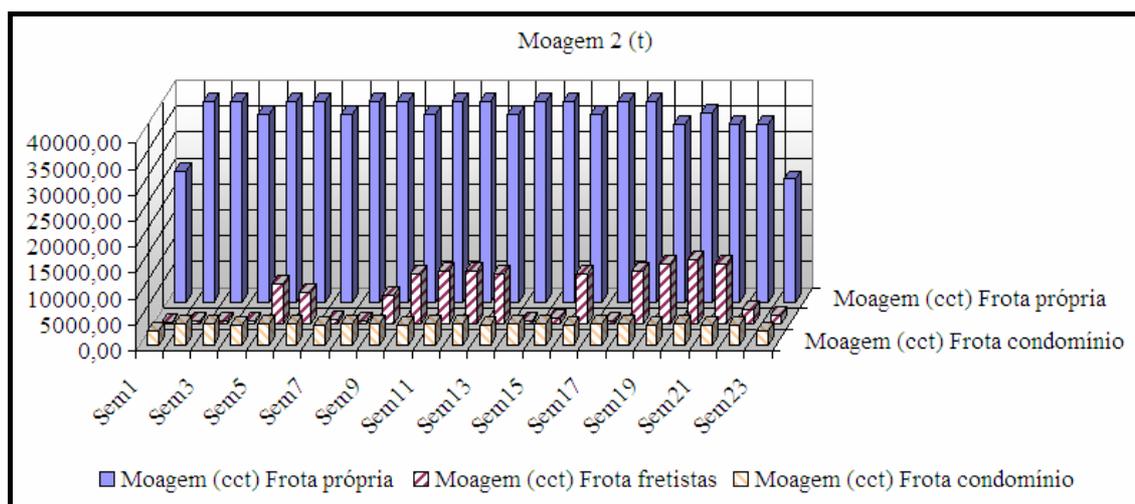


Figura 25. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por serviço de transporte (cenário final)

A Figura 26 apresenta a comparação entre a moagem M_t e os dados de moagem real e moagem planejada da USC para a safra 2004/2005. Nesta comparação podemos perceber que a moagem sugerida pelo modelo teve uma tendência bastante

parecida com a moagem real, tendo um comportamento mais próximo que a moagem planejada pelos decisores da USC.

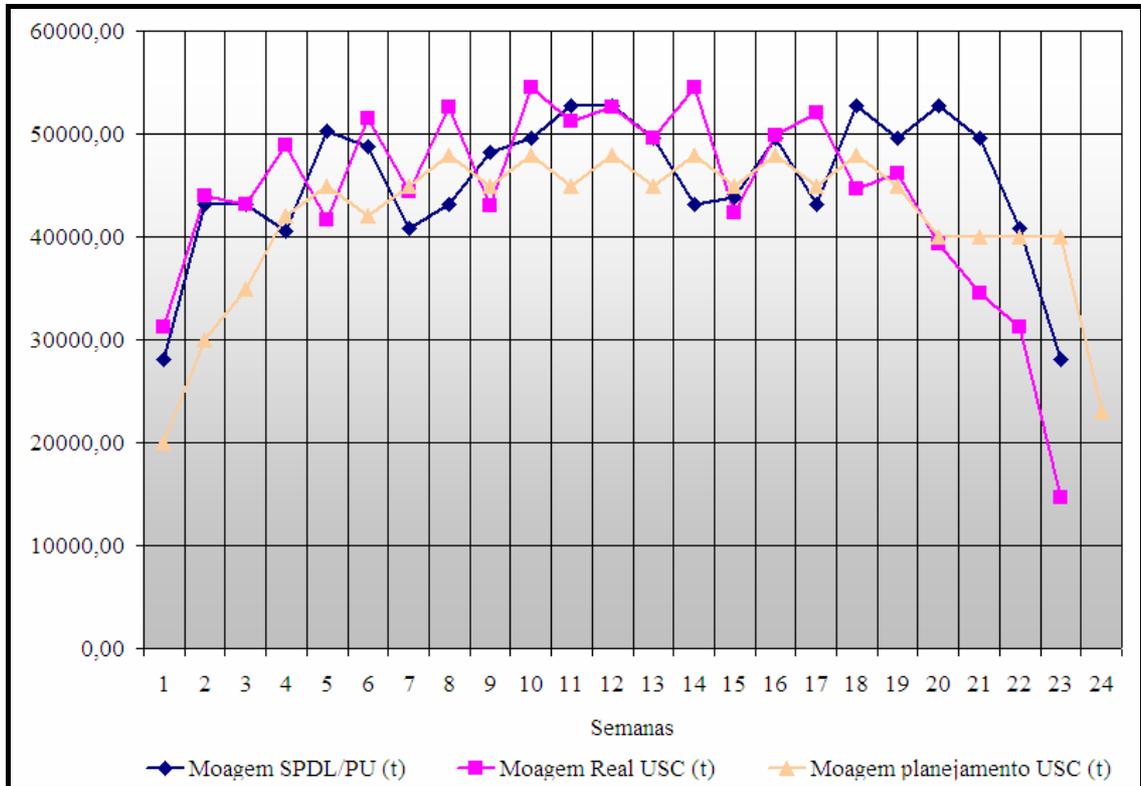


Figura 26. Evolução e comparação da moagem durante a safra (cenário final)

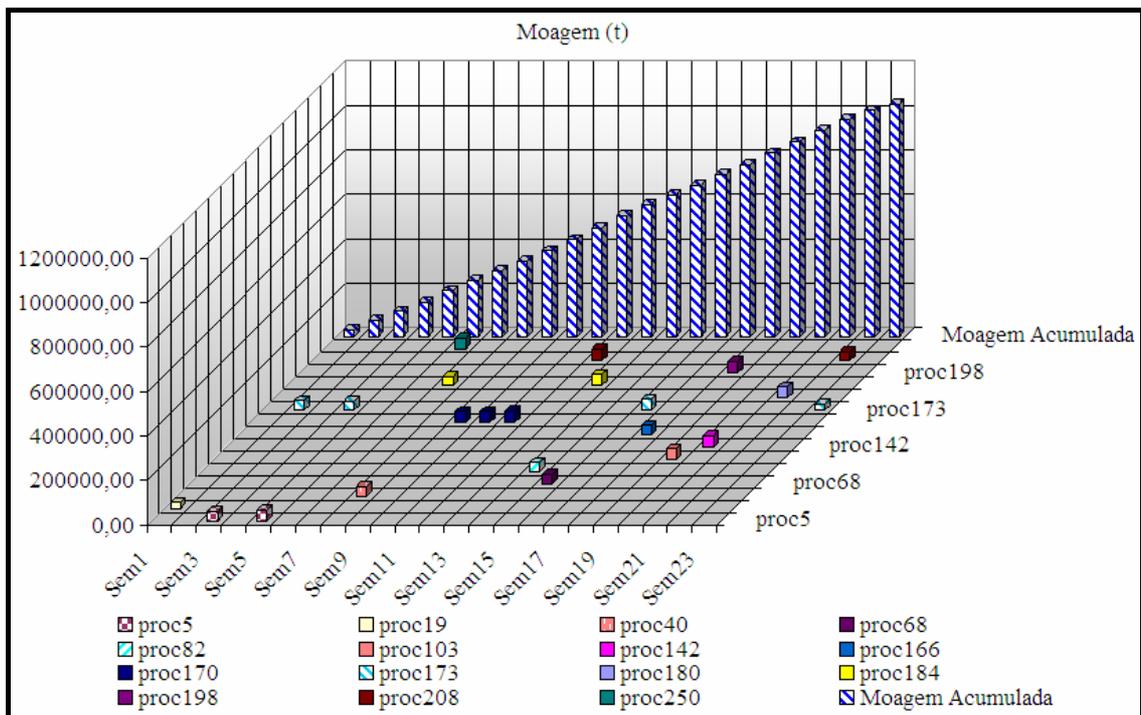


Figura 27. Esquema gráfico do plano de produção (cenário final)

A Figura 27 apresenta o plano de produção encontrado na análise deste cenário final, ilustrando o comportamento da variável de seleção de processos X_{kt} e da moagem acumulada semanalmente. Nesta figura, podemos perceber que foram necessários 15 processos diferentes para atender ao plano de moagem. Percebe-se também que o processo 173 foi o mais utilizado (quatro semanas), seguido pelo processo 170 (três semanas).

Na Figura 28 apresentamos a produção de açúcar, álcool e melação em todas as 23 semanas deste cenário final. Analisando esta figura, percebemos que o plano gerado contempla apenas os produtos estabelecidos na demanda (açúcar VHP, açúcar Superior, melação, AEHC e AEAC). Isto indica que a demanda que foi estabelecida utiliza quase toda a totalidade da capacidade da empresa, não restando capacidade para aproveitar as oportunidades do mercado.

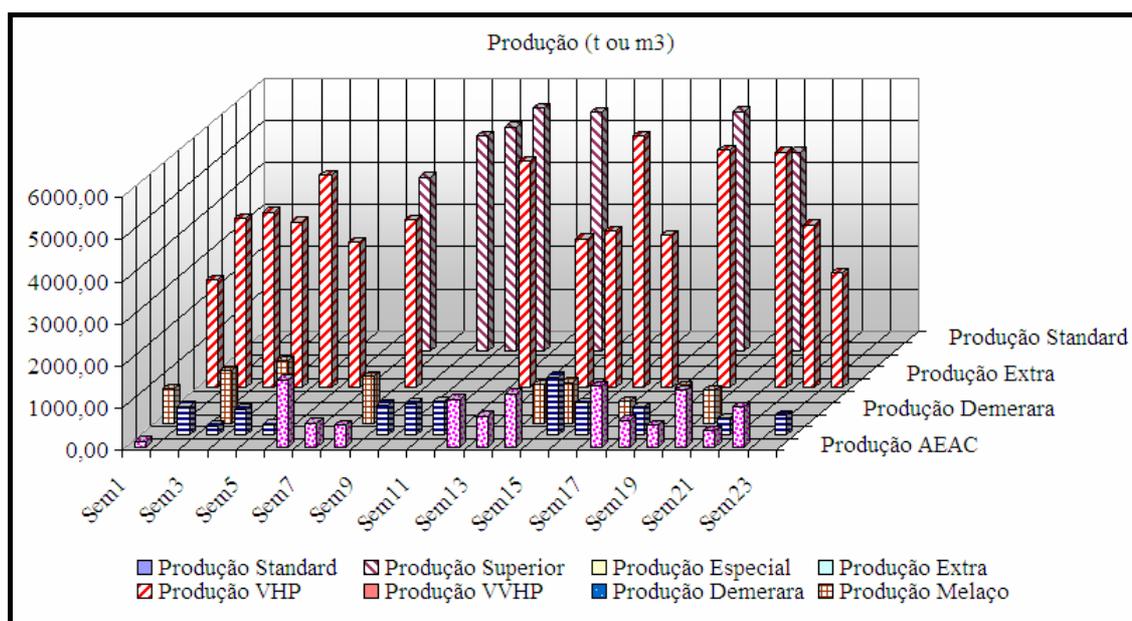


Figura 28. Esquema gráfico de produção (cenário final)

Ao utilizar o modelo SPDL/PU2 para solucionar este cenário final foi estabelecida uma tolerância (ou *gap*) admissível de 0,5%, entre a solução encontrada e o limitante superior da melhor solução inteira possível. Isto se deve à dificuldade encontrada para alcançar a solução comprovadamente ótima (*gap* de 0%). Tentativas de encontrar a solução comprovadamente ótima não obtiveram solução em 12 horas de processamento.

Tendo estabelecido esta tolerância, a margem de contribuição encontrada para este cenário final foi de 10,07 milhões de unidades monetárias. Este valor tem um

gap de 0,33% em relação ao limitante superior da melhor solução inteira possível para este cenário (10,11 milhões de unidades monetárias).

Os resultados apresentados nesta seção foram considerados satisfatórios pelos decisores que participaram do processo de validação (Decisores A, B, C, D e E). Na seção 5.2.5, apresentamos uma comparação entre os resultados deste cenário final e os resultados da USC na safra 2004/2005.

Tempo computacional necessário para solucionar o cenário final

O processamento computacional destes dados teve duração de aproximadamente 2000 segundos (cerca de 33 minutos). O *gap* entre o limitante superior e o valor da solução corrente evoluiu da forma apresentada na Figura 29; ou seja, as primeiras soluções encontradas pelo CPLEX apresentaram resultados com *gap* da ordem de 2,2%, continuando com um avanço rápido até os 200 segundos (*gap* pouco superior a 1,2%) e obtendo uma solução satisfatória (*gap* de 0,33%), com cerca de 2000 segundos de processamento.

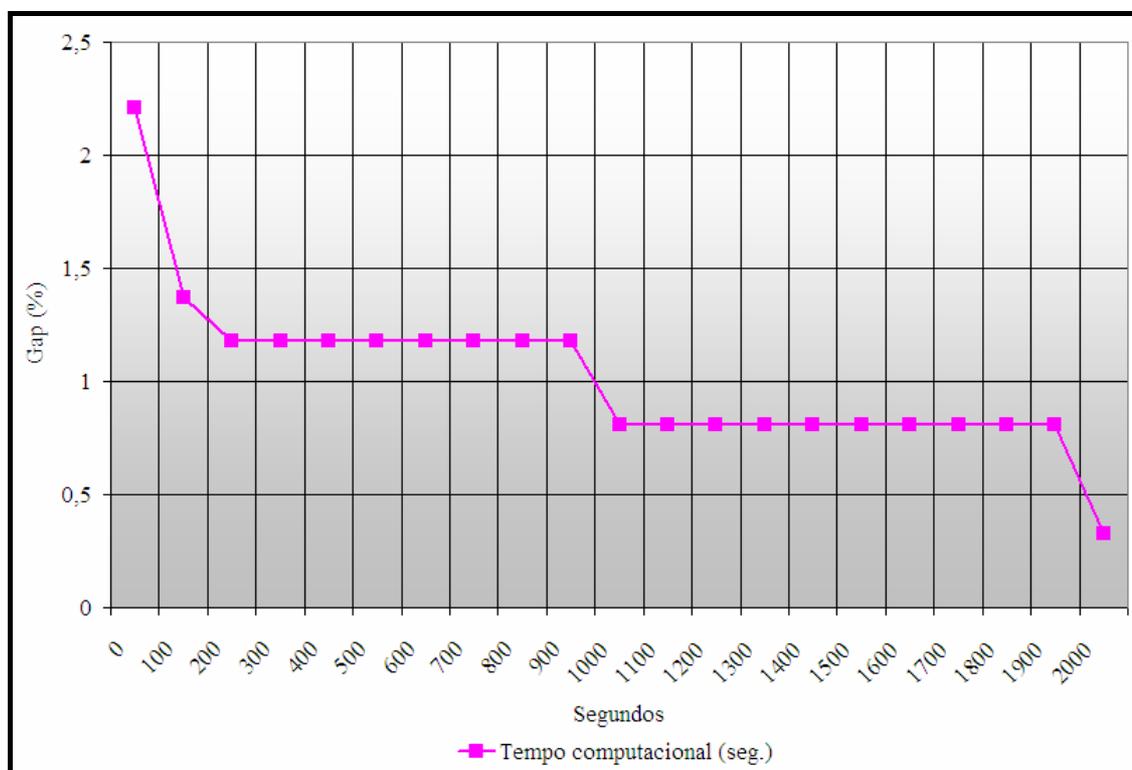


Figura 29. Evolução do *gap* da solução (cenário final)

5.2.5 Comparação entre os resultados do cenário final e os resultados da USC

Para fazer uma comparação adequada dos dados de saída do cenário final e dos dados da USC na safra 2004/2005, coletamos as decisões dos decisores da USC que são equivalentes as variáveis de decisão do modelo SPDL/PU2 (X_{kt} , M_t , M'_{mt} , M''_{ft} , M'''_{kt} , $Disp_{mt}$, I_{pet}) e adotamos os mesmos dados de custos e de receita utilizados no cenário final (Anexo G) para obter os dados sublinhados da Tabela 34. A intenção é analisar a safra da USC como se o conjunto de decisões que foram tomadas durante a safra fosse um dos possíveis resultados do modelo SPDL/PU2.

Na Tabela 34 apresentamos também os dados de produção total de cada produto, tanto para o cenário final (Anexo H) quanto para a USC (Santa Clotilde, 2005). Outro dado interessante de ser observado nesta tabela é o desvio entre os resultados do cenário final e os resultados da USC, apresentados na última coluna. Os dados indicados com as letras maiúsculas e em itálico foram omitidos a pedido da empresa.

Tabela 34. Comparação dos resultados globais [Fonte: Anexo H e Santa Clotilde (2005)]

Resultados		Unidade	(a) Cenário final (SPDL/PU2)	(b) USC safra 2004/2005	[(a-b)/b] Desvio relativo
Produção total	<i>Standard</i>	t			
	Superior	t	36415	36198	0,60%
	Especial	t			
	Extra	t			
	VHP	t	66950	64243	4,21%
	VVHP	t			
	Demerara	t			
	Melaço	t	8625	8627	-0,02%
	AEHC	m ³	7650	7808	-2,02%
	AEAC	m ³	11159	11043	1,05%
ART total nos produtos		kg/t cana	140,63	140,49	0,10%
ART total processado		kg/t cana	155,85	155,85	0,00%
Eficiência industrial final		%	90,23	90,14	0,10%
<u>Receita na safra</u>		u.m	<i>A</i>	<i>B</i>	1,01%
<u>Gastos na etapa agrícola</u>		u.m	<i>C</i>	<i>D</i>	0,14%
<u>Gastos na etapa de CCT</u>		u.m	<i>E</i>	<i>F</i>	-4,45%
<u>Gastos na etapa industrial</u>		u.m	<i>G</i>	<i>H</i>	2,57%
<u>Gastos com estoque na safra</u>		u.m	<i>I</i>	<i>J</i>	-4,83%
<u>Gastos com estoque remanescente</u>		u.m	<i>L</i>	<i>M</i>	0,31%
Margem de Contribuição Total		u.m	10.077.785	9.408.733	7,11%

Analisando os dados de produção da Tabela 34, percebemos que o modelo indica uma preferência pela produção de açúcar em relação à produção de

álcool e melação, principalmente açúcar VHP (desvio de 4,21%); percebemos também que o AEAC teve preferência em comparação ao AEHC. Em relação à eficiência industrial final, o resultado do modelo SPDL/PU2 foi ligeiramente superior ao resultado obtido pela USC (desvio de 0,10%); a proximidade destes resultados indica que o modelo está representando de forma consistente o sistema real.

O principal resultado desta tabela é o valor da margem de contribuição total (função objetivo do modelo). Analisando este dado, podemos perceber que o modelo SPDL/PU2 foi capaz de obter um resultado com margem de contribuição 7,11% superior ao resultado da USC, levando a um potencial acréscimo de 669 mil unidades monetárias durante uma safra.

5.3 Considerações finais

Após o desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, após os resultados obtidos no processo de validação do modelo SPDL/PU2, podemos afirmar que, um modelo deste tipo tem potencial para auxiliar de forma importante no planejamento agregado da produção de uma usina, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises feitas, abrindo portas para uma melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema e propiciando uma melhoria dos resultados da empresa. Dentre as vantagens da utilização deste modelo, podemos destacar as seguintes:

- I. Transformar em rotina as considerações e os fatores relevantes no processo de tomada de decisão, inibindo julgamentos subjetivos, incompletos e parciais;
- II. Colocar cada tipo de decisão em seu nível apropriado;
- III. Corrigir rapidamente os erros de previsão e as considerações que foram estabelecidas ao tratar os dados de entrada;
- IV. Liberar os decisores para atuar melhor em problemas incomuns dentro do dia-a-dia da empresa;
- V. Melhorar o processo de tomada de decisão por meio de técnicas de otimização e por meio da análise de vários cenários;
- VI. Propiciar uma visão mais clara sobre o planejamento e o processo produtivo que foi modelado.

Por outro lado, fica claro que este modelo pode ser melhor integrado com as etapas agrícolas, de CCT e de gestão de distribuição e estoques dos produtos finais

em uma análise integrada do planejamento da colheita, roteirização de veículos do CCT, planejamento industrial e distribuição dos produtos finais. Esta visão de integração das principais etapas do processo de tomada de decisão também é compartilhada por outros pesquisadores (p.ex., Brunstein & Tomiya, 1995).

Pelo que foi observado durante o processo de validação, os decisores da USC entendem que o primeiro passo que deve ser dado na direção desta integração é uma ampliação do modelo SPDL/PU2 para incorporar melhor a etapa de distribuição e comercialização dos produtos finais. Segundo estes gestores, a atual configuração do modelo SPDL/PU2 fornece dados suficientes para um processo de negociação entre a área industrial e a área agrícola (etapas agrícola e de CCT) das usinas e, portanto, a integração destas etapas pode ser feita por meio desta atividade.

A idéia desta negociação seria que a indústria utilizasse o SPDL/PU2 para determinar o plano de safra que maximiza sua margem de contribuição e atende a suas restrições. Este plano gerado seria então apresentado para análise da área agrícola, que, por sua vez, utilizaria os *softwares* e modelos computacionais de planejamento de colheita para apresentar outro plano de safra baseado na maximização da rentabilidade do campo e nas restrições inerentes aos processos da área agrícola. Este processo de negociação entre área agrícola e área industrial continuaria até que o plano de safra convergisse para uma solução que fosse factível e de boa qualidade para ambas as partes.

Na prática, esta negociação acontece em todo início de safra da USC e de grande parte das empresas visitadas. A diferença principal do que acontece atualmente e do que está sendo proposto nesta dissertação é que a área agrícola possui *softwares* comerciais para auxiliar neste processo de planejamento e a área industrial não possui esta facilidade. Para ilustrar o que foi exposto nos últimos parágrafos, apresentamos a Figura 30, que resume estas idéias. Esta figura é uma modificação da Figura 2 e indica a forma de integração das várias etapas envolvidas em um plano de safra totalmente integrado de uma usina de açúcar e álcool.

A principal diferença entre a Figura 2 e a Figura 30 é que a primeira considera o plano de reforma do canavial como um plano de nível tático; já na Figura 30, consideramos que este plano pertence ao nível estratégico e por isso não deve ser incorporado nesta representação. No lugar do plano de reforma do canavial entendemos

que seja mais adequado colocar o plano de comercialização e distribuição de produtos; visto que, segundo os decisores da USC, este é um plano interessante para ser integrado ao plano industrial.

Uma segunda modificação foi a mudança da nomenclatura “*plano de transporte*”, que aparece na Figura 2, para “*plano de CCT*” que aparece na Figura 30. A terceira mudança foi feita apenas para melhorar o entendimento da figura. Na Figura 30, os sistemas de controles técnicos e sistemas de custos gerenciais são apresentados como suporte para todos os planos de nível tático e de nível estratégico; diferentemente da Figura 2, na qual estes sistemas de controle parecem estar subdivididos.

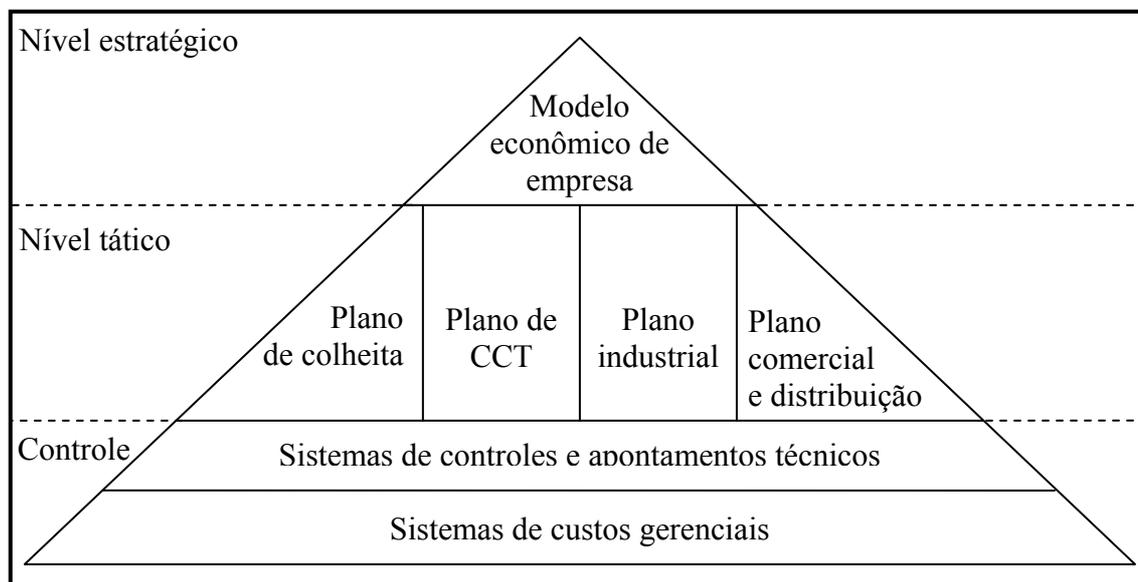


Figura 30. Níveis de planejamento e integração das várias etapas (Fonte: adaptado de Brunstein & Tomiya, 1995)

Quanto ao tempo computacional necessário para solucionar os cenários e a tolerância estabelecida para o valor da função objetivo (*gap* de 0,5%), entendemos que ambos não geram problemas para a utilização prática do modelo proposto nesta dissertação; visto que, temos um nível de análise agregado, com certa incerteza nos parâmetros de entrada e que as decisões são tomadas em períodos semanais. Como discutido na seção 5.1, é interessante utilizar o modelo SPDL/PU2 para efetuar uma análise em *planejamento rolante com horizonte decrescente*, com periodicidade semanal, rodando o modelo após eventual atualização de dados de entrada decorrente dos acontecimentos da semana anterior.

6 CONCLUSÕES

Como apresentado no capítulo 1, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo de planejamento agregado da produção, capaz de apoiar parte das principais decisões envolvidas no PCP de uma usina de açúcar e álcool. Para atingir este objetivo, apresentamos, no capítulo 2, a situação da agroindústria canavieira no Brasil, descrevemos o processo de produção adotado por grande parte das unidades brasileiras, apontamos características gerais do planejamento agregado de safra e expomos uma discussão sobre as estratégias de comercialização e o sistema de PCP das usinas.

Já no capítulo 3, fazemos uma breve revisão teórica dos modelos de programação linear e programação linear inteira mista utilizados para planejamento da produção. Dentre os modelos contemplados nesta revisão, podemos destacar o modelo combinado de seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção como maior contribuição para este trabalho.

No capítulo 4, apresentamos o método de geração de parâmetros que possibilitou o cálculo da matriz de rendimentos, o cálculo da matriz de custos industriais e o cálculo da matriz de custos agrícolas. Em seguida, apresentamos o desenvolvimento do modelo de otimização proposto neste trabalho (SPDL/PU).

No capítulo 5, demonstramos os resultados de uma aplicação com o exemplo ilustrativo, apresentamos a forma como os dados do estudo de caso foram colhidos e iniciamos o processo de validação junto com os decisores da USC. Após esse esforço de validação, apresentamos um segundo modelo (SPDL/PU2), decorrente de pequenas modificações do modelo SPDL/PU. Os resultados do SPDL/PU2, utilizando os dados do cenário final, indicam que o modelo é capaz de gerar um plano de safra mais eficaz que o plano gerado pelo corpo técnico da USC.

Ao final de todo o desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, ao final do processo de validação do modelo SPDL/PU2, torna-se possível afirmar que um modelo deste tipo tem potencial para apoiar as decisões do planejamento agregado da produção de uma usina de açúcar e álcool, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises feitas, abrindo portas para uma melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema e propiciando uma melhoria dos resultados da empresa.

Além destes benefícios, podemos destacar a sistematização do planejamento e a possibilidade de integração da etapa industrial com a etapa agrícola, a etapa de CCT e a etapa de comercialização e distribuição como grandes benefícios que este modelo pode trazer para o planejamento agregado de safra de uma usina de açúcar e álcool.

6.1 Perspectivas para pesquisas futuras

Os resultados encontrados são promissores e encorajam pesquisas futuras no sentido de melhorar o desempenho do modelo proposto. A seguir, apresentamos um conjunto de sugestões provenientes do contato com os decisores durante o processo de validação. O principal intuito destas sugestões é melhorar ainda mais a adequação do modelo com a realidade de uma usina.

- I. Incorporação do bagaço e da geração de energia elétrica como produtos de uma usina de açúcar e álcool;
- II. Considerar no modelo os 12 meses de safra e entressafra, mesmo sabendo que na entressafra não existe produção nas usinas;
- III. Ampliar o modelo proposto para um modelo que considere o planejamento de safra de um grupo de usinas;
- IV. Detalhar a qualidade da cana para cada tipo de fornecedor de matéria-prima;
- V. Considerar o custo de *setup* dos processos; o tempo de *setup* poderia continuar sendo desconsiderado;
- VI. Desenvolver e/ou apresentar uma metodologia para a coleta, análise e utilização dos dados de custos necessários para rodar um modelo deste tipo em situações reais;
- VII. Incorporar o melaço externo e o bagaço externo como possíveis matérias-primas do processo de produção de álcool e de energia, respectivamente;
- VIII. Integrar o modelo proposto com a etapa de comercialização e distribuição de açúcar e álcool.

Outras perspectivas de pesquisas futuras estão relacionadas com a incorporação de outras técnicas de modelagem e da verificação prática da utilização deste tipo de modelo, tais como:

- I. Análise de incertezas por meio de técnicas de restrição de chance (*chance constraint*);
- II. Análise de incertezas por meio de técnicas de otimização robusta;
- III. Considerar mais de um objetivo, utilizando o *goal programming*;
- IV. Utilização da metodologia de pesquisa participativa para analisar as vantagens e desvantagens da utilização deste modelo.

REFERÊNCIAS

- ABEL, D. J.; STARK, K. P.; MURRY, C. R. & DEMOULIN, Y. M. A routing and scheduling problem for rail system: A case study. **Journal of the Operational Research Society**, v.32, p.767-774, 1981.
- ALEGRE, R. M.; RIGO, M. & JOEKES, I. Ethanol fermentation of a diluted molasses medium by *saccharomyces cerevisiae* immobilized on chrysotile. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.46, n.4, p.751-757, dezembro de 2003.
- ALVES, D. M. G. Fatores que afetam a formação de ácidos orgânicos bem como outros parâmetros da fermentação alcoólica. Piracicaba, 1994. 251 p. **Dissertação** (Mestrado) – ESALQ/USP.
- ARAÚJO, S. A. Modelos e métodos para planejamento e programação da produção aplicados ao setor de fundições. São Carlos, 2003. 125 p. **Tese** (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – ICMC/USP.
- ARAÚJO, S. A.; ARENALES, M. N. & CLARK, A. R. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição de pequeno porte. **Gestão & Produção**, v.11, n.2, p.165-176, 2004.
- ASKIN, R. & STANDRIDGE, C. **Modeling and analysis of manufacturing systems**. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- AZEVEDO, P. F. de. **Comercialização de produtos agroindustriais**. In: BATALHA, M. O. *Gestão agroindustrial – Volume I*. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2001.
- BARATA, M. Q. F. Otimização econômica do corte e reforma de canaviais. Piracicaba, 1992. 173 p. **Dissertação** (Mestrado) – ESALQ/USP.
- 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. (Organizadores): *Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.
- BERTRAND, J. W. M. & FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, p.241-264, 2002.
- BERTSIMAS, D. & SIM, M. Robust discrete optimization and network flows. **Mathematical Programming Series B**, v.98, n.1-3, p.49-71, setembro de 2003a.
- BERTSIMAS, D. & SIM, M. A robust optimization approach to supply chain management. **Relatório Técnico**, Operations Research Center, MIT, 2003b.
- BERTSIMAS, D. & SIM, M. The price of robustness. **Operations Research**, v.52, n.1, p.35-53, janeiro/fevereiro de 2004.
- BERTSIMAS, D.; PACHAMANOVA, D. & SIM, M. Robust linear optimization under general norms. **Operations Research Letters**, v.32, n.6, p.510-516, novembro de 2004.
- BIRGE, J. R. & LOUVEAUX, F. **Introduction to Stochastic Programming**. New York: Springer, 1997.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D. & MEERAUS, A. **GAMS: Sistema geral de modelagem algébrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

BRÜGGEMANN, W. & JAHNKE, H. The discrete lot-sizing and scheduling problem: Complexity and modification for batch availability. **European Journal of Operational Research**, v.124, n.3, p.511-528, agosto de 2000.

BRUNSTEIN, I. & TOMIYA, E. H. Modelo econômico de empresa sucroalcooleira. **Gestão & Produção**, v.2, n.3, p.264-280, dezembro de 1995.

BURNQUIST, H. L.; BACCHI, M. R. P. & MARJOTTA-MAISTRO, M. C. **Análise da comercialização dos produtos do setor sucroalcooleiro brasileiro: Evolução, contexto institucional e desempenho**. In: MORAES, M. A. F. D. de & SHIKIDA, P. F. A. (Organizadores): *Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.

CASTRO, S. B. de; ANDRADE, G. T. C. & ALBUQUERQUE, F. M. Engenharia e processamento do açúcar. **Apostila de treinamento e consultoria**, disponível na Usina Santa Clotilde, 2002.

COCK, J. H.; LUNA, C. A. & PALMA, A. The trade-off between total harvestable production and concentration of the economically useful yield component: cane tonnage and sugar content. **Field Crops Research**, v.67, n.3, p.257-262, 2000.

COGEN (Associação Paulista de Cogeração de Energia). **Inserção da bioeletricidade na matriz energética**. Disponível em: <http://www.cogensp.com.br/cogensp/publica.asp?id_tipo_doc=10>. Acesso em: 18 de novembro de 2005.

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.

CONSECANA-AL (Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool de Alagoas). **Sistema de remuneração da tonelada de cana-de-açúcar com base no açúcar total recuperável (ATR) para o estado de Alagoas**. Disponível em: <<http://www.sindicucar-al.com.br/docs/consecanaAL/cartilhaconsecanaal.swf>>. Acesso em: 16 de agosto de 2005.

CONSECANA-SP (Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool de São Paulo). **Manual de instruções Consecana-SP: Regulamento & Normas operacionais**. 4ª ed. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/pages/consecana.asp>>. Acesso em: 16 de agosto de 2005.

CONTADOR, J. C. & CONTADOR, J. L. **Programação e controle da produção para a indústria intermitente**. In: CONTADOR, J. C. (Coordenador): *Gestão de operações*. São Paulo: Blucher, 1997.

CORRÊA, H. & GIANESI, I. **Sistemas de planejamento e controle da produção**. In: CONTADOR, J. C. (Coordenador): *Gestão de operações*. São Paulo: Blucher, 1997.

DIWEKAR, U. Optimization under uncertainty. **SIAG/OPT Views-and-News**, v.13, n.1, p.1-8, março de 2002.

DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling – survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v.99, n.2, p.221-235, junho de 1997.

EID, F. Progresso técnico na agroindústria sucroalcooleira. **Informações Econômicas**, São Paulo, v.26, n.5, p.29-36, maio de 1996.

- EID, F.; CHAN, K. & PINTO S. da S. Mudanças tecnológicas na indústria sucroalcooleira: Avanços e retrocessos? **RECITEC**, Recife, v.2, n.1, p.36-47, 1998.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. Piracicaba: EME:STAB, 2003.
- FERNANDES, F. & MORABITO, R. Linguagens de modelagem GAMS e LINGO: Aplicação a um problema de balanceamento de linha de montagem. **Cadernos de Engenharia de Produção DEP/UFSCar**, São Carlos, n.20, p.8-29, 1993.
- GOLDBARG, M. C. & LUNA, H. P. L. **Otimização combinatorial e programação linear: Modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- GRISOTTO, M. E. Otimização do transporte de cana-de-açúcar por caminhões. Campinas, 1995. **Dissertação** (Mestrado em Matemática Aplicada) – IMECC/UNICAMP.
- HAX, A. C. & CANDEA, D. **Production and inventory management**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.
- HERROELEN, W & LEUS, R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. **European Journal of Operational Research**, v.165, n.2, p.289-306, setembro de 2005.
- HIGGINS, A. Scheduling of road vehicles in sugar transport: A case study at an Australian sugar mill. **European Journal of Operational Research**, v.170, n.3, p.987-1000, 2006.
- HIGGINS, A. J.; ANTONY, G; DAVIES, I.; SANDELL, G.; PRESTWIDGE, D. & ANDREW B. A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems**, v.82, n.2, p.99-115, 2004.
- HIGGINS, A. J. & DAVIES, I. A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.47, n.2, p.85-102, 2005.
- HIGGINS, A. J.; MUCHOW, R. C.; RUDD, A. V. & FORD, A. W. Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. **Field Crops Research**, v.57, n.2, p.153-162, 1998.
- HILLIER, F. S. & LIEBERMAN, J. G. **Introduction to Operations Research**. 6ª ed. New York: McGRAW-HILL international Editions, 1995.
- HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. v.I e II. São Paulo: Mestre Jou, 1977.
- IANNONI, A. P. & MORABITO, R. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v.42, n.3, p.191-210, 2006.
- ICIDCA (Instituto Cubano de Pesquisa dos Derivados da Cana-de-Açúcar). **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**. Brasília: ABIPTI, 1999.
- ILOG. **Product datasheet: ILOG CPLEX**. Disponível em: <<http://cplex.ilog.com>>. Acesso em: 30 de novembro de 2005.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) **Valor FOB das exportações por setor: Açúcar**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 30 de junho de 2005a.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) **Índice de rentabilidade das exportações por setor: Açúcar**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 30 de junho de 2005b.

JOHNSON, L. & MONTGOMERY, D. **Operations research in production, planning, scheduling and inventory control**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

JOSHI, R. R. A new approach to stochastic programming problems: Discrete model. **European Journal of Operational Research**, v.83, n.3, p.514-529, junho de 1995.

KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T. & WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms. **Omega – the International Journal of Management Science**, v.31, n.5, p.365-378, outubro de 2003.

KATO, E. R. R.; TANAKA, J. T.; MIRANDA JR., J. L. & PORTO, A. J. V. A Simulação no apoio da implantação de instrumentação e automação no setor de álcool e açúcar. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 17. (CD-ROM) Gramado/Canela, RS. **Anais**. Outubro de 1997.

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**, Submetido à publicação, 2005.

LAW, A. M. & KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 2^a ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LEE, K. S.; CHIN, I.; LEE, H. J. & LEE, J. H. Model predictive control technique combined with iterative learning for batch processes. **AIChE Journal**, v.45, n.10, p.2175-2187, outubro de 1999.

LIMA, J. P. L. & SICSÚ, A. B. Revisando o setor sucroalcooleiro do nordeste: O novo contexto e a reestruturação possível. **Estudos Infosucro**, n.4, outubro de 2001.

LOPES, M. B. Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar. Piracicaba, 1995. 143 p. **Dissertação** (Mestrado) – ESALQ/USP.

LOUREIRO, O. **Açúcar: Notas e comentários**. Maceió, 1970.

LUCHE, J. R. D. Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: Um estudo de caso. São Carlos, 2003. 75 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.

LUCHE, J. R. D. & MORABITO, R. Otimização na programação da produção de grãos eletrofundidos: Um estudo de caso. **Gestão & Produção**, v.12, n.1, p.135-149, janeiro/abril de 2005.

MacCARTHY, B. L. & FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production system for the design and selection of production planning and control systems. **Production Planning & Control**, v.11, n.5, p.481-496, 2000.

MATHEW, J. & RAJENDRAN, C. Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. **Computers in Industry**, v.21, n.3, p.331-334, abril de 1993.

- MEDEIROS, F. Processo de fabricação de açúcar. **Apostila de treinamento e consultoria**, disponível na Usina Santa Clotilde, 2005.
- MILAN, E. L.; FERNANDEZ, S. M. & ARAGONES, L. M. P. Sugar cane transportation in Cuba: A case study. **European Journal of Operational Research**, Aceito para publicação, 2005.
- MORABITO, R. & ARENALES, M. Um exame dos problemas de corte e empacotamento. **Pesquisa Operacional**, v.12, n.1, p.1-20, 1992.
- MORAES, M. A. F. D. **Desregulamentação da agroindústria canavieira: Novas formas de atuação do estado e desafios do setor privado**. In: MORAES, M. A. F. D. de & SHIKIDA, P. F. A. (Organizadores): Agroindústria canavieira no Brasil: Evolução, desenvolvimento e desafios. São Paulo: Atlas, 2002.
- MUNHOZ, J. R. Um modelo baseado em programação linear e programação de metas para análise de um sistema de produção e distribuição de suco concentrado congelado de laranja. São Carlos, 2000. 214 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.
- MUNHOZ, J. R. & MORABITO, R. Um modelo baseado em programação linear e programação de metas para análise de um sistema de produção e distribuição de suco concentrado congelado de laranja. **Gestão & Produção**, v.8, n.2, p.139-159, 2001.
- NAHMIAS, S. **Production and operations analysis**. Hoewood: Irwin, 1995.
- ORPLANA (Organização dos Plantadores de Cana da Região Centro-Sul do Brasil) **Número de unidades industriais**. Disponível em: <<http://www.orplana.com.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 25 de abril de 2005.
- PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel:STAB, 1989.
- RAVINDRA, A.; PHILLIPS, D. T. & SOLBERG, J. J. **Operations research – principles and practice**. New York: John Wiley & Sons, 1987.
- RODRIGUES, L. G. S. Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar. Ilha Solteira, 2005. 122 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UNESP.
- SAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. **Computers and Chemical Engineering**, v.28, n.6-7, p.971-983, junho de 2004.
- SANTA CLOTILDE. **Relatório geral – safra 2004/2005**. Relatório interno disponível na Usina Santa Clotilde, 2005.
- SANTA ELISA. **Fluxo esquemático para fabricação de produtos derivados da cana-de-açúcar**. Cortesia da Companhia Energética Santa Elisa, disponível na Usina Santa Clotilde, 2005.
- SECEX (Secretaria de Comércio Exterior) **Anuário estatístico do setor industrial**. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/publicacoes/desProducao/anu_Estatistico.php>. Acesso em: 25 de abril de 2005.
- SEN, S.; HINGLE, J. L. An introductory tutorial on stochastic linear programming models. **Interfaces**, v.29, n.2, p.33-61, março/abril de 1999.

SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas) **Histórico de produção de açúcar, álcool e cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.sindacucar-al.com.br/estatisticas.htm>>. Acesso em: 30 de junho de 2005.

SLACK, N.; CHAMBERS, S. & JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2ª Ed. São Paulo: Atlas, 2002

SPERANDIO, O. Uma contribuição à contabilidade de custos de produtos de origem canavieira. São Paulo, 1990. 193 p. **Dissertação** (Mestrado em Contabilidade e Atuária) – FEA/USP.

SPROESSER, R. L. **Gestão estratégica do comércio varejista de alimentos**. In: BATALHA, M. O. **Gestão Agroindustrial – Volume I**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2001.

STAGGEMEIER, A. T., CLARK, J. K. A survey of lot-sizing and scheduling models. In: Simpósio anual da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, 23. Campos do Jordão, SP. **Anais**. Novembro de 2001.

SZMRECSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1920-1975)**. Campinas: Hucitec, 1979.

TAHA, H. A. **Operations research: An introduction**. New York: McMillan, 1976.

TOSO, E. A. V. Otimização do problema integrado de dimensionamento e sequenciamento de lotes: Estudo de caso na indústria de rações. São Carlos, 2003. 133 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.

TOSO, E. A. V. & MORABITO, R. Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: Estudo de caso numa fábrica de rações. **Gestão & Produção**, v.12, n.2, 2005.

UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo) **Informação UNICA**. Ano 6, n.51, janeiro/fevereiro de 2003. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/files/informacaounica/unica51.pdf>>. Acesso em: 20 de abril 2005a.

UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo) **Maiores exportadores de açúcar - 93/01; Mercado mundial de álcool**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/pages/estatisticas.asp#>>. Acesso em: 21 de abril 2005b.

UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo) **Do engenho às centrais energéticas: Evolução e perspectivas do setor produtivo de açúcar e etanol**. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/files/publicacoes/publicacoes2333.pdf>>. Acesso em: 18 de novembro de 2005c.

VIAN, C. E. de F. **Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização**. Campinas: Átomo, 2003.

WAACK, R. S.; NEVES, M. F. & MORAES, S. Grupamentos estratégicos nas usinas de açúcar e álcool. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 36. Poços de Caldas, MG. **Anais**. 1998.

WHAN, B. M.; SCOTT, C. H. & JEFFERSON, T. R. Scheduling sugar cane plant and ratoon crops and a fallow – a constrained markov model. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.21, n.3, p.281-289, setembro de 1976.

WILLIAMS, H. P. **Model building in mathematical programming**. New York: John Wiley & Sons, 1978.

WINSTON, W. **Operations research: Applications and algorithms**. Boston: PWS-Kent, 1991.

WISSEN, M. E. van; SMEETS, J. F. C.; MULLER, A.; VERHEIJEN, P. J. T. Discrete event modeling and dynamic optimization of a sugar plant. **Relatório Técnico**, Delft University of Technology, 2005.

YAMADA, M. C. Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira visando à aplicação em estudos de simulação. São Carlos, 1999. 164 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica) – EESC/ USP.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; MUSCAT, A. R. N.; BIAZZI, J. L. Decentralizing ethanol distribution in southeastern Brazil. **Interfaces**, v.26, n.6, p.24-34, 1996.

APÊNDICE A – Lista de processos utilizados no estudo de caso

Neste apêndice apresentamos a lista de processos utilizados no estudo de caso da USC, bem como a descrição dos parâmetros que compõem cada processo.

Para melhor compreensão da Tabela 35 iniciaremos com uma explicação da simbologia utilizada para representar cada processo, ficando a cargo do leitor a análise da tabela e determinação das características de cada processo. As unidades de cada parâmetro estão indicadas entre parênteses, ao lado do símbolo correspondente.

(a) Dados constantes independentemente do processo que está sendo analisado:

R^{AEHC} Rendimento estequiométrico de álcool hidratado;

R^{AEAC} Rendimento estequiométrico de álcool anidro;

BMF Brix do mel final adotado como padrão nos processos da USC;

$PzaM$ Pureza do mel final adotada como meta nos processos da USC.

(b) Características técnicas de cada processo:

TS_k Índice unitarizado que determina quanto do caldo misto será destinado para a fabricação de açúcar (TS_k), e, conseqüentemente, quanto ($1-TS_k$) será destinado diretamente para a destilaria;

TM_k Índice unitarizado que determina quanto do melaço será destinado para a destilaria (TM_k), e, conseqüentemente, quanto ($1-TM_k$) será utilizado para cobrir as demandas de melaço no mercado;

Pol_k Índice percentual que determina o teor de sacarose existente em um determinado tipo de açúcar (característica dos açúcares na Tabela 62);

$Umid_k$ Índice percentual que determina a umidade de um determinado tipo de açúcar (característica dos açúcares na Tabela 62);

$MSP_{ps,k}$ Matriz auxiliar para determinar o açúcar que está sendo produzido pelo processo k . Este parâmetro não é apresentado na Tabela 35;

$MAP_{pa,k}$ Índice unitarizado que determina a quantia de mosto que será destilada para a produção de AEHC e de AEAC.

(c) Exemplo do processo 26 (*Proc26*): 90% do caldo misto está sendo utilizado para a fabricação de açúcar tipo VHP, 67% do melaço produzido está sendo destinado ao mercado, e 10% do caldo misto e 33% do melaço estão sendo utilizados como matéria-prima para a produção de álcool tipo AEHC.

Tabela 35. Lista de processos

Constantes	R_{AEHC} (l/100kgART)	R_{AEAC} (l/100kgART)	BMF	PzaM		
	67,87	65,03	85%	40%		
Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS _k (Unit)	TM _k (Unit)	Pol _k (%)	Umid _k (%)	MAP _{k,pa} (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc1	1	0,33	99,3	0	1	
Proc2	1	0,33	99,5	0	1	
Proc3	1	0,33	99,7	0	1	
Proc4	1	0,33	99,8	0	1	
Proc5	1	0,33	99,3	0,1	1	
Proc6	1	0,33	99,6	0,1	1	
Proc7	1	0,33	98,8	0,2	1	
Proc8	1	0,33	99,3	0	0,5	0,5
Proc9	1	0,33	99,5	0	0,5	0,5
Proc10	1	0,33	99,7	0	0,5	0,5
Proc11	1	0,33	99,8	0	0,5	0,5
Proc12	1	0,33	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc13	1	0,33	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc14	1	0,33	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc15	1	0,33	99,3	0		1
Proc16	1	0,33	99,5	0		1
Proc17	1	0,33	99,7	0		1
Proc18	1	0,33	99,8	0		1
Proc19	1	0,33	99,3	0,1		1
Proc20	1	0,33	99,6	0,1		1
Proc21	1	0,33	98,8	0,2		1
Proc22	0,9	0,33	99,3	0	1	
Proc23	0,9	0,33	99,5	0	1	
Proc24	0,9	0,33	99,7	0	1	
Proc25	0,9	0,33	99,8	0	1	
Proc26	0,9	0,33	99,3	0,1	1	
Proc27	0,9	0,33	99,6	0,1	1	
Proc28	0,9	0,33	98,8	0,2	1	
Proc29	0,9	0,33	99,3	0	0,5	0,5
Proc30	0,9	0,33	99,5	0	0,5	0,5
Proc31	0,9	0,33	99,7	0	0,5	0,5
Proc32	0,9	0,33	99,8	0	0,5	0,5
Proc33	0,9	0,33	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc34	0,9	0,33	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc35	0,9	0,33	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc36	0,9	0,33	99,3	0		1
Proc37	0,9	0,33	99,5	0		1
Proc38	0,9	0,33	99,7	0		1
Proc39	0,9	0,33	99,8	0		1
Proc40	0,9	0,33	99,3	0,1		1
Proc41	0,9	0,33	99,6	0,1		1
Proc42	0,9	0,33	98,8	0,2		1

Processo (cont.)	Características técnicas de cada processo					
	TS _k (Unit)	TM _k (Unit)	Pol _k (%)	Umid _k (%)	MEP _k (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc43	0,8	0,33	99,3	0	1	
Proc44	0,8	0,33	99,5	0	1	
Proc45	0,8	0,33	99,7	0	1	
Proc46	0,8	0,33	99,8	0	1	
Proc47	0,8	0,33	99,3	0,1	1	
Proc48	0,8	0,33	99,6	0,1	1	
Proc49	0,8	0,33	98,8	0,2	1	
Proc50	0,8	0,33	99,3	0	0,5	0,5
Proc51	0,8	0,33	99,5	0	0,5	0,5
Proc52	0,8	0,33	99,7	0	0,5	0,5
Proc53	0,8	0,33	99,8	0	0,5	0,5
Proc54	0,8	0,33	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc55	0,8	0,33	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc56	0,8	0,33	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc57	0,8	0,33	99,3	0		1
Proc58	0,8	0,33	99,5	0		1
Proc59	0,8	0,33	99,7	0		1
Proc60	0,8	0,33	99,8	0		1
Proc61	0,8	0,33	99,3	0,1		1
Proc62	0,8	0,33	99,6	0,1		1
Proc63	0,8	0,33	98,8	0,2		1
Proc64	0,7	0,33	99,3	0	1	
Proc65	0,7	0,33	99,5	0	1	
Proc66	0,7	0,33	99,7	0	1	
Proc67	0,7	0,33	99,8	0	1	
Proc68	0,7	0,33	99,3	0,1	1	
Proc69	0,7	0,33	99,6	0,1	1	
Proc70	0,7	0,33	98,8	0,2	1	
Proc71	0,7	0,33	99,3	0	0,5	0,5
Proc72	0,7	0,33	99,5	0	0,5	0,5
Proc73	0,7	0,33	99,7	0	0,5	0,5
Proc74	0,7	0,33	99,8	0	0,5	0,5
Proc75	0,7	0,33	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc76	0,7	0,33	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc77	0,7	0,33	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc78	0,7	0,33	99,3	0		1
Proc79	0,7	0,33	99,5	0		1
Proc80	0,7	0,33	99,7	0		1
Proc81	0,7	0,33	99,8	0		1
Proc82	0,7	0,33	99,3	0,1		1
Proc83	0,7	0,33	99,6	0,1		1
Proc84	0,7	0,33	98,8	0,2		1
Proc85	1	0,66	99,3	0	1	
Proc86	1	0,66	99,5	0	1	
Proc87	1	0,66	99,7	0	1	
Proc88	1	0,66	99,8	0	1	

Processo (cont.)	Características técnicas de cada processo					
	TS _k (Unit)	TM _k (Unit)	Pol _k (%)	Umid _k (%)	MEP _k (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc89	1	0,66	99,3	0,1	1	
Proc90	1	0,66	99,6	0,1	1	
Proc91	1	0,66	98,8	0,2	1	
Proc92	1	0,66	99,3	0	0,5	0,5
Proc93	1	0,66	99,5	0	0,5	0,5
Proc94	1	0,66	99,7	0	0,5	0,5
Proc95	1	0,66	99,8	0	0,5	0,5
Proc96	1	0,66	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc97	1	0,66	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc98	1	0,66	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc99	1	0,66	99,3	0		1
Proc100	1	0,66	99,5	0		1
Proc101	1	0,66	99,7	0		1
Proc102	1	0,66	99,8	0		1
Proc103	1	0,66	99,3	0,1		1
Proc104	1	0,66	99,6	0,1		1
Proc105	1	0,66	98,8	0,2		1
Proc106	0,9	0,66	99,3	0	1	
Proc107	0,9	0,66	99,5	0	1	
Proc108	0,9	0,66	99,7	0	1	
Proc109	0,9	0,66	99,8	0	1	
Proc110	0,9	0,66	99,3	0,1	1	
Proc111	0,9	0,66	99,6	0,1	1	
Proc112	0,9	0,66	98,8	0,2	1	
Proc113	0,9	0,66	99,3	0	0,5	0,5
Proc114	0,9	0,66	99,5	0	0,5	0,5
Proc115	0,9	0,66	99,7	0	0,5	0,5
Proc116	0,9	0,66	99,8	0	0,5	0,5
Proc117	0,9	0,66	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc118	0,9	0,66	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc119	0,9	0,66	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc120	0,9	0,66	99,3	0		1
Proc121	0,9	0,66	99,5	0		1
Proc122	0,9	0,66	99,7	0		1
Proc123	0,9	0,66	99,8	0		1
Proc124	0,9	0,66	99,3	0,1		1
Proc125	0,9	0,66	99,6	0,1		1
Proc126	0,9	0,66	98,8	0,2		1
Proc127	0,8	0,66	99,3	0	1	
Proc128	0,8	0,66	99,5	0	1	
Proc129	0,8	0,66	99,7	0	1	
Proc130	0,8	0,66	99,8	0	1	
Proc131	0,8	0,66	99,3	0,1	1	
Proc132	0,8	0,66	99,6	0,1	1	
Proc133	0,8	0,66	98,8	0,2	1	
Proc134	0,8	0,66	99,3	0	0,5	0,5

Processo (cont.)	Características técnicas de cada processo					
	TS _k (Unit)	TM _k (Unit)	Pol _k (%)	Umid _k (%)	MEP _k (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc135	0,8	0,66	99,5	0	0,5	0,5
Proc136	0,8	0,66	99,7	0	0,5	0,5
Proc137	0,8	0,66	99,8	0	0,5	0,5
Proc138	0,8	0,66	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc139	0,8	0,66	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc140	0,8	0,66	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc141	0,8	0,66	99,3	0		1
Proc142	0,8	0,66	99,5	0		1
Proc143	0,8	0,66	99,7	0		1
Proc144	0,8	0,66	99,8	0		1
Proc145	0,8	0,66	99,3	0,1		1
Proc146	0,8	0,66	99,6	0,1		1
Proc147	0,8	0,66	98,8	0,2		1
Proc148	0,7	0,66	99,3	0	1	
Proc149	0,7	0,66	99,5	0	1	
Proc150	0,7	0,66	99,7	0	1	
Proc151	0,7	0,66	99,8	0	1	
Proc152	0,7	0,66	99,3	0,1	1	
Proc153	0,7	0,66	99,6	0,1	1	
Proc154	0,7	0,66	98,8	0,2	1	
Proc155	0,7	0,66	99,3	0	0,5	0,5
Proc156	0,7	0,66	99,5	0	0,5	0,5
Proc157	0,7	0,66	99,7	0	0,5	0,5
Proc158	0,7	0,66	99,8	0	0,5	0,5
Proc159	0,7	0,66	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc160	0,7	0,66	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc161	0,7	0,66	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc162	0,7	0,66	99,3	0		1
Proc163	0,7	0,66	99,5	0		1
Proc164	0,7	0,66	99,7	0		1
Proc165	0,7	0,66	99,8	0		1
Proc166	0,7	0,66	99,3	0,1		1
Proc167	0,7	0,66	99,6	0,1		1
Proc168	0,7	0,66	98,8	0,2		1
Proc169	1	1	99,3	0	1	
Proc170	1	1	99,5	0	1	
Proc171	1	1	99,7	0	1	
Proc172	1	1	99,8	0	1	
Proc173	1	1	99,3	0,1	1	
Proc174	1	1	99,6	0,1	1	
Proc175	1	1	98,8	0,2	1	
Proc176	1	1	99,3	0	0,5	0,5
Proc177	1	1	99,5	0	0,5	0,5
Proc178	1	1	99,7	0	0,5	0,5
Proc179	1	1	99,8	0	0,5	0,5
Proc180	1	1	99,3	0,1	0,5	0,5

Proceso (cont.)	Características técnicas de cada proceso					
	TS _k (Unit)	TM _k (Unit)	Pol _k (%)	Umid _k (%)	MEP _k (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc181	1	1	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc182	1	1	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc183	1	1	99,3	0		1
Proc184	1	1	99,5	0		1
Proc185	1	1	99,7	0		1
Proc186	1	1	99,8	0		1
Proc187	1	1	99,3	0,1		1
Proc188	1	1	99,6	0,1		1
Proc189	1	1	98,8	0,2		1
Proc190	0,9	1	99,3	0	1	
Proc191	0,9	1	99,5	0	1	
Proc192	0,9	1	99,7	0	1	
Proc193	0,9	1	99,8	0	1	
Proc194	0,9	1	99,3	0,1	1	
Proc195	0,9	1	99,6	0,1	1	
Proc196	0,9	1	98,8	0,2	1	
Proc197	0,9	1	99,3	0	0,5	0,5
Proc198	0,9	1	99,5	0	0,5	0,5
Proc199	0,9	1	99,7	0	0,5	0,5
Proc200	0,9	1	99,8	0	0,5	0,5
Proc201	0,9	1	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc202	0,9	1	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc203	0,9	1	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc204	0,9	1	99,3	0		1
Proc205	0,9	1	99,5	0		1
Proc206	0,9	1	99,7	0		1
Proc207	0,9	1	99,8	0		1
Proc208	0,9	1	99,3	0,1		1
Proc209	0,9	1	99,6	0,1		1
Proc210	0,9	1	98,8	0,2		1
Proc211	0,8	1	99,3	0	1	
Proc212	0,8	1	99,5	0	1	
Proc213	0,8	1	99,7	0	1	
Proc214	0,8	1	99,8	0	1	
Proc215	0,8	1	99,3	0,1	1	
Proc216	0,8	1	99,6	0,1	1	
Proc217	0,8	1	98,8	0,2	1	
Proc218	0,8	1	99,3	0	0,5	0,5
Proc219	0,8	1	99,5	0	0,5	0,5
Proc220	0,8	1	99,7	0	0,5	0,5
Proc221	0,8	1	99,8	0	0,5	0,5
Proc222	0,8	1	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc223	0,8	1	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc224	0,8	1	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc225	0,8	1	99,3	0		1
Proc226	0,8	1	99,5	0		1

Processo (cont.)	Características técnicas de cada processo					
	TS _k (Unit)	TM _k (Unit)	Pol _k (%)	Umid _k (%)	MEP _k (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc227	0,8	1	99,7	0		1
Proc228	0,8	1	99,8	0		1
Proc229	0,8	1	99,3	0,1		1
Proc230	0,8	1	99,6	0,1		1
Proc231	0,8	1	98,8	0,2		1
Proc232	0,7	1	99,3	0	1	
Proc233	0,7	1	99,5	0	1	
Proc234	0,7	1	99,7	0	1	
Proc235	0,7	1	99,8	0	1	
Proc236	0,7	1	99,3	0,1	1	
Proc237	0,7	1	99,6	0,1	1	
Proc238	0,7	1	98,8	0,2	1	
Proc239	0,7	1	99,3	0	0,5	0,5
Proc240	0,7	1	99,5	0	0,5	0,5
Proc241	0,7	1	99,7	0	0,5	0,5
Proc242	0,7	1	99,8	0	0,5	0,5
Proc243	0,7	1	99,3	0,1	0,5	0,5
Proc244	0,7	1	99,6	0,1	0,5	0,5
Proc245	0,7	1	98,8	0,2	0,5	0,5
Proc246	0,7	1	99,3	0		1
Proc247	0,7	1	99,5	0		1
Proc248	0,7	1	99,7	0		1
Proc249	0,7	1	99,8	0		1
Proc250	0,7	1	99,3	0,1		1
Proc251	0,7	1	99,6	0,1		1
Proc252	0,7	1	98,8	0,2		1

ANEXO A – Linguagem de modelagem GAMS

Para exemplificar a aplicação dos elementos básicos da LM GAMS utilizaremos partes da implementação do modelo SPDL/PU (seção 4.2), aplicado ao cenário VI do exemplo ilustrativo (seção 5.1), como mostrado no Anexo C. Os mesmos elementos básicos apresentados nesta seção são utilizados na implementação do método para geração de parâmetros (seção 4.1), como pode ser visto no Anexo B.

I. Os elementos básicos utilizados na LM GAMS

- (a) *Sets*: são os blocos de construção básicos e correspondem aos índices apontados na representação algébrica do modelo. Os *sets* devem ser definidos por uma declaração e uma valoração dos membros (ver Exemplo 1). No caso do modelo apresentado na seção 4.2 foram apontados os *sets* $k, t, m, mp, f, e, p, ps, pa, px$;

Exemplo 1 – Comando com definição de *sets*:

```
sets
k Processos /proc1*proc5/
p Produtos /Standard, Superior, VHP, melaco, AEHC, AEAC/;
```

- (b) *Alias*: são declarações de índices com mesmo domínio de um índice já declarado;

Exemplo 2 – Comando com definição de *alias*:

```
alias (p,ps);
```

- (c) *Scalars, Parameters, Tables*: são elementos de entrada de dados, definidos na seção 4.2 como parâmetros do modelo e cálculos preliminares. Os valores escalares utilizam o comando *scalars*, os vetores utilizam o comando *parameters* e as matrizes de segunda ordem ou superiores utilizam o comando *Tables*.

Exemplo 3 – Comandos de entrada de dados *scalars, parameters* e *tables*:

```
scalar
BMF Brix do mel final (%) /85.00/;
parameters
PzaM(k) pureza do mel final (%)
/proc1 35
```

```

proc2 50
proc3 65
proc4 50
proc5 55/
table MAP(k,ps) Matriz auxiliar de determinacao dos acucares
produzidos em cada processo
           Standard   Superior   VHP
proc1 1
proc2           1
proc3           1
proc4 1
proc5           1           ;

```

- (d) *Variables*: este elemento indica a declaração, a atribuição de tipo e, opcionalmente, a atribuição de limites e/ou valores iniciais para as variáveis de decisão do modelo algébrico. O Exemplo 4 apresenta o código em GAMS utilizado para este tipo de elemento;

Exemplo 4 – Comandos de declaração de *variables*:

```

variables
z Margem de contribuicao total
MI(m,t) Variavel de decisao de quantidade de cana por fonte de
suprimento;
positive variable MI;

```

No Exemplo 4, a variável z foi declarada e definida como a margem de contribuição total (função objetivo). Já no caso de MI , foi declarada a variável e definida a variação nos índices m e t e também foi determinado o domínio não negativo para esta variável;

- (e) *Equations*: este elemento básico determina as equações e inequações existentes no modelo, no qual estão definidas a função objetivo e as restrições do modelo algébrico. As *equations* englobam os itens definidos como equações do modelo e restrições de cenário apresentados na seção 4.2, e devem ser definidas através de uma declaração e de uma definição, como podemos ver no Exemplo 5;

Exemplo 5 – Comandos de declaração de *equations*:

equations

MargemContribuicao funcao objetivo

DispCanal(m,t) calculo de disponibilidade de cana;

MargemContribuicao.. $z=e=$ *sum((p,k,t),V(p,t)*(A(p,k,t)*M3(k,t)))-*
*sum((m,t),C(m,t)*M1(m,t))-sum((f,t),L(f,t)*M2(f,t))-sum((k,t),CK(k,t)*M3(k,t))-*
*sum((p,e,t),h(p,e,t)*I(p,e,t));*

DispCanal(m,t).. $Disp(m,t)=e=$ *Prev0(m,"PSafra")\$contr(t)+Disp(m,t-*
1)\$contr(t eq 0)-M1(m,t-1);

- (f) *Model e solve*: elementos básicos que determinam o conjunto de equações que compõem o modelo em questão, o tipo de procedimento de solução que será utilizado (p.ex., PIM, PL) e o tipo de problema de otimização que a função objetivo está submetida (p.ex., maximização ou minimização). O Exemplo 6 ilustra melhor estes elementos básicos;

Exemplo 6 – Comandos de declaração tipo *model e solve*:

model SPDLpu /all/;

Solve SPDLpu using mip maximizing z;

- (g) *Display*: elemento opcional que determina que resultados serão exibidos no formulário de saída do GAMS. Variáveis com terminação “.lo” se referem a limites inferiores, variáveis com terminação “.up” são usadas para limites superiores, os valores primais são identificados pela terminação “.l” e os valores duais são identificados pela terminação “.m”. O Exemplo 7 ilustra melhor este elemento.

Exemplo 7 – Comandos de declaração tipo *display*:

Display Disp.l, X.l, X.m, M1.l, M1.m;

Os relatórios de saída do GAMS fornecem informações sobre a eventual existência de erros de compilação e erros de execução, informações sobre as equações declaradas (apresentadas de forma detalhada para que o modelador possa conferir seu conteúdo), relatórios de *status* e estatísticas do modelo (determinando o número de variável e restrições existentes) e apresenta os resultados encontrados.

Para um melhor entendimento dos comandos que foram apresentados nesta seção, o leitor pode verificar a implementação do cálculo da matriz de rendimentos (Anexo B) e a implementação do exemplo ilustrativo (Anexo C).

II. Estrutura da linguagem de modelagem GAMS

É importante apresentar alguns pontos fundamentais da estrutura dos modelos GAMS (Brooke *et al.*, 1997):

- (a) Um modelo GAMS é uma seqüência de enunciados, em que cada entidade, ou elemento, só pode ser utilizada após sua existência ter sido declarada;
- (b) A criação de entidades de um modelo GAMS consiste em dois passos: primeiro é feita a declaração da entidade e depois é feita a atribuição ou definição da entidade. Declarar consiste em dar um nome a uma entidade e valorar ou definir consiste em fornecer um valor ou uma fórmula;
- (c) O compilador GAMS não distingue entre letras maiúsculas e minúsculas;
- (d) Todo nome de uma entidade tem que começar obrigatoriamente com uma letra, podendo vir seguida de outras letras ou dígitos;
- (e) Uma estrutura típica dos modelos GAMS possui a forma apresentada na Figura 31. Esta estrutura geral é utilizada para a elaboração do modelo desta dissertação.

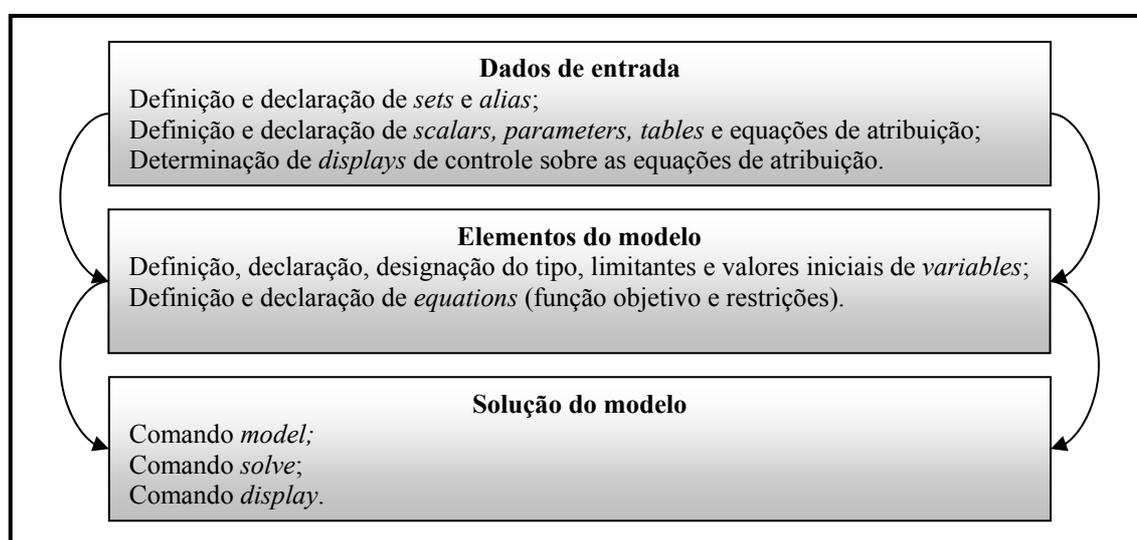


Figura 31. Estrutura geral do modelo GAMS (Fonte: adaptada de Brooke *et al.*, 1997)

III. Solver CPLEX

A sigla CPLEX é a combinação da letra C, em referência à linguagem de programação C utilizada no desenvolvimento deste algoritmo, com a terminação PLEX, em referência ao algoritmo *simplex* de solução de problemas de PL. Este *solver* foi

desenvolvido pela *CPLEX Optimization Inc*, empresa fundada em 1988 com a idéia de comercializar algoritmos de PL que pudessem ser utilizados para solucionar, de forma rápida, problemas grandes e difíceis de programação linear. Atualmente o CPLEX é um produto de propriedade da ILOG S.A.

A primeira versão do CPLEX (CPLEX 1.0) foi lançada em 1988 com suporte para solucionar problemas de PL por meio do método *primal simplex*. Posteriormente, este algoritmo incorporou o suporte para utilizar o método *dual simplex*; incorporou o algoritmo *barrier*, que é uma alternativa ao método *simplex* para problemas de programação linear e programação quadrática; incorporou o algoritmo *branch-and-bound*, para solucionar problemas de PIM, programação inteira mista quadrática e programação inteira mista com restrições quadráticas; incorporou heurísticas de pré-processamento de dados, para gerar boas soluções iniciais; e incorporou técnicas de programação por restrições, para melhorar a performance de busca. Além disso, o CPLEX passou a utilizar um algoritmo *branch-and-cut* com cortes com famílias de desigualdades válidas e genéricas. Atualmente, também é possível utilizar processamento paralelo para solucionar grandes problemas práticos (ILOG, 2005).

A versão utilizada nesta dissertação (CPLEX 7.0), lançada em outubro de 2000, incorpora as principais evoluções deste algoritmo. Até onde se sabe, este pacote representa a escolha mais eficiente para solucionar problemas de PIM e por isso é utilizado na solução do estudo de caso desta dissertação. Uma vantagem na utilização do GAMS/CPLEX é que o desenvolvedor do modelo de programação matemática pode focar toda a atenção para o processo de modelagem. Todo o algoritmo que soluciona o problema de programação matemática decorrente da modelagem é solucionado pelo *solver* CPLEX com mínima intervenção do modelador. Bastando para isso, utilizar o CPLEX com *solver* padrão do GAMS para solucionar problemas de PL e PIM.

ANEXO B – Implementação em GAMS do cálculo da matriz de rendimentos

Apresentamos aqui uma implementação utilizada no cálculo da matriz de rendimentos numa instância com dados simplificados. Esta instância tem a mesma ordem de grandeza do exemplo ilustrativo (seção 5.1), entretanto, é apenas um exemplo para auxiliar a compreensão do método de geração de parâmetros.

```
sets
p Produtos /Standard, Superior, VHP, melaco, AHEC, AAEC/
k Processos /proc1*proc5/
t periodos /sem1*sem5/

alias (p,ps)
alias (p,pa)
alias (p,px);

scalar
BMF Brix do mel final (%) /85.00/
PzaM pureza do mel final (%) /40.00/;

parameters
*parametros dos processos
TM(k) Desvio de melaco para destilaria (unitarizado)
/proc1 0
  proc2 0
  proc3 1
  proc4 1
  proc5 1/
TS(k) Desvio de caldo decantado para fabrica (unitarizado)
/proc1 1
  proc2 .9
  proc3 .8
  proc4 .7
  proc5 1/
Pol(k) polarizacao dos acucares (%)
/proc1 99.3
  proc2 99.5
  proc3 99.3
  proc4 99.3
  proc5 99.5/
Umid(k) Umidade dos acucares (%)
/proc1 0
```

```

proc2 0
proc3 0.1
proc4 0
proc5 0/
R(pa) Rendimento estequiometrico dos alcoois (litro por 100 kg ART)
/AHEC 64.75
AAEC 65.03/
table MSP(k,ps) Matrix auxiliar de determinacao dos acucares produzidos em
cada processo
      Standard Superior VHP
proc1 1
proc2      1
proc3      1
proc4 1
proc5      1      ;
table MAP(k,pa) Matrix auxiliar de determinacao dos alcoois produzidos em cada
processo
      AHEC AAEC
proc1 1
proc2      1
proc3      1
proc4 1
proc5 .6 .4 ;
parameters
*parametros variaveis no tempo
Elbti(t) Eficiencia na lavagem bagaco torta e indeterminadas (%)
/sem1 89
sem2 89
sem3 90
sem4 89
sem5 88/
Efd(t) Eficiencia na fermentacao e destilacao (%)
/sem1 90
sem2 86
sem3 86
sem4 87
sem5 87/
pc(t) pol da cana (%)
/sem1 14.6
sem2 14.6
sem3 13.84
sem4 13.84
sem5 14.24/
PzaC(t) Pureza da cana (%)

```

```

/sem1 90.09
sem2 90.09
sem3 81
sem4 82
sem5 90.09/
AR(t) acucares redutores contidos na cana (%)
/sem1 .47
sem2 .47
sem3 .7
sem4 1
sem5 1/
parameters
PzaJ(t) Pureza do caldo misto (%)
PzaS(k) Pureza dos acucares (%)
SJM(k,t) Recuperacao de acucares na cristalizacao (unitarizado)
SMF Sacarose no mel final (%)
RD(pa,t) Recuperacao de alcoois na destilaria (litro por 100 kg ART)
RS(ps,k,t) Rendimento de acucares (Kg por tc)
RM(px,k,t) Rendimento de melaco (Kg por tc)
RA(pa,k,t) Rendimento de alcoois (litros por tc)
A(p,k,t) Matriz de rendimento dos processos por periodo;
PzaJ(t)=(PzaC(t)-1);
PzaS(k)=Pol(k)/(1-(Umid(k)/100));
SJM(k,t)=((PzaS(k)*(PzaJ(t)-PzaM)))/(PzaJ(t)*(PzaS(k)-PzaM));
SMF=(BMF*PzaM)/100;
RD(pa,t)=(R(pa)*(Efd(t)/100));
RS(ps,k,t)=pc(t)*10*(Elbti(t)/100)*SJM(k,t)*TS(k)*MSP(k,ps);
RM("melaco",k,t)=(pc(t)*Elbti(t)*(1-SJM(k,t))*TS(k)*100*(1-TM(k)))/(SMF*10);
RA(pa,k,t)=(Elbti(t)/10)*(RD(pa,t)/100)*(((pc(t)/0.95)*(1-
SJM(k,t))+AR(t))*TS(k)*TM(k)+(((pc(t)/0.95)+AR(t))*(1-TS(k))))*MAP(k,pa);
A(p,k,t)=(RS(p,k,t)+RM(p,k,t)+RA(p,k,t))/1000;
display PzaJ, PzaS, SJM, SMF, RD, RS, RM, RA, A;

```

ANEXO C – Implementação em GAMS do exemplo ilustrativo

Apresentamos aqui a implementação utilizada no exemplo ilustrativo, referente ao cenário VI, desta dissertação. Neste modelo a matriz de rendimentos (A_{pkt}) foi inserida como dado de entrada, não sendo utilizado o cálculo automático deste elemento, como apresentado no Anexo B.

```
sets
m MateriaPrima /cpropria, cforneccida/
k Processos /proc1*proc5/
f TipoFrota /Fprop, Fterc/
e TipoEstoque /Eprop, Eterc/
p Produtos /VHP, melaco, AEHC/
t periodos /sem1*sem5/

options LIMROW=1000, OPTCR = 0.00, ITERLIM = 50000, RESLIM = 50000, DECIMALS =
2;

parameters
contr(t) controle de estoque inicial
/sem1 1
  sem2 0
  sem3 0
  sem4 0
  sem5 0/
alfa(t) Porcentagem de cana de fornecedores %
/sem1 100
  sem2 100
  sem3 100
  sem4 100
  sem5 100/
CT(t) Capacidade de transporte da frota propria tc por semana
/sem1 47250
  sem2 47250
  sem3 51975
  sem4 51975
  sem5 51975/
Mmin(t) Moagem minima por periodo tc por semana
/sem1 47400
  sem2 42400
  sem3 47400
  sem4 42400
```

```

sem5 47400/
Mmax(t) Moagem maxima por periodo tc por semana
/sem1 58000
sem2 51800
sem3 58000
sem4 51800
sem5 58000/
table Gama(p,e) Capacidade de estocagem t (ou m3)
      Eprop Eterc
VHP   15000 10000
melaco 3000 0
AEHC  14000 3000;
table L(f,t) Custo logistico (CCT) u.m. por tc
      sem1 sem2 sem3 sem4 sem5
Fprop 7.24 7.24 7.24 7.24 7.24
Fterc 10   10   10   10   10;
table CK(k,t) Custo dos processos u.m. por tc
      sem1 sem2 sem3 sem4 sem5
proc1 8.35 8.35 8.35 8.35 8.35
proc2 8.4  8.4  8.4  8.4  8.4
proc3 8.3  8.3  8.3  8.3  8.3
proc4 8.4  8.4  8.4  8.4  8.4
proc5 8.4  8.4  8.4  8.4  8.4;
table C(m,t) custo da materia-prima por fonte de suprimento por periodo
      sem1 sem2 sem3 sem4 sem5
cpropria 7.30 6.74 6.26 6.26 6.26
cfornecida 35.10 34.58 34.00 32.64 31.44
table A(p,k,t) Rendimento por tonelada processada t (ou m3) por tc processada
      sem1 sem2 sem3 sem4 sem5
VHP.proc1 .1125 .113 .1135 .1135 .113
melaco.proc1 .04 .04 .045 .045 .04
AEHC.proc1
VHP.proc2 .1125 .113 .1135 .1135 .113
melaco.proc2
AEHC.proc2 .0128 .013 .0133 .0133 .0128
VHP.proc3 .0709 .0739 .0768 .0768 .0739
melaco.proc3 .035 .0362 .0375 .0375 .0362
AEHC.proc3 .0291 .0302 .0313 .0313 .0302
VHP.proc4 .0565 .057 .0575 .0575 .057
melaco.proc4 .02 .02 .025 .025 .02
AEHC.proc4 .04 .042 .043 .043 .042
VHP.proc5 .0565 .057 .0575 .0575 .057
melaco.proc5
AEHC.proc5 .0464 .0474 .048 .048 .0474;

```

table h(p,e,t) Custo de estocagem u.m. por t (ou m3)

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
VHP.Eprop	5	5	5	5	5
melaco.Eprop	2	2	2	2	2
AEHC.Eprop	8	8	8	8	8
VHP.Eterc	7	7	7	7	7
melaco.Eterc	0	0	0	0	0
AEHC.Eterc	10	10	10	10	10;

table DS(p,t) Demanda dos produtos por semana t (ou m3)

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
VHP					25000
melaco					2000
AEHC					1000 ;

table V(p,t) Valor dos produtos por periodo u.m. por t (ou m3)

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
VHP	250	250	250	250	250
melaco	120	120	120	120	120
AEHC	449	449	449	449	449;

table I0(p,e,*) Estoque inicial t (ou m3)

	EInic
VHP.Eprop	500
melaco.Eprop	
AEHC.Eprop	1000
VHP.Eterc	
melaco.Eterc	
AEHC.Eterc	

table Prev0(m,*) Previsao de colheita para toda a safra em tc

	PSafra
cpropria	150000
cforneccida	100000;

variables

z Margem de contribuicao total

I(p,e,t) variavel de estoque

Disp(m,t) Disponibilidade de cana para ser processada nos proximos periodos

M1(m,t) Variavel de decisao de quantidade de cana por fonte de suprimento

M2(f,t) Variavel de decisao de quantidade de cana transportada

M3(k,t) Variavel de decisao de quantidade de cana por processo

X(k,t) variavel de escolha de processos

MC(t) variavel de margem de contribuicao

positive variable I, Disp, M1, M2, M3;

binary variable X;

equations

```

MargemContribuicao funcao objetivo
MCsemanal(t) margem de contribuicao semanal
Estoque(p,t) balanco de estoque
DispCanal(m,t) calculo de disponibilidade de cana
DispCana2(m,t) balanco de disponibilidade de cana
Compatibilidadel(t) quantidade de cana por fonte de suprimento e cana
transportada
Compatibilidade2(t) quantidade de cana transportada e moagem da usina
LimitanteMoagemInf(t) Limitante inferior da moagem semanal da usina
LimitanteMoagemSup(t) Limitante superior da moagem semanal da usina
Fornecedor(t) restricao de percentual de cana de fornecedor
CapacidadeFrota(t) restricao de capacidade de transporte da frota propria
Processo1(k,t) rendimento do processo semanal
Processo2(t) restricao de um processo semanal
CapEstoque(p,e,t) restricao de capacidade de estocagem da usina
ConsumoTotal Garantia de consumo de toda a cana;

MargemContribuicao.. z=e=sum((p,k,t),V(p,t)*(A(p,k,t)*M3(k,t)))-
sum((m,t),C(m,t)*M1(m,t))-sum((f,t),L(f,t)*M2(f,t))-
sum((k,t),CK(k,t)*M3(k,t))-sum((p,e,t),h(p,e,t)*I(p,e,t));
MCsemanal(t).. sum((p,k),V(p,t)*(A(p,k,t)*M3(k,t)))-
sum((m),C(m,t)*M1(m,t))-sum((f),L(f,t)*M2(f,t))-
sum((k),CK(k,t)*M3(k,t))-sum((p,e),h(p,e,t)*I(p,e,t))=g=0;
Estoque(p,t).. sum(e,I(p,e,t))=e=sum(e,I0(p,e,"EInic")$contr(t))+
sum(e,I(p,e,t-1)$ (contr(t) eq 0))+sum(k,A(p,k,t)*M3(k,t))-DS(p,t);
DispCanal(m,t).. Disp(m,t)=e=Prev0(m,"PSafra")$contr(t)+
Disp(m,t-1)$ (contr(t) eq 0)-M1(m,t-1);
DispCana2(m,t).. M1(m,t)=l=Disp(m,t);
Compatibilidadel(t).. sum(m,M1(m,t))=e=sum(f,M2(f,t));
Compatibilidade2(t).. sum(f,M2(f,t))=e=sum(k,M3(k,t));
LimitanteMoagemInf(t).. sum(k,M3(k,t))=g=Mmin(t);
LimitanteMoagemSup(t).. sum(k,M3(k,t))=l=Mmax(t);
Fornecedor(t).. M1("cfornevida",t)=l=(alfa(t)/100)*sum(k,M3(k,t));
CapacidadeFrota(t).. M2("Fprop",t)=l=CT(t);
Processo1(k,t).. M3(k,t)=l=Mmax(t)*X(k,t);
Processo2(t).. sum((k),X(k,t))=e=1;
CapEstoque(p,e,t).. I(p,e,t)=l=gama(p,e);
ConsumoTotal.. sum(m,Disp(m,'sem1'))=e=sum((k,t),M3(k,t));

model SPDLpu /all/;
Solve SPDLpu using mip maximizing z;
Display I.l, I.m, Disp.l, X.l, X.m, M1.l, M1.m, M2.l, M2.m, M3.l, M3.m;

```

ANEXO D – Modelo algébrico (SPDL/PU)

Apresentamos aqui o modelo algébrico SPDL/PU, desenvolvido nesta dissertação para representar as decisões envolvidas no PCP de uma usina de açúcar e álcool.

I. Objetivo

Determinar qual será a moagem semanal (M_t) e os processos de produção (X_{kt}) de forma que a margem de contribuição seja maximizada e as restrições de mercado, de previsão de safra, capacidade de transporte das frotas, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e produção *tudo ou nada* sejam respeitadas.

II. Índices

- k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool (processo 01,..., processo K). O valor de K pode variar bastante, de acordo com as características de cada unidade. Para o estudo de caso deste trabalho (safra 2004/2005 da USC), K é igual a 252;
- t Períodos de análise: determinado pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar (semana 01,..., semana T). Este valor depende de condições climáticas e do grau de maturação da cana-de-açúcar. Na USC o número total de semanas de safra varia em torno de 22 a 28 semanas. Para a safra 2004/2005, T é igual a 22;
- p Produtos fabricados: determina os 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*). Para o cálculo da matriz de rendimentos, estes produtos são subdivididos em produtos da fábrica de açúcar, produtos da destilaria de álcool e co-produtos da fábrica de açúcar, por meio dos subíndices ps , pa , px , mostrados a seguir:
- ps Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar (*Standard*, *Superior*, *Especial*, *Extra*, *VHP*, *VVHP*, *Demerara*);
- pa Subconjunto de produtos da destilaria (*AEHC*, *AEAC*);
- px Subconjunto de resíduos da usina (*Melaço*);

- m* Matérias-primas: determinadas de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana é proveniente (cana própria em reforma, cana própria para socaria, cana arrendada em reforma, cana arrendada para socaria, cana de acionistas, cana de fornecedor, cana de outras fontes). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, *cpropR*, *cpropS*, *carrR*, *carrS*, *caci*, *cfor*, *cout*. Para o cálculo da matriz de custos agrícolas é necessário criar um subconjunto das matérias-primas próprias (subíndice *mp*), como segue:
- mp* Subconjunto de canas que são administradas pela própria usina (cana própria em reforma, cana própria para socaria, cana arrendada em reforma, cana arrendada para socaria);
- f* Serviços de transporte: determinado de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado (transporte próprio, transporte terceirizado). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, *Fprop*, *Fterc*;
- e* Locais de estoque: determinado de acordo com o local onde o estoque está sendo feito (estoque próprio, estoque terceirizado). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, *Eprop*, *Eterc*.

III. Cálculos do método para geração de parâmetros do modelo (seção 4.1)

i. Matriz de rendimentos A_{pkt} (seção 4.1.1)

- BMF* Brix do mel final adotado pela fábrica (°brix);
- PzaM* Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%);
- TM_k* Desvio de melaço para a destilaria em cada processo *k* (valor unitarizado);
- TS_k* Determinação do desvio de caldo para a fábrica em cada processo *k* (valor unitarizado);
- Pol_k* Polarização dos açúcares produzidos em cada processo *k* (°Z);
- Umid_k* Umidade dos açúcares produzidos em cada processo *k* (%);
- R_{pa}* Rendimento estequiométrico dos álcoois *pa* que se pretende produzir (l/ 100 kg ART);
- MAP_{pa,k}* Matriz de determinação dos álcoois *pa* produzidos em cada processo *k* (valor unitarizado);

$MSP_{ps,k}$ Matriz auxiliar de determinação dos açúcares ps produzidos em cada processo k (valor unitarizado);

$Elbti_t$ Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool (%);

Efd_t Eficiência de fermentação/centrifugação e destilação na produção de álcool (%);

pc_t Pol da cana em cada semana t (%);

$PzaC_t$ Pureza da cana em cada semana t (%);

AR_t Açúcares redutores contidos na cana em cada semana t (%).

$PzaJ_t = PzaC_t - 1, t = 1, \dots, T \rightarrow$ Cálculo da pureza do caldo misto em cada semana t (%);

$PzaS_k = \frac{Pol_k}{\left(1 - \frac{Umid_k}{100}\right)}, k = 1, \dots, K \rightarrow$ Cálculo da pureza dos açúcares produzidos em

cada processo k (%);

$SJM_{kt} = \frac{PzaS_k (PzaJ_t - PzaM)}{PzaJ_t (PzaS_k - PzaM)}, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \rightarrow$ Cálculo da recuperação de

açúcares em cada processo k e em cada período t (%);

$SMF = \frac{BMF \cdot PzaM}{100}, k = 1, \dots, K \rightarrow$ Cálculo da quantidade de sacarose existente no

melaço (%);

$RD_{pa,t} = \frac{R_{pa} \cdot Efd_t}{100}, pa = AEHC, AEAC; t = 1, \dots, T \rightarrow$ Cálculo da recuperação teórica da

destilaria para os álcoois pa , em cada período t (%);

$RS_{ps,k,t} = pc_t \cdot 10 \left(\frac{Elbti_t}{100} \right) SJM_{kt} \cdot TS_k \cdot MSP_{k,ps}, \begin{cases} ps = standard, \dots, demerara; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow$

Cálculo do rendimento industrial obtido na produção dos açúcares ps , pelos processos k , nos períodos t (kg);

$RM_{px,k,t} = \frac{pc_t \cdot Elbti_t (1 - SJM_{kt}) \cdot TS_k \cdot 100 (1 - TM_k)}{10 \cdot SMF_k}, \begin{cases} px = Melaço; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow$ Cálculo

do rendimento industrial obtido na produção do melaço px , pelos processos k , nos períodos t (kg);

$$RA_{pa,k,t} = \left(\frac{\left(\frac{Elbti_t}{10} \right) \left(\frac{RD_{pa,t}}{100} \right) \left(\frac{pc_t}{0,95} (1 - SJM_{kt}) + AR_t \right) TS_k \cdot TM_k + \left(\frac{pc_t}{0,95} + AR_t \right) (1 - TS_k) \right) MAP_{k,pa} \rightarrow \text{Cálculo}$$

$pa=AEHC,AEAC; k=1,\dots,K; t=1,\dots,T$

do rendimento industrial obtido na produção dos álcoois pa , pelos processos k , nos períodos t (l);

$$A_{pkt} = \frac{RS_{ps,k,t} + RM_{px,k,t} + RA_{pa,k,t}}{1000}, \begin{cases} p=standard,\dots,AEAC; \\ k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \end{cases} \rightarrow \text{Determinação da matriz}$$

de rendimento industrial de cada produto p , em cada processos k , nos períodos t (t ou m³).

ii. Cálculo da matriz de custos industrial CK_{kt} (seção 4.1.2)

cproc Custo de produção de cada kg de ART, nos produtos finais, pelos processos da USC (u.m./kg ART);

ARm Açúcares redutores contidos no mel final produzido pelos processos da USC (%);

Fator_{pa} Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (Adimensionais).

$$ConvS_{ps,k,t} = RS_{ps,k,t} \cdot \left(\frac{pol_k}{100} \right) \left(1 - \left(\frac{Umid_k}{100} \right) \right) \cdot MSP_{k,ps}, \begin{cases} ps=standard,\dots,demerara; \\ k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \end{cases} \rightarrow$$

Cálculo do parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente, para cada processo k e durante todos os períodos t (kg Sacarose);

$$ConvM_{px,k,t} = \left(\frac{RM_{px,k,t} \cdot \left(\frac{SMF}{100} \right)}{0,95} \right) + RM_{px,k,t} \cdot \frac{ARm}{100}, \begin{cases} px=Melaço \\ k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \end{cases} \rightarrow \text{Cálculo}$$

do parâmetro de conversão do melaço px , em ART equivalente, para cada processo k e durante todos os períodos t . (kg ART);

$$ConvA_{pa,k,t} = RA_{pa,k,t} \cdot Fator_{pa} \cdot MAP_{k,pa}, pa=AEHC,AEAC; k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \rightarrow$$

Cálculo do parâmetro de conversão de álcoois pa , em etanol absoluto, para cada processo k e durante todos os períodos t (l Etanol);

$$ARTproc_{kt} = \sum_p \left(\frac{ConvS_{pkt}}{0,95} + ConvM_{pkt} + \frac{ConvA_{pkt}}{0,6475} \right), k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \rightarrow \text{Somatório}$$

de todo o ART produzido, em cada processo k e em cada período t por todos os produtos p (kg ART);

$$CK_{kt} = ARTproc_{kt} \cdot Cproc, k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \rightarrow \text{Determinação do custo de cada processo } k, \text{ em cada período } t, \text{ baseado no custo de produção de cada kg de ART (u.m./tc).}$$

iii. Cálculo da matriz de custos agrícola C_{mt} (seção 4.1.3)

$carr$ Custo de arrendamento (t de cana/ha). Média dos contratos de todas as fazendas arrendadas no período;

δ_m Acréscimo dado aos acionistas sobre o valor da tonelada de cana (u.m./t cana);

$ATRarr$ ATR padrão para a cana arrendada (Kg/t);

ATR_t ATR contido na cana (Kg/t). Parâmetro referente à qualidade da cana que está sendo fornecida;

$pATR_t$ Preço do ATR no período de fornecimento (u.m./Kg);

cp_t Custo de reforma do canavial (u.m./ha);

cts_t Custo do tratamento da soqueira (u.m./ha);

$cir_{mp,t}$ Custo de irrigação de cada tipo de cana mp em cada período t (u.m./ha);

$proda_{mp,t}$ Produtividade agrícola de cada tipo de cana mp em cada período t (t/ha). Neste parâmetro só são levados em consideração os dados para as canas próprias e as canas arrendadas.

$$VTCarr_t = ATRarr \cdot pATR_t, t=1,\dots,T \rightarrow \text{Cálculo do valor da cana arrendada para cada período } t \text{ (u.m./t);}$$

$$VTC_t = ATR_t \cdot pATR_t, t=1,\dots,T \rightarrow \text{Cálculo do valor da cana para cada período } t, \text{ calculada pelo sistema CONSECANA (u.m./t);}$$

$$C_{cpropR^m}^n = \frac{cp_t}{proda_{cpropR^m}^n} + \frac{cir_{cpropR^m}^n}{proda_{cpropR^m}^n} + \delta_{cpropR^m}^n, m=cpropR; t=1,\dots,T \rightarrow \text{Cálculo do}$$

custo agrícola da cana própria em reforma, em cada período t ;

$$C_{cpropS^t} = \frac{cts_t}{proda_{cpropS^t}} + \frac{cir_{cpropS^t}}{proda_{cpropS^t}} + \delta_{cpropS^t}, m=cpropS; t=1, \dots, T \rightarrow \text{Cálculo do}$$

custo agrícola da cana própria para socaria, em cada período t ;

$$C_{carrR^t} = \frac{cp_t}{proda_{carrR^t}} + \frac{cir_{carrR^t}}{proda_{carrR^t}} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrR^t}} + \delta_{carrR^t}, m=carrR; t=1, \dots, T \rightarrow$$

Cálculo do custo agrícola da cana arrendada em reforma, em cada período t ;

$$C_{carrS^t} = \frac{cts_t}{proda_{carrS^t}} + \frac{cir_{carrS^t}}{proda_{carrS^t}} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrS^t}} + \delta_{carrS^t}, m=carrS; t=1, \dots, T \rightarrow$$

Cálculo do custo agrícola da cana arrendada para socaria, em cada período t ;

$$C_{caci^t} = C_{cform^t} = C_{cout^t} = VTC_t + \delta_m, m=caci, cform, cout; t=1, \dots, T \rightarrow \text{Cálculo do}$$

custo agrícola da cana dos acionistas (C_{caci^t}), da cana dos fornecedores (C_{cform^t}) e da cana de outras fontes (C_{cout^t}), em cada período t .

IV. Modelo matemático proposto - SPDL/PU (seção 4.2)

i. Parâmetros

M^{min} Moagem mínima de cana (t/sem);

M^{max} Moagem máxima de cana (t/sem);

C_{giro} Capital de giro disponível para rodar a safra (u.m.);

CT Capacidade de transporte da frota própria (t/sem);

α_t Porcentagem de cana de fornecedores em cada período t (%);

β_t Disponibilidade da frota própria em cada período de análise t (%);

φ_t Tempo aproveitado na indústria durante um período de análise t (%);

$C_{est_{pe}}$ Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques (t ou m^3) no período t ;

L_{ft} Custo variável de corte, carregamento e transporte pelo tipo f , no período t (u.m./t);

h_{pe} Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e (u.m./t ou m^3);

DS_{pt} Demanda do produto p , em cada período t (t ou m^3 /sem);

V_{pt} Valor líquido do produto p , em cada período t (u.m./t ou m^3);

VC_{pt} Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto p , em cada período t (u.m./t ou m^3);

I_{pe0} Estoque inicial de cada produto p , no tipo de estoque e (t ou m^3);

$Prev_{m0}$ Previsão de safra por tipo de fornecimento m (t);

- A_{pkt} Matriz de rendimentos industriais de cada produto p , em cada processo k , nos períodos t (t ou m^3);
- CK_{kt} Matriz de custos industriais de cada processo k , nos períodos t (u.m./t de cana);
- C_{mt} Matriz de custos agrícolas de cada fonte de matéria-prima m , nos períodos t (u.m./t de cana).

ii. Variáveis

- X_{kt} Variável de seleção de processos (adimensional) – Decisão de utilizar ($X_{kt} = 1$) ou não utilizar ($X_{kt} = 0$) o processo k , no período t ;
 $X_{kt} \in \{0, 1\}$;
- M_t Variável de decisão de quantidade de cana moída por semana (t/sem) – Quantidade de cana moída no período t ;
 $M_t \geq 0$;
- M'_{mt} Variável de decisão de quantidade de cana colhida por semana (t/sem) – Quantidade obtida em cada fornecedor m , no período t ;
 $M'_{mt} \geq 0$;
- M''_{ft} Variável de decisão de quantidade de cana transportada por semana (t/sem) – Quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte f , no período t ;
 $M''_{ft} \geq 0$;
- M'''_{kt} Variável de decisão de quantidade de cana por processo por semana (t/sem) – Quantidade de cana moída pelo processo k , no período t ;
 $M'''_{kt} \geq 0$;
- $Disp_{mt}$ Variável de disponibilidade de matéria-prima (t ou m^3 /sem) – Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de matéria-prima m , no período t ;
 $Disp_{mt} \geq 0$;
- I_{pet} Variável de estoque (t ou m^3 /sem) – Quantidade estocada do produto p , pelo estoque tipo e , no período t ;
 $I_{pet} \geq 0$.

iii. Função objetivo

A função objetivo procura maximizar a margem de contribuição agroindustrial de produção dos produtos p , por meio dos processos k , da matéria-prima

m , do tipo de transporte da matéria-prima f e do tipo de estoque e , em todos os períodos t .

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} \right) \right)$$

iv. Restrições

$$\sum_e I_{pet} = \sum_e I_{p,e,t-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DS_{pt}, \quad p=Standard, \dots, AEAC; \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição}$$

de balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t ;

$$\sum_k X_{kt} = 1, \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de utilização de apenas um processo por período } t;$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t, \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de compatibilidade entre a}$$

quantidade de cana colhida (M'_{mt}), a quantidade de cana transportada (M''_{ft}), a quantidade de cana nos processos (M'''_{kt}) e a quantidade de cana moída (M_t), em todos os períodos t da safra;

$$Disp_{mt} = Disp_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt}, \quad m=cpropR, \dots, cout; \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de}$$

disponibilidade de cana tipo m no início de cada período de análise t ;

$$\sum_m Disp_{m1} = \sum_t M_t \rightarrow \text{Restrição de utilização total da cana disponível};$$

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \leq M_t \leq M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100}, \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de moagem em cada período de}$$

análise t ;

$$\sum_p \sum_k VC_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t + Cgiro_t \geq \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} \right), \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição}$$

de fluxo de caixa em cada período t ;

$$M'_{cforn} + M'_{cacit} + M'_{cout} \leq \alpha_t \cdot M_t, \quad t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de quantidade de cana não}$$

administrada (cana fornecida, cana de acionistas e cana de outras fontes) em cada período t ;

$$M''_{Fprop,t} \leq \frac{\beta_t}{100} \cdot CT, \quad t = 1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de capacidade de transporte com frota}$$

própria em cada período t ;

$$I_{pet} \leq Cest_{pe}, \quad p = Standard, \dots, AEAC; \quad e = Eprop, Eterc; \quad t = 1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de}$$

capacidade de estoque para cada produto p , em cada tipo de estoque e , nos períodos de análise t ;

$$M'''_{kt} \leq M^{\max} \cdot X_{kt}, \quad k = 1, \dots, K; \quad t = 1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição auxiliar para que não seja}$$

necessário utilizar a variável X_{kt} na função objetivo e recair em um problema não-linear;

$$X_{kt} \in \{0, 1\}; \quad M_t \geq 0; \quad M'_{mt} \geq 0; \quad M''_{ft} \geq 0; \quad M'''_{kt} \geq 0; \quad Disp_{mt} \geq 0; \quad I_{pet} \geq 0; \rightarrow \text{Restrição de}$$

domínio das variáveis de decisão do modelo.

ANEXO E – Dados de entrada do cenário preliminar

Neste anexo apresentamos os dados de entrada do cenário preliminar do estudo de caso (safra 2004/2005 da USC). Todos os dados utilizados no método de geração de parâmetros (A_{pkt} , CK_{kt} , C_{mt}) e no modelo SPDL/PU são listados aqui, com exceção dos parâmetros apresentados no Apêndice A (TM_k , TS_k , Pol_k , $Umid_k$, R_{pa} , $MAP_{pa,k}$, $MSP_{ps,k}$, BMF e $PzaM$).

Tabela 36. Dados de entrada constantes (cenário preliminar)

Parâmetros	Valores
ARm (%)	18
cproc (u.m./kg de ART)	0,087
carr (t de cana/ha)	9
δ_m (u.m./t de cana)	0
ATRarr (kg/t)	114
Cgiro (u.m.)	1.000.000,00
M^{\min} (t/sem)	45000
M^{\max} (t/sem)	55000
CT (t/sem)	43000

Tabela 37. Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (cenário preliminar)

Fator _{pa}	Valores (Adimensionais)
AEHC	0.95415
AEAC	0.99577

Tabela 38. Dados de entrada com variação em t (cenário preliminar)

Semanas	pc _t (%)	PzaC _t (%)	AR _t (%)	Elbti _t (%)	Efd _t (%)	ATR _t (kg/t)	pATR _t (u.m./t)	α_t (%)	β_t (%)	φ_t (%)
Sem1	12,0	83,4	1,1	88,0	88,0	120,9	0,2912	30	90	90
Sem2	12,1	83,6	1,2	88,6	89,1	125,4	0,2912	30	90	90
Sem3	12,4	84,1	1,0	89,2	89,2	127,9	0,2969	30	90	90
Sem4	12,4	84,4	1,1	89,4	89,6	128,4	0,2969	30	90	90
Sem5	12,8	84,4	1,0	89,6	90,0	129,1	0,2969	55	90	90
Sem6	12,8	84,9	1,0	89,6	90,1	130,8	0,2969	55	90	90
Sem7	12,8	85,6	1,0	89,6	90,3	131,6	0,3128	55	90	90
Sem8	13,0	85,0	1,0	89,7	90,4	132,9	0,3128	55	90	90
Sem9	13,4	85,5	1,0	89,6	90,4	133,5	0,3128	55	90	90
Sem10	13,6	85,5	1,0	89,6	90,5	134,5	0,3128	55	90	90
Sem11	13,8	85,6	1,0	89,8	90,6	136,1	0,3128	55	90	90
Sem12	14,2	85,9	1,0	89,9	90,4	138,8	0,3030	55	90	90
Sem13	14,4	85,8	1,0	89,8	90,2	140,9	0,3030	55	90	90
Sem14	14,7	85,8	0,9	89,6	90,1	144,2	0,3030	55	90	90
Sem15	15,2	85,8	0,9	89,7	89,7	143,5	0,3030	55	90	90

Semanas (cont.)	pc _t (%)	PzaC _t (%)	AR _t (%)	Elbti _t (%)	Efd _t (%)	ATR _t (kg/t)	pATR _t (u.m./t)	α _t (%)	β _t (%)	φ _t (t)
Sem16	15,2	85,8	1,0	89,3	89,4	142,3	0,3030	55	90	90
Sem17	15,2	85,1	1,0	89,2	89,3	142,0	0,3041	55	90	90
Sem18	15,4	84,5	1,1	89,2	89,1	141,1	0,3041	55	90	90
Sem19	14,7	84,0	1,0	88,8	88,8	138,5	0,3041	55	90	90
Sem20	14,7	83,4	1,0	88,5	88,8	137,4	0,2955	30	90	90
Sem21	14,7	83,9	1,0	88,3	88,7	133,3	0,2955	30	90	90
Sem22	14,0	82,5	1,1	88,0	88,5	131,2	0,2955	30	90	90

Tabela 39. Dados de custos de plantio, tratos culturais, irrigação e CCT (cenário preliminar)

Semanas	cp _t (u.m./ha)	cts _t (u.m./ha)	cir _{mp,t} (u.m./ha)				L _{ft} (u.m./t)	
			cpropR	cpropS	carrR	carrS	Fprop	Fterc
Sem1	2368,6	459,7	53,7	17,9	53,7	17,9	4,13	10,94
Sem2	2368,6	459,7	53,7	17,9	53,7	17,9	4,13	10,94
Sem3	2368,6	459,7	53,7	17,9	53,7	17,9	5,49	10,94
Sem4	2368,6	459,7	53,7	17,9	53,7	17,9	5,49	10,94
Sem5	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,49	10,94
Sem6	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,98	10,94
Sem7	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,98	10,94
Sem8	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,98	10,94
Sem9	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,98	10,94
Sem10	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,98	10,94
Sem11	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,62	10,94
Sem12	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,62	10,94
Sem13	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,62	10,94
Sem14	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,62	10,94
Sem15	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,62	10,94
Sem16	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,81	10,94
Sem17	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,81	10,94
Sem18	2568,6	429,7	179,0	59,7	179,0	59,7	5,81	10,94
Sem19	2568,6	449,7	232,6	77,6	232,6	77,6	5,81	10,94
Sem20	2568,6	449,7	232,6	77,6	232,6	77,6	6,05	10,94
Sem21	2568,6	449,7	232,6	77,6	232,6	77,6	6,05	10,94
Sem22	2568,6	449,7	232,6	77,6	232,6	77,6	6,05	10,94

Tabela 40. Dados de produtividade agrícola da cana própria e arrendada (cenário preliminar)

Semanas	proda _{mp,t} (t/ha)			
	cpropR	cpropS	carrR	carrS
Sem1	81,0	57,4	80,0	56,4
Sem2	81,5	58,1	80,5	57,1
Sem3	81,5	58,1	80,5	57,1
Sem4	82,0	58,8	81,0	57,8
Sem5	82,0	58,8	81,0	57,8
Sem6	82,5	59,5	81,5	58,5
Sem7	82,5	59,5	81,5	58,5
Sem8	83,0	60,2	82,0	59,2
Sem9	83,0	60,2	82,0	59,2

Semanas (cont.)	proda _{mp,t} (t/ha)			
	cpropR	cpropS	carrR	carrS
Sem10	83,5	60,9	82,5	59,9
Sem11	83,5	60,9	82,5	59,9
Sem12	84,0	61,6	83,0	60,6
Sem13	83,0	60,6	82,0	59,6
Sem14	82,8	60,0	81,8	58,9
Sem15	82,5	60,0	81,8	58,9
Sem16	82,1	59,8	81,5	58,3
Sem17	82,0	59,7	81,3	58,2
Sem18	82,0	59,5	81,0	58,0
Sem19	81,0	59,0	80,5	58,0
Sem20	80,5	58,5	80,0	57,5
Sem21	80,0	58,0	79,5	57,0
Sem22	79,5	57,7	78,5	56,7

Tabela 41. Valor dos produtos (cenário preliminar)

Semanas	V _{pt} (u.m./t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem1	564,5	566,3	568,4	570,0	567,3	568,4	563,4	187,8	664,5	693,1
Sem2	565,1	566,9	569,2	570,6	568,6	569,7	564,7	188,8	665,8	694,4
Sem3	565,3	567,1	569,4	570,8	569,6	570,7	565,7	189,2	665,9	694,5
Sem4	565,9	567,7	570,0	571,4	568,6	569,7	564,7	189,2	666,1	694,7
Sem5	566,1	567,9	570,2	571,6	568,0	569,1	564,1	189,1	665,4	694,0
Sem6	566,6	568,4	570,7	572,1	567,6	568,7	563,7	189,5	667,5	696,2
Sem7	568,3	570,1	572,4	573,8	567,9	569,0	564,0	189,1	668,5	696,0
Sem8	569,9	571,7	574,0	575,5	568,3	569,4	564,4	189,2	669,3	695,0
Sem9	570,1	571,9	574,2	575,7	569,1	570,2	565,2	189,4	670,1	694,3
Sem10	570,7	572,5	574,9	576,3	569,8	570,9	565,9	190,1	668,7	691,4
Sem11	571,1	572,9	575,3	576,7	570,0	571,1	566,1	190,5	668,3	694,2
Sem12	571,6	573,4	575,8	577,2	570,3	571,4	566,4	190,7	667,5	696,2
Sem13	577,8	579,6	581,0	581,4	570,4	571,5	566,5	190,5	667,9	696,6
Sem14	578,4	579,2	581,5	583,0	570,8	571,9	566,9	190,5	667,4	696,1
Sem15	578,2	580,0	581,3	582,8	571,3	572,4	567,4	191,1	665,7	694,3
Sem16	578,1	580,9	581,2	582,7	571,6	572,7	567,7	191,7	665,4	694,0
Sem17	579,0	580,8	582,1	583,6	572,0	573,1	568,1	191,0	666,0	694,6
Sem18	579,5	581,3	582,6	583,1	571,8	572,9	567,9	190,9	666,1	694,7
Sem19	579,2	582,0	582,3	584,8	571,8	572,9	567,9	189,4	666,0	694,6
Sem20	579,1	581,9	583,2	584,7	572,0	573,1	568,1	188,4	667,4	696,1
Sem21	579,7	581,5	583,8	585,3	572,3	573,4	568,4	188,4	668,5	697,2
Sem22	579,6	582,4	584,7	586,2	572,4	573,5	568,5	187,8	670,9	699,8

Tabela 42. Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal (cenário preliminar)

Semanas	VC _{pt} (u.m./t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem1	231,5	231,7	232,0	232,8	231,4	231,7	230,0	120,07	368,0	384,0
...
Sem22	231,5	231,7	232,0	232,8	231,4	231,7	230,0	120,07	368,0	384,0

Tabela 47. Previsão de safra no período inicial (cenário preliminar)

Previsão	cpropR	cpropS	carrR	carrS	cfor	caci	cout
Prev _{m0} (t)	60000	240000	60000	240000	200000	195000	5000

ANEXO F – Dados de saída do cenário preliminar

Resultados obtidos ao rodar o modelo SPDL/PU com os dados referentes ao cenário preliminar (Anexo E).

```

          S O L V E       S U M M A R Y

MODEL    SPDLpu          OBJECTIVE   z
TYPE     MIP             DIRECTION  MAXIMIZE
SOLVER   CPLEX          FROM LINE  767

**** SOLVER STATUS      1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS      8 INTEGER SOLUTION
**** OBJECTIVE VALUE    27512878.8257

RESOURCE USAGE, LIMIT    2020.297    50000.000
ITERATION COUNT, LIMIT  48576        50000

GAMS/Cplex   Nov 19, 2000 WIN.CP.CP 19.6 017.016.039.WAT For Cplex 7.0
Cplex 7.0.0, GAMS Link 17
Licensed for 1 use of lp, mip and barrier.

Solution satisfies tolerances.

MIP Solution   :      27512878.825709    (48576 iterations, 6800 nodes)
Final LP      :      27512878.825709    (132 iterations)

Best integer solution possible :      27647587.467399
Absolute gap   :                          134709
Relative gap   :                          0.0048962

----   768 VARIABLE I.L variavel de estoque

                sem1      sem2      sem3      sem4      sem5      sem6      sem7

VHP      .Eprop                468.26                5335.28
VHP      .Eterc                468.26                4902.31    4500.00
Demerara.Eterc 3692.72    7450.17    7450.17    6870.54    2370.54    2370.54    2370.54
melaco   .Eprop                1000.00                1000.00
melaco   .Eterc                1000.00                1000.00
AEHC     .Eprop    601.35                4.91                4.91    598.77
AEHC     .Eterc                233.74                4.91                286.46
AEAC     .Eprop                164.01                245.62
AEAC     .Eterc                145.24                45.62    321.28

                +      sem8      sem9      sem10     sem11     sem12     sem13     sem14

Standard.Eprop 4142.46    4142.46    4184.74    4800.00
Superior.Eprop                390.93                390.93                859.95
VHP      .Eprop                390.93                390.93                390.93
VHP      .Eterc    390.93                390.93                390.93
VVHP     .Eterc                5142.05    5142.05    5142.05
Demerara.Eterc 2370.54    2370.54    2370.54    2370.54    2370.54    2370.54    2370.54
melaco   .Eprop                1000.00                1000.00
AEHC     .Eprop    286.46                613.28                185.96                338.27
AEHC     .Eterc                286.46                313.28                638.27
AEAC     .Eprop    293.90                58.32                331.56                434.05
AEAC     .Eterc                345.17                466.10                331.56

                +      sem15     sem16     sem17     sem18     sem19     sem20     sem21

Superior.Eprop 859.95    859.95    859.95    859.95    859.95    859.95    859.95
Especial.Eprop 1054.49    1054.49    2031.77    3047.59    3047.59    3047.59    3047.59
Extra    .Eprop    1023.96    1023.96    1023.96    6257.27    6257.27    6257.27
VHP      .Eprop    390.93                390.93                390.93                2500.00
VHP      .Eterc    390.93                390.93                390.93                935.99
VVHP     .Eterc    5142.05    5142.05    5142.05    5142.05    142.05    142.05    142.05
Demerara.Eterc 2370.54    2370.54    2370.54    2370.54    2370.54    2370.54    2370.54

```



```

proc185                                1.00
proc187                                1.00

+   sem22

proc172    1.00

----  768 VARIABLE  M1.L  Variavel de decisao de quantidade de cana por fonte de
suprimento

           sem1          sem2          sem3          sem4          sem5          sem6          sem7

cpropR                                31634.15    25050.00
cpropS                                947.41
carrR  28350.00    28350.00                                3300.00
carrS                                21929.68    18225.00
caci   12150.00    12150.00                                12150.00    26802.95    22275.00    2786.94
cform                                13963.53                                19488.06

+   sem8          sem9          sem10          sem11          sem12          sem13          sem14

cpropR                                3315.85
cpropS  18225.00    20801.11    16543.00    22275.00
carrS                                20522.98    19301.07    49500.00
caci   22275.00    25423.58    24271.93    22225.00    25083.64    23590.20
cform  22275.00    25423.58    24271.93    22225.00
cout                                5000.00

+   sem15          sem16          sem17          sem18          sem19          sem20          sem21

cpropS                                22275.00    40938.73    22275.00    20866.02                                8278.73
carrS  49500.00                                27225.00    8561.27    27225.00                                34650.00    26371.27
caci   27225.00    8561.27    27225.00
cform                                25502.91    14850.00    14850.00

+   sem22

cpropS  28350.00
cform  12150.00

----  768 VARIABLE  M2.L  Variavel de decisao de quantidade de cana transportada

           sem1          sem2          sem3          sem4          sem5          sem6          sem7

Fprop  38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00
Fterc  1800.00    1800.00    7845.09    1800.00    10032.63    1800.00    1800.00

+   sem8          sem9          sem10          sem11          sem12          sem13          sem14

Fprop  38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00
Fterc  1800.00    7524.69    5430.78    10800.00    6906.61    4191.28    10800.00

+   sem15          sem16          sem17          sem18          sem19          sem20          sem21

Fprop  38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00    38700.00
Fterc  10800.00    10800.00    10800.00    10800.00    7668.93    10800.00    10800.00

+   sem22

Fprop  38700.00
Fterc  1800.00

----  768 VARIABLE  M3.L  Variavel de decisao de quantidade de cana por processo

           sem1          sem2          sem3          sem4          sem5          sem6          sem7

proc96                                46545.09
proc173                                40500.00
proc175  40500.00    40500.00
proc180                                40500.00
proc187                                48732.63
proc189                                40500.00

+   sem8          sem9          sem10          sem11          sem12          sem13          sem14

```

proc97					45606.61		
procl170						42891.28	
procl176			44130.78				
procl183	40500.00				49500.00		
procl184							49500.00
procl187		46224.69					
	+ sem15	sem16	sem17	sem18	sem19	sem20	sem21
procl171	49500.00		49500.00				
procl172		49500.00			46368.93		
procl173							49500.00
procl185				49500.00			
procl187						49500.00	
	+ sem22						
procl172	40500.00						
----	792 PARAMETER pro Producao semanal						
	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	sem6	sem7
VHP			4468.26		4867.02	4067.03	4097.69
Demerara	3692.72	3757.45		3920.37			
melaco			1000.00				
AEHC	601.35	632.39	171.17			593.85	287.70
AEAC			164.01	581.23	700.38		275.66
	+ sem8	sem9	sem10	sem11	sem12	sem13	sem14
Standard	4142.46		4742.27	5415.26			
Superior						4900.00	5759.95
VHP		4890.93					
VVHP					5142.05		
melaco					1000.00		
AEHC			326.82		172.68	652.31	
AEAC	572.62	651.27	313.15	707.79	165.46		702.49
	+ sem15	sem16	sem17	sem18	sem19	sem20	sem21
Especial	5954.49		5877.29	5915.81			
Extra		5923.96			5233.32		
VHP						5545.06	5564.01
AEHC	752.45	775.95	799.76		768.05		808.83
AEAC				820.52		796.79	
	+ sem22						
Extra	4240.19						
AEHC	709.30						
----	826 PARAMETER proAcum producao acumulada						
Standard	14300.00,	Superior	10659.95,	Especial	17747.59,	Extra	15397.46
VHP	33500.00,	VVHP	5142.05,	Demerara	11370.54,	melaco	2000.00
AEHC	8052.62,	AEAC	6451.36				

ANEXO G – Dados de entrada do cenário final

Neste anexo apresentamos os dados de entrada do cenário final do estudo de caso (safra 2004/2005 da USC). Todos os dados utilizados no método de geração de parâmetros (A_{pkt} , CK_{kt} , C_{mt}) e no modelo SPDL/PU são listados aqui, com exceção dos parâmetros apresentados no Apêndice A (TM_k , TS_k , Pol_k , $Umid_k$, R_{pa} , $MAP_{pa,k}$, $MSP_{ps,k}$, BMF e $PzaM$). Os dados sublinhados foram modificados ou incorporados ao modelo após as sugestões do processo de validação.

Tabela 48. Dados de entrada constantes (cenário final)

Parâmetros		Valores
ARm (%)		18
cproc (u.m./kg de ART)		0,087
carr (t de cana/ha)		9
δ_m (u.m./t de cana)	prop	0
	arr	0
	caci	4
	cform	3
ATRarr (kg/t)		114
Cgiro (u.m.)		1.000.000,00
M^{\min} (t/sem)		45000
M^{\max} (t/sem)		55000
CT _f (t/sem)	Fprop	43000
	Fcond	4500
	Fterc	infinita

Tabela 49. Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (cenário final)

Fator _{pa}	Valores (Adimensionais)
AEHC	0.95415
AEAC	0.99577

Tabela 50. Dados de entrada com variação em t (cenário final)

Semanas	pc _t (%)	PzaC _t (%)	AR _t (%)	Elbti _t (%)	Efd _t (%)	ATR _t (kg/t)	pATR _t (u.m./t)
Sem1	12,0	83,4	1,1	88,0	88,0	120,9	0,2912
Sem2	12,1	83,6	1,2	88,6	89,1	125,4	0,2912
Sem3	12,4	84,1	1,0	89,2	89,2	127,9	0,2969
Sem4	12,4	84,4	1,1	89,4	89,6	128,4	0,2969
Sem5	12,8	84,4	1,0	89,6	90,0	129,1	0,2969
Sem6	12,8	84,9	1,0	89,6	90,1	130,8	0,2969
Sem7	12,8	85,6	1,0	89,6	90,3	131,6	0,3128
Sem8	13,0	85,0	1,0	89,7	90,4	132,9	0,3128
Sem9	13,4	85,5	1,0	89,6	90,4	133,5	0,3128
Sem10	13,6	85,5	1,0	89,6	90,5	134,5	0,3128

Semanas (cont.)	pc _t (%)	PzaC _t (%)	AR _t (%)	Elbti _t (%)	Efd _t (%)	ATR _t (kg/t)	pATR _t (u.m./t)
Sem11	13,8	85,6	1,0	89,8	90,6	136,1	0,3128
Sem12	14,2	85,9	1,0	89,9	90,4	138,8	0,3030
Sem13	14,4	85,8	1,0	89,8	90,2	140,9	0,3030
Sem14	14,7	85,8	0,9	89,6	90,1	144,2	0,3030
Sem15	15,2	85,8	0,9	89,7	89,7	143,5	0,3030
Sem16	15,2	85,8	1,0	89,3	89,4	142,3	0,3030
Sem17	15,2	85,1	1,0	89,2	89,3	142,0	0,3041
Sem18	15,4	84,5	1,1	89,2	89,1	141,1	0,3041
Sem19	14,7	84,0	1,0	88,8	88,8	138,5	0,3041
Sem20	14,7	83,4	1,0	88,5	88,8	137,4	0,2955
Sem21	14,7	83,9	1,0	88,3	88,7	133,3	0,2955
Sem22	14,0	82,5	1,1	88,0	88,5	131,2	0,2955
Sem23	13,0	82,0	1,0	87,7	88,0	130,2	0,3002

Tabela 51. Outros dados de entrada com variação em *t* e custos CCT (cenário final)

Semanas	α_t (%)	β_{ft} (%)			γ_t (%)	φ_t (%)	L_{ft} (u.m./t)		
		Fprop	Fcond	Fterc			Fprop	Fcond	Fterc
Sem1	0	90	90	100	65	96	4,13	8,0	10,94
Sem2	0	90	90	100	100	96	4,13	8,0	10,94
Sem3	0	90	90	100	100	96	5,49	8,0	10,94
Sem4	55	90	90	100	94	96	5,49	8,0	10,94
Sem5	55	90	90	100	100	96	5,49	8,0	10,94
Sem6	55	90	90	100	100	96	5,98	8,0	10,94
Sem7	55	90	90	100	94	96	5,98	8,0	10,94
Sem8	55	90	90	100	100	96	5,98	8,0	10,94
Sem9	55	90	90	100	100	96	5,98	8,0	10,94
Sem10	55	90	90	100	94	96	5,98	8,0	10,94
Sem11	55	90	90	100	100	96	5,62	8,0	10,94
Sem12	55	90	90	100	100	96	5,62	8,0	10,94
Sem13	55	90	90	100	94	96	5,62	8,0	10,94
Sem14	55	90	90	100	100	96	5,62	8,0	10,94
Sem15	55	90	90	100	100	96	5,62	8,0	10,94
Sem16	55	90	90	100	94	96	5,81	8,0	10,94
Sem17	55	90	90	100	100	96	5,81	8,0	10,94
Sem18	55	90	90	100	100	96	5,81	8,0	10,94
Sem19	55	85	90	100	94	96	5,81	8,0	10,94
Sem20	55	85	90	100	100	96	6,05	8,0	10,94
Sem21	0	85	90	100	94	96	6,05	8,0	10,94
Sem22	0	85	90	100	94	96	6,05	8,0	10,94
Sem23	0	85	90	100	65	96	6,05	8,0	10,94

Tabela 52. Dados de produtividade agrícola da cana própria e arrendada (cenário final)

Semanas	proda _{mp,t} (t/ha)	
	prop	arr
Sem1	61,0	60,0
Sem2	61,5	60,5

Semanas (cont.)	proda _{mp,t} (t/ha)	
	prop	arr
Sem3	61,5	61,5
Sem4	62,0	62,0
Sem5	62,0	62,5
Sem6	62,5	62,5
Sem7	62,5	63,0
Sem8	63,0	64,0
Sem9	63,0	64,0
Sem10	63,5	64,5
Sem11	63,5	65,5
Sem12	64,0	65,0
Sem13	63,0	64,0
Sem14	62,8	63,8
Sem15	62,5	63,5
Sem16	62,1	63,1
Sem17	62,0	63,0
Sem18	62,0	62,3
Sem19	61,0	61,1
Sem20	60,5	60,5
Sem21	60,0	59,9
Sem22	59,5	59,3
Sem23	59,0	58,5

Tabela 53. Valor dos produtos (cenário final)

Semanas	V _{pt} (u.m./t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem1	564,5	566,3	568,4	570,0	567,3	568,4	563,4	187,8	664,5	693,1
Sem2	565,1	566,9	569,2	570,6	568,6	569,7	564,7	188,8	665,8	694,4
Sem3	565,3	567,1	569,4	570,8	569,6	570,7	565,7	189,2	665,9	694,5
Sem4	565,9	567,7	570,0	571,4	568,6	569,7	564,7	189,2	666,1	694,7
Sem5	566,1	567,9	570,2	571,6	568,0	569,1	564,1	189,1	665,4	694,0
Sem6	566,6	568,4	570,7	572,1	567,6	568,7	563,7	189,5	667,5	696,2
Sem7	568,3	570,1	572,4	573,8	567,9	569,0	564,0	189,1	668,5	696,0
Sem8	569,9	571,7	574,0	575,5	568,3	569,4	564,4	189,2	669,3	695,0
Sem9	570,1	571,9	574,2	575,7	569,1	570,2	565,2	189,4	670,1	694,3
Sem10	570,7	572,5	574,9	576,3	569,8	570,9	565,9	190,1	668,7	691,4
Sem11	571,1	572,9	575,3	576,7	570,0	571,1	566,1	190,5	668,3	694,2
Sem12	571,6	573,4	575,8	577,2	570,3	571,4	566,4	190,7	667,5	696,2
Sem13	577,8	579,6	581,0	581,4	570,4	571,5	566,5	190,5	667,9	696,6
Sem14	578,4	579,2	581,5	583,0	570,8	571,9	566,9	190,5	667,4	696,1
Sem15	578,2	580,0	581,3	582,8	571,3	572,4	567,4	191,1	665,7	694,3
Sem16	578,1	580,9	581,2	582,7	571,6	572,7	567,7	191,7	665,4	694,0
Sem17	579,0	580,8	582,1	583,6	572,0	573,1	568,1	191,0	666,0	694,6
Sem18	579,5	581,3	582,6	583,1	571,8	572,9	567,9	190,9	666,1	694,7
Sem19	579,2	582,0	582,3	584,8	571,8	572,9	567,9	189,4	666,0	694,6
Sem20	579,1	581,9	583,2	584,7	572,0	573,1	568,1	188,4	667,4	696,1
Sem21	579,7	581,5	583,8	585,3	572,3	573,4	568,4	188,4	668,5	697,2

Semanas (cont.)	V_{pt} (u.m./t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem22	579,6	582,4	584,7	586,2	572,4	573,5	568,5	187,8	670,9	699,8
Sem23	579,3	582,2	584,2	586,0	572,1	573,3	568,45	187,5	670,5	700,5

Tabela 54. Adiantamento pago pela cooperativa pela produção semanal (cenário final)

Semanas	VC_{pt} (u.m./t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem1	231,5	231,7	232,0	232,8	231,4	231,7	230,0	120,07	368,0	384,0
...
Sem23	231,5	231,7	232,0	232,8	231,4	231,7	230,0	120,07	368,0	384,0

Tabela 55. Demanda semanal de cada produto (cenário final)

Semanas	DS_{pt} (t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Sem1										
Sem2					5600					
Sem3								575		
Sem4					6700			575		
Sem5									1600	
Sem6					6700			575		
Sem7								575		
Sem8		1500						575		
Sem9		6500								2800
Sem10		2500						575		
Sem11		6500			6700			575		
Sem12		2500						575		
Sem13		6500			6700				2400	1850
Sem14								575		
Sem15					6700			575		
Sem16								575		
Sem17					6700			575		
Sem18		5100							2750	3050
Sem19					6700			575		
Sem20		5100						575		1150
Sem21					6700			575		1150
Sem22										1150
Sem23					5600				900	

Tabela 56. Custo de estocagem de cada produto (cenário final)

Estoques	h_{pe} (u.m./t ou m ³)									
	Standard	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Eprop	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,3	1,5	1,5
Eterc	5,0	2,0	5,0	5,0	1,5	5,0	5,0	1,3	2,5	2,5

Tabela 57. Penalização pela estocagem de entressafra (cenário final)

Estoques	hs_{pe} (u.m./t ou m ³)									
	<i>Standard</i>	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Demerara	Melaço	AEHC	AEAC
Eprop	10	10	10	10	5	5	5	3	15	15
Eterc	50	20	50	50	15	50	50	13	25	25

Tabela 58. Capacidade de estocagem de cada produto (cenário final)

Estoques	$Cest_{pe}$ (u.m./t ou m ³)									
	<i>Standard</i>	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Dem.	Melaço	AEHC	AEAC
Eprop	0	43750	0	0	7875	0	0	2800	5000	9000
Eterc	17500	0	17500	17500	10000	17500	17500	6000	3000	3000

Tabela 59. Estoque inicial dos produtos (cenário final)

Estoques	I_{pe0} (u.m./t ou m ³)									
	<i>Standard</i>	Superior	Especial	Extra	VHP	VVHP	Dem.	Melaço	AEHC	AEAC
Eprop	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eterc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 60. Previsão de safra no período inicial (cenário final)

Previsão	prop	arr	caci	cfor
Prev _{m0} (t)	300000	300000	200000	245000

ANEXO H – Dados de saída do cenário final

Resultados obtidos ao rodar o modelo SPDL/PU com os dados referentes ao cenário final (Anexo G).

```

          S O L V E       S U M M A R Y

      MODEL   SPDLpu           OBJECTIVE   z
      TYPE    MIP              DIRECTION  MAXIMIZE
      SOLVER   CPLEX           FROM LINE  864

**** SOLVER STATUS      1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS      8 INTEGER SOLUTION
**** OBJECTIVE VALUE    10077784.6785

      RESOURCE USAGE, LIMIT      2086.125   50000.000
      ITERATION COUNT, LIMIT     63630      50000

GAMS/Cplex   Nov 19, 2000 WIN.CP.CP 19.6 017.016.039.WAT For Cplex 7.0
Cplex 7.0.0, GAMS Link 17
Licensed for 1 use of lp, mip and barrier.

Solution satisfies tolerances.

MIP Solution   :      10077784.678453      (63630 iterations, 3870 nodes)
Final LP      :      10077784.678453      (171 iterations)

Best integer solution possible :      10110666.747842
Absolute gap      :                      32882.1
Relative gap      :                      0.00326283

----      865 VARIABLE   I.L   variavel de estoque

                sem1      sem2      sem3      sem4      sem5      sem6      sem7

Superior.Eprop      4133.33
VHP .Eprop      2553.30      950.30      5097.43      2317.52      7343.79      4073.60      4073.60
melaco .Eprop      811.79      811.79      1480.48      905.48      2374.85      1799.85      1224.85
AEHC .Eprop      681.51      891.22      1506.33      155.44      155.44      155.44
AEAC .Eprop      133.22      133.22      133.22      133.22      133.22      1725.31      2283.54

                +      sem8      sem9      sem10      sem11      sem12      sem13      sem14

Superior.Eprop      2633.33      1235.26      4061.46      3329.92      829.92
VHP .Eprop      7875.00      7875.00      7875.00      1347.68      6711.06      11.06      3532.26
VHP .Eterc      172.68      172.68
melaco .Eprop      1752.82      1752.82      1177.82      602.82      27.82      27.82      362.77
AEHC .Eprop      155.44      867.20      1606.99      2400.00      2400.00
AEAC .Eprop      2800.00      1126.76      1255.17

                +      sem15      sem16      sem17      sem18      sem19      sem20      sem21

Superior.Eprop      586.84      586.84      215.40      215.40
VHP .Eprop      532.70      6488.51      3386.29      3386.29      2303.03      2303.03      1181.87
melaco .Eprop      744.05      169.05      96.33      96.33      383.35      575.00
AEHC .Eprop      1366.66      2134.43      2134.43      39.55      39.55      39.55      445.04
AEAC .Eprop      1255.17      1255.17      2702.45      280.16      793.97      983.06      221.59

                +      sem22      sem23

Superior.Eprop      215.40      215.40
VHP .Eprop      5038.24      2149.94
AEHC .Eprop      445.04
AEAC .Eprop      9.10      9.10

----      865 VARIABLE   Disp.L   Disponibilidade de cana para ser processada nos proximos
periodos

```

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	sem6	sem7
Cprop	300000.00	271920.00	271920.00	270266.31	270266.31	270266.31	270266.31
Carr	300000.00	300000.00	256800.00	215253.69	196980.09	174332.89	152376.43
Caci	200000.00	200000.00	200000.00	200000.00	200000.00	200000.00	200000.00
Cform	245000.00	245000.00	245000.00	245000.00	222665.60	194985.69	168150.01
+	sem8	sem9	sem10	sem11	sem12	sem13	sem14
Cprop	251870.30	232430.30	210717.06	188382.66	188382.66	188382.66	188382.66
Carr	152376.43	152376.43	152376.43	152376.43	128616.43	103284.30	80949.90
Caci	188528.81	164768.81	138230.40	110932.80	110932.80	110932.80	83635.20
Cform	157137.19	157137.19	157137.19	157137.19	128097.19	100681.17	100681.17
+	sem15	sem16	sem17	sem18	sem19	sem20	sem21
Cprop	188382.66	188382.66	188382.66	188382.66	164622.66	142288.26	118528.26
Carr	61509.90	41774.40	19440.00				
Caci	83635.20	83635.20	56337.60	56337.60	27297.60		
Cform	76921.17	52800.00	52800.00	29040.00	29040.00	29040.00	
+	sem22	sem23					
Cprop	68896.26	28080.00					

---- 865 VARIABLE X.L variavel de escolha de processos

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	sem6	sem7
proc5			1.00		1.00		
proc19	1.00						
proc173		1.00		1.00			
proc184							1.00
proc250						1.00	
+	sem8	sem9	sem10	sem11	sem12	sem13	sem14
proc40	1.00						
proc82							1.00
proc170		1.00	1.00	1.00			
proc184						1.00	
proc208					1.00		
+	sem15	sem16	sem17	sem18	sem19	sem20	sem21
proc68	1.00						
proc103					1.00		
proc142						1.00	
proc166			1.00				
proc173		1.00					
proc180							1.00
proc198				1.00			
+	sem22	sem23					
proc173		1.00					
proc208	1.00	865					

---- 865 VARIABLE M1.L Variavel de decisao de quantidade de cana por fonte de suprimento

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	sem6	sem7
Cprop	28080.00		1653.69				18396.01
Carr		43200.00	41546.31	18273.60	22647.20	21956.46	
Caci							11471.19
Cform				22334.40	27679.91	26835.67	11012.82
+	sem8	sem9	sem10	sem11	sem12	sem13	sem14
Cprop	19440.00	21713.24	22334.40				
Carr				23760.00	25332.12	22334.40	19440.00
Caci	23760.00	26538.41	27297.60			27297.60	
Cform				29040.00	27416.02		23760.00

Superior							4133.33
VHP	2553.30	3997.00	4147.14	3920.09	5026.27	3429.81	
melaco	811.79		1243.70		1469.37		
AEHC		681.51	209.71	615.11	249.11		
AEAC	133.22					1592.09	558.23
	+ sem8	sem9	sem10	sem11	sem12	sem13	sem14
Superior		5101.93	5326.21	5768.46		5670.08	
VHP	3974.08				5363.37		3521.20
melaco	1102.96						909.96
AEHC		711.76	739.79	793.01			
AEAC	516.46				1126.76	723.24	1255.17
	+ sem15	sem16	sem17	sem18	sem19	sem20	sem21
Superior				5686.84		4728.56	
VHP	3700.44	5955.81	3597.78		5616.74		5578.84
melaco	956.27		502.28		862.03	766.65	
AEHC	1366.66	767.77		655.12			405.49
AEAC			1447.29	627.71	513.81	1339.09	388.52
	+ sem22	sem23					
VHP	3856.37	2711.69					
AEHC		454.96					
AEAC	937.51						
----	925 PARAMETER	proAcum	producao	acumulada			
Superior	36415.40,	VHP	66949.94,	melaco	8625.00,	AEHC	7650.00
AEAC	11159.10						

ANEXO I – Modelo algébrico modificado (SPDL/PU2)

Apresentamos aqui o modelo algébrico SPDL/PU2, decorrente das modificações do modelo SPDL/PU durante o processo de validação.

I. Objetivo

Determinar qual será a moagem semanal (M_t) e os processos de produção (X_{kt}) de forma que a margem de contribuição seja maximizada e as restrições de mercado, de previsão de safra, capacidade de transporte das frotas, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e produção *tudo ou nada* sejam respeitadas.

II. Índices

- k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool (processo 01,..., processo K). O valor de K pode variar bastante, de acordo com as características de cada unidade. Para o estudo de caso deste trabalho (safra 2004/2005 da USC), K é igual a 252;
- t Períodos de análise: determinado pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar (semana 01,..., semana T). Este valor depende de condições climáticas e do grau de maturação da cana-de-açúcar. Na USC o número total de semanas de safra varia em torno de 22 a 28 semanas. Para a safra 2004/2005, T é igual a 23;
- p Produtos fabricados: determina os 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). Para o cálculo da matriz de rendimentos, estes produtos são subdivididos em produtos da fábrica de açúcar, produtos da destilaria de álcool e co-produtos da fábrica de açúcar, por meio dos subíndices ps , pa , px , mostrados a seguir:
- ps Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar (*Standard*, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara);
- pa Subconjunto de produtos da destilaria (AEHC, AEAC);
- px Subconjunto de resíduos da usina (Melaço);

- m* Matérias-primas: determinadas de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana é proveniente (cana própria, cana arrendada, cana de acionistas, cana de fornecedor). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, *prop*, *arr*, *caci*, *cfor*. Para o cálculo da matriz de custos agrícolas é necessário criar um subconjunto das matérias-primas próprias (subíndice *mp*), como segue:
- mp* Subconjunto de canas que são administradas pela própria usina (cana própria, cana arrendada);
- f* Serviços de transporte: determinado de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado (transporte próprio, transporte condomínio, transporte terceirizado). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, *Fprop*, *Fcond*, *Fterc*;
- e* Locais de estoque: determinado de acordo com o local onde o estoque está sendo feito (estoque próprio, estoque terceirizado). A nomenclatura adotada para estes índices é, respectivamente, *Eprop*, *Eterc*.

III. Cálculos do método para geração de parâmetros do modelo (seção 4.1)

i. Matriz de rendimentos A_{pkt} (seção 4.1.1)

- BMF* Brix do mel final adotado pela fábrica (°brix);
- PzaM* Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%);
- TM_k* Desvio de melaço para a destilaria em cada processo *k* (valor unitarizado);
- TS_k* Determinação do desvio de caldo para a fábrica em cada processo *k* (valor unitarizado);
- Pol_k* Polarização dos açúcares produzidos em cada processo *k* (°Z);
- Umid_k* Umidade dos açúcares produzidos em cada processo *k* (%);
- R_{pa}* Rendimento estequiométrico dos álcoois *pa* que se pretende produzir (l/ 100 kg ART);
- MAP_{pa,k}* Matriz de determinação dos álcoois *pa* produzidos em cada processo *k* (valor unitarizado);
- MSP_{ps,k}* Matriz auxiliar de determinação dos açúcares *ps* produzidos em cada processo *k* (valor unitarizado);
- Elbti_t* Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool (%);

Efd_t Eficiência de fermentação/centrifugação e destilação na produção de álcool (%);

pc_t Pol da cana em cada semana t (%);

$PzaC_t$ Pureza da cana em cada semana t (%);

AR_t Açúcares redutores contidos na cana em cada semana t (%).

$PzaJ_t = PzaC_t - 1, t = 1, \dots, T \rightarrow$ Cálculo da pureza do caldo misto em cada semana t (%);

$PzaS_k = \frac{Pol_k}{\left(1 - \frac{Umid_k}{100}\right)}, k = 1, \dots, K \rightarrow$ Cálculo da pureza dos açúcares produzidos em cada processo k (%);

$SJM_{kt} = \frac{PzaS_k (PzaJ_t - PzaM)}{PzaJ_t (PzaS_k - PzaM)}, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \rightarrow$ Cálculo da recuperação de açúcares em cada processo k e em cada período t (%);

$SMF = \frac{BMF \cdot PzaM}{100}, k = 1, \dots, K \rightarrow$ Cálculo da quantidade de sacarose existente no melãoço (%);

$RD_{pa,t} = \frac{R_{pa} \cdot Efd_t}{100}, pa = AEHC, AEAC; t = 1, \dots, T \rightarrow$ Cálculo da recuperação teórica da destilaria para os álcoois pa , em cada período t (%);

$RS_{ps,k,t} = pc_t \cdot 10 \left(\frac{Elbti_t}{100} \right) SJM_{kt} \cdot TS_k \cdot MSP_{k,ps}, \begin{cases} ps = standard, \dots, demerara; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow$

Cálculo do rendimento industrial obtido na produção dos açúcares ps , pelos processos k , nos períodos t (kg);

$RM_{px,k,t} = \frac{pc_t \cdot Elbti_t (1 - SJM_{kt}) \cdot TS_k \cdot 100 (1 - TM_k)}{10 \cdot SMF_k}, \begin{cases} px = Melãoço; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow$ Cálculo

do rendimento industrial obtido na produção do melãoço px , pelos processos k , nos períodos t (kg);

$$RA_{pa,k,t} = \left(\frac{\left(\frac{Elbti_t}{10} \right) \left(\frac{RD_{pa,t}}{100} \right) \left(\frac{pc_t}{0,95} (1 - SJM_{kt}) + AR_t \right) TS_k \cdot TM_k + \left(\frac{pc_t}{0,95} + AR_t \right) (1 - TS_k) \right) MAP_{k,pa} \rightarrow \text{Cálculo}$$

$pa = \text{AEHC, AEAC}; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T$

do rendimento industrial obtido na produção dos álcoois pa , pelos processos k , nos períodos t (l);

$$A_{pkt} = \frac{RS_{ps,k,t} + RM_{px,k,t} + RA_{pa,k,t}}{1000}, \begin{cases} p = \text{standard}, \dots, \text{AEAC}; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow \text{Determinação da matriz}$$

de rendimento industrial de cada produto p , em cada processos k , nos períodos t (t ou m³).

ii. Cálculo da matriz de custos industrial CK_{kt} (seção 4.1.2)

cproc Custo de produção de cada kg de ART, nos produtos finais, pelos processos da USC (u.m./kg ART);

ARm Açúcares redutores contidos no mel final produzido pelos processos da USC (%);

Fator_{pa} Fator de conversão dos álcoois em etanol absoluto (Adimensionais).

$$ConvS_{ps,k,t} = RS_{ps,k,t} \cdot \left(\frac{pol_k}{100} \right) \left(1 - \left(\frac{Umid_k}{100} \right) \right) \cdot MSP_{k,ps}, \begin{cases} ps = \text{standard}, \dots, \text{demerara}; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow$$

Cálculo do parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente, para cada processo k e durante todos os períodos t (kg Sacarose);

$$ConvM_{px,k,t} = \left(\frac{RM_{px,k,t} \cdot \left(\frac{SMF}{100} \right)}{0,95} \right) + RM_{px,k,t} \cdot \frac{ARm}{100}, \begin{cases} px = \text{Melaço} \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases} \rightarrow \text{Cálculo}$$

do parâmetro de conversão do melaço px , em ART equivalente, para cada processo k e durante todos os períodos t . (kg ART);

$$ConvA_{pa,k,t} = RA_{pa,k,t} \cdot Fator_{pa} \cdot MAP_{k,pa}, pa = \text{AEHC, AEAC}; k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \rightarrow$$

Cálculo do parâmetro de conversão de álcoois pa , em etanol absoluto, para cada processo k e durante todos os períodos t (l Etanol);

$$ARTproc_{kt} = \sum_p \left(\frac{ConvS_{pkt}}{0,95} + ConvM_{pkt} + \frac{ConvA_{pkt}}{0,6475} \right), k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \rightarrow \text{Somatório}$$

de todo o ART produzido, em cada processo k e em cada período t por todos os produtos p (kg ART);

$$CK_{kt} = ARTproc_{kt} \cdot Cproc, k=1,\dots,K; t=1,\dots,T \rightarrow \text{Determinação do custo de cada processo } k, \text{ em cada período } t, \text{ baseado no custo de produção de cada kg de ART (u.m./tc).}$$

iii. Cálculo da matriz de custos agrícola C_{mt} (seção 4.1.3)

$carr$ Custo de arrendamento (t de cana/ha). Média dos contratos de todas as fazendas arrendadas no período;

δ_m Acréscimo dado aos acionistas sobre o valor da tonelada de cana (u.m./t cana);

$ATRarr$ ATR padrão para a cana arrendada (Kg/t);

ATR_t ATR contido na cana (Kg/t). Parâmetro referente à qualidade da cana que está sendo fornecida;

$pATR_t$ Preço do ATR no período de fornecimento (u.m./Kg);

$proda_{mp,t}$ Produtividade agrícola de cada tipo de cana mp em cada período t (t/ha). Neste parâmetro só são levados em consideração os dados para as canas próprias e as canas arrendadas.

$VTCarr_t = ATRarr \cdot pATR_t, t=1,\dots,T \rightarrow$ Cálculo do valor da cana arrendada para cada período t (u.m./t);

$VTC_t = ATR_t \cdot pATR_t, t=1,\dots,T \rightarrow$ Cálculo do valor da cana para cada período t , calculada pelo sistema CONSECANA (u.m./t);

$C_{prop}^n = VTC_t + \delta_{prop}^n, m=prop; t=1,\dots,T \rightarrow$ Cálculo do custo agrícola da cana própria, em cada período t ;

$C_{arr}^n = VTC_t + \delta_{arr}^n + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carr}^n}, m=arr; t=1,\dots,T \rightarrow$ Cálculo do custo agrícola da cana arrendada, em cada período t ;

$C_{caci}^n = C_{cform}^n = VTC_t + \delta_{mt}, m=caci, cform; t=1,\dots,T \rightarrow$ Cálculo do custo agrícola da cana dos acionistas (C_{caci}^n) e da cana dos fornecedores (C_{cform}^n), em cada período t .

IV. Modelo matemático proposto - SPDL/PU (seção 4.2)

i. Parâmetros

- M^{min} Moagem mínima de cana (t/sem);
- M^{max} Moagem máxima de cana (t/sem);
- C_{giro} Capital de giro disponível para rodar a safra (u.m.);
- CT_f Capacidade de transporte da frota própria (t/sem);
- α_t Porcentagem de cana de fornecedores em cada período t (%);
- β_{ft} Disponibilidade da frota própria em cada período de análise t (%);
- φ_t Tempo aproveitado na indústria durante um período de análise t (%);
- γ_t Tempo efetivo de moagem durante um período de análise t (%);
- $C_{est_{pe}}$ Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques (t ou m³) no período t ;
- L_{ft} Custo variável de corte, carregamento e transporte pelo tipo f , no período t (u.m./t);
- h_{pe} Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e (u.m./t ou m³);
- hs_{pe} Penalização pela utilização de estoque do produto p , pelo tipo de estoque e no período de entressafra (u.m./t ou m³);
- DS_{pt} Demanda do produto p , em cada período t (t ou m³/sem);
- V_{pt} Valor líquido do produto p , em cada período t (u.m./t ou m³);
- VC_{pt} Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto p , em cada período t (u.m./t ou m³);
- I_{pe0} Estoque inicial de cada produto p , no tipo de estoque e (t ou m³);
- $Prev_{m0}$ Previsão de safra por tipo de fornecimento m (t);
- A_{pkt} Matriz de rendimentos industriais de cada produto p , em cada processo k , nos períodos t (t ou m³);
- CK_{kt} Matriz de custos industriais de cada processo k , nos períodos t (u.m./t de cana);
- C_{mt} Matriz de custos agrícolas de cada fonte de matéria-prima m , nos períodos t (u.m./t de cana).

ii. Variáveis

- X_{kt} Variável de seleção de processos (adimensional) – Decisão de utilizar ($X_{kt} = 1$) ou não utilizar ($X_{kt} = 0$) o processo k , no período t ;
- $X_{kt} \in \{0, 1\}$;

- M_t Variável de decisão de quantidade de cana moída por semana (t/sem) – Quantidade de cana moída no período t ;
 $M_t \geq 0$;
- M'_{mt} Variável de decisão de quantidade de cana colhida por semana (t/sem) – Quantidade obtida em cada fornecedor m , no período t ;
 $M'_{mt} \geq 0$;
- M''_{ft} Variável de decisão de quantidade de cana transportada por semana (t/sem) – Quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte f , no período t ;
 $M''_{ft} \geq 0$;
- M'''_{kt} Variável de decisão de quantidade de cana por processo por semana (t/sem) – Quantidade de cana moída pelo processo k , no período t ;
 $M'''_{kt} \geq 0$;
- $Disp_{mt}$ Variável de disponibilidade de matéria-prima (t ou m³/sem) – Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de matéria-prima m , no período t ;
 $Disp_{mt} \geq 0$;
- I_{pet} Variável de estoque (t ou m³/sem) – Quantidade estocada do produto p , pelo estoque tipo e , no período t ;
 $I_{pet} \geq 0$.

iii. Função objetivo

A função objetivo procura maximizar a margem de contribuição agroindustrial de produção dos produtos p , por meio dos processos k , da matéria-prima m , do tipo de transporte da matéria-prima f e do tipo de estoque e , em todos os períodos t .

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e hs_{pe} \cdot I_{pe^{sem23}} \right) \right)$$

iv. Restrições

$$\sum_e I_{pet} = \sum_e I_{p,e,t-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DS_{pt}, p=Standard, \dots, AEAC; t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição}$$

de balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t ;

$$\sum_k X_{kt} = 1, t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de utilização de apenas um processo por período } t;$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t, t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de compatibilidade entre a}$$

quantidade de cana colhida (M'_{mt}), a quantidade de cana transportada (M''_{ft}), a quantidade de cana nos processos (M'''_{kt}) e a quantidade de cana moída (M_t), em todos os períodos t da safra;

$$Disp_{mt} = Disp_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt}, m=prop, \dots, cform; t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de}$$

disponibilidade de cana tipo m no início de cada período de análise t ;

$$\sum_m Disp_{m1} = \sum_t M_t \rightarrow \text{Restrição de utilização total da cana disponível;}$$

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \leq M'_t \leq M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100}, t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de moagem em cada}$$

período de análise t ;

$$\sum_p \sum_k VC_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t + Cgiro_t \geq \left(\begin{array}{l} \sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} \\ + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pet} \cdot I_{pet} \end{array} \right), t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição}$$

de fluxo de caixa em cada período t ;

$$M'_{cformt} + M'_{cacit} + M'_{coutt} \leq \alpha_t \cdot M_t, t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de quantidade de cana não}$$

administrada (cana fornecida, cana de acionistas e cana de outras fontes) em cada período t ;

$$M''_{ft} \leq \frac{\beta_{ft}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \cdot CT_f, f = Fprop, \dots, Fterc; t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de capacidade de}$$

transporte com frota própria em cada período t ;

$$I_{pet} \leq Cest_{pe}, p=Standard, \dots, AEAC; e=Eprop, Eterc; t=1, \dots, T \rightarrow \text{Restrição de}$$

capacidade de estoque para cada produto p , em cada tipo de estoque e , nos períodos de análise t ;

$M_{kt}''' \leq M^{\max} \cdot X_{kt}$, $k=1, \dots, K$; $t=1, \dots, T$ \rightarrow Restrição auxiliar para que não seja necessário utilizar a variável X_{kt} na função objetivo e recair em um problema não-linear;

$X_{kt} \in \{0, 1\}$; $M_t \geq 0$; $M'_{mt} \geq 0$; $M''_{ft} \geq 0$; $M'''_{kt} \geq 0$; $Disp_{mt} \geq 0$; $I_{pet} \geq 0$; \rightarrow Restrição de domínio das variáveis de decisão do modelo.

GLOSSÁRIO

A terminologia adotada no decorrer desta dissertação está baseada nos termos comumente utilizados no setor sucroalcooleiro, como pode ser observado em Fernandes (2003).

I. Termos gerais e características tecnológicas da cana-de-açúcar

Açúcares da cana: a cana contém em sua composição basicamente três tipos de açúcares: sacarose, glicose e frutose (*vide* definição de sacarose, glicose e frutose).

Cana: termo aceito para designar os colmos industrializáveis da cana-de-açúcar. Estes colmos são compostos por sólidos insolúveis (fibra), sólidos solúveis (^obrix) e água (umidade).

Cana-de-açúcar: gramínea rica em sacarose composta por folhas, colmos, raízes e, eventualmente, flores.

Caldo: fluido constituído pela água contida nos tecidos do colmo juntamente com todos os sólidos solúveis.

Caldo absoluto: todo o caldo teoricamente existente na cana, ou seja, uma quantidade hipotética que pode ser determinada, percentualmente, pela diferença entre 100 e a porcentagem de fibra existente na cana.

Fibra: matéria insolúvel em água contida na cana. A fibra da cana é a estrutura responsável pela sustentação da planta, condução da seiva bruta e elaborada, e estocagem da sacarose.

Fibra industrial: resultado da determinação da fibra quando a matéria-prima é analisada e, portanto, inclui as impurezas ou matérias estranhas que provocam o aumento do teor dos sólidos insolúveis na matéria-prima.

Glicose e Frutose: estes monossacarídeos ($C_6H_{12}O_6$) não são cristalizáveis no processo de fabricação de açúcar, mas são as matérias-primas da fermentação alcoólica no processo de fabricação de álcool.

Grau brix (^obrix): parâmetro mais utilizado na agroindústria do açúcar e do álcool. Expressa a porcentagem aparente de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada impura, ou seja, mede o teor de sacarose na solução. Esta solução pode ser o caldo extraído da cana.

Matéria-prima: material entregue na indústria para fabricação de açúcar, álcool, melaço e subprodutos. No caso do açúcar esta matéria-prima é composta pela cana mais as impurezas oriundas da colheita. No caso do álcool, além das impurezas oriundas da colheita, esta matéria-prima pode ser composta pela cana, pelo melaço, por uma outra matéria açucarada (p.ex., mel rico) ou por uma mistura destes itens.

Não-açúcares: são sólidos solúveis contidos na cana que podem ser orgânicos ou inorgânicos, como, por exemplo, as cinzas condutimétricas, os aminoácidos e proteínas, os ácidos orgânicos, o amido e outros elementos.

Sacarose: a sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) é o açúcar diretamente cristalizável no processo de fabricação. Este açúcar, sob condições ácidas ou ação de enzimas (invertase), absorve uma molécula de água e desdobra-se em glicose e frutose (açúcares invertidos).

Usina: termo adotado para designar de forma genérica a unidade produtora de açúcar e a unidade produtora de açúcar com destilaria de álcool anexa. Caso seja importante especificar a empresa que só produz álcool esta será denominada apenas como *destilaria*; nos outros casos, incluiremos este tipo de empresa no termo *usina*.

Umidade da cana: porcentagem de água contida na cana. A soma do brix, da fibra industrializável e da umidade, quando expressos em porcentagem de cana, resulta em 100%.

Para exemplificar esta terminologia apresentamos na Tabela 61 a composição tecnológica de duas variedades de cana bastante utilizadas no Brasil.

Tabela 61. Exemplo de composição tecnológica da cana

Variedade	Fibra da cana (%)	Caldo absoluto (%)	Umidade da cana (%)	Brix da cana (%)	Sacarose da cana (%)	Glicose + Frutose (%)	Não açúcares (%)
RB72454	10,9	89,1	71,1	18	15,5	0,6	02
SP87-396	10,8	89,2	69,4	17,5	17,5	0,4	02

Fonte: Fernandes (2003)

II. Termos e parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar e do processo produtivo

Açúcares redutores (AR): parâmetro empregado para designar os açúcares que apresentam a propriedade de reduzir o óxido de cobre do estado cúprico a cuproso. No caso da cana-de-açúcar, este termo refere-se à glicose e à frutose, sendo equivalente ao termo *açúcares invertidos*.

Açúcares redutores totais (ART): parâmetro técnico utilizado para representar todos os açúcares da cana na forma de açúcares redutores ou açúcares invertidos (também pode ser utilizado o termo *açúcares totais*).

Açúcares totais recuperáveis (ATR): parâmetro do sistema de pagamento de cana que representa a quantidade de ART recuperados no processo de fabricação de açúcar ou álcool. Ou seja, é o resultado da diferença entre o ART da cana e as perdas de ART no processo de fabricação.

Capacidade: refere-se ao volume disponível de algum equipamento, como por exemplo, o volume das dornas de fermentação existente na destilaria (*dorna* é o termo adotado para identificar os recipientes utilizados como reatores no processo de fermentação dos açúcares).

Eficiência: representada pela relação entre a quantidade de produto obtida pela unidade industrial e a quantidade de produto disponível na matéria-prima.

Extração: porcentagem de pol na cana que foi extraída pelas moendas (ou difusores) e está compondo o caldo.

Grau INPM (°INPM): unidade de medida do teor alcoólico de uma substância com base na relação de massa (massa de álcool na substância hidroalcoólica pela massa total da substância). Esta sigla é proveniente do Instituto Nacional de Pesos e Medidas (atualmente denominado INMETRO), dado que este instituto foi responsável pela padronização e implantação desta unidade no Brasil.

Margem de contribuição: diferença entre a receita líquida e os gastos variáveis. Para o setor sucroalcooleiro podemos ter a margem de contribuição agrônômica, margem de contribuição industrial e margem de contribuição agroindustrial. Neste trabalho analisamos a margem de contribuição agroindustrial.

Pol na cana (PC): indica toda sacarose aparente contida no caldo absoluto.

Produtividade: para esta dissertação, produtividade é a medida da quantidade de produto (cana, açúcar, álcool, melaço ou algum subproduto) obtido por unidade (ha) de área agrícola (p.ex., t de cana/ha).

Pureza (PZA): porcentagem de sacarose contida nos sólidos solúveis (*vide* definição de grau brix).

Pureza em ART (PZA_{ART}): porcentagem de açúcares redutores totais contidos nos sólidos solúveis. Utilizado para expressar a qualidade do caldo para a fermentação (fabricação de álcool).

Rendimento: medida da quantidade de produto por unidade de matéria-prima (kg de açúcar/t de cana; ou, m³ álcool/t de cana). O rendimento industrial está na dependência da qualidade da matéria-prima processada e é tratado como rendimento agroindustrial. No caso do álcool, o rendimento da destilaria pode ser determinado pelo volume de álcool produzido por quantidade de ART ou por quantidade de cana, dependendo da forma com que a matéria-prima está sendo tratada.

Setup: todas as atividades necessárias para efetuar uma troca entre processos de produção.

III. Termos e parâmetros dos açúcares e dos álcoois

É importante destacar que não existe especificação para todos os tipos de álcoois disponíveis no mercado, sendo necessária uma caracterização técnica das propriedades químicas e físicas do produto em negociação. Nesta dissertação nos restringiremos aos álcoois mais comumente produzidos pelo setor sucroalcooleiro do Brasil.

Álcool: denominação genérica de diversos compostos orgânicos (amílico, benzílico, butílico, cetílico, etílico etc.), que podem ser obtidos por fermentação de substâncias açucaradas ou amiláceas, ou mediante processo sintético. Nesta dissertação, quando utilizamos o termo *álcool*, estamos nos referindo ao álcool etílico obtido a partir de fermentação de substâncias açucaradas.

Álcool anidro (AEAC): álcool com teor alcoólico mínimo de 99,3 °INPM, também denominado *álcool etílico anidro carburante* ou *AEAC*. Utilizado para mistura com a gasolina.

Álcool hidratado (AEHC): álcool com teor alcoólico entre 92,6 °INPM e 93,8 °INPM, também denominado *álcool etílico hidratado carburante* ou *AEHC*. Utilizado como combustível em motores a álcool.

Álcool industrial (AEI): álcool produzido para fins industriais, com teor alcoólico de 94,0°INPM e características de acordo com as especificações do comprador.

Álcool neutro (AEN): denominação que engloba diversos tipos de álcoois, como o álcool fino e o álcool extrafino. Indica um produto com baixos teores de impurezas,

geralmente utilizado na indústria de bebidas, farmacêutica e de cosméticos. A graduação alcoólica é geralmente equivalente à adotada para o AEHC.

Açúcar: produto com propriedades adoçantes e corantes, decorrente da cristalização da sacarose. A Tabela 62 indica os principais tipos de açúcares de acordo com o teor de sacarose e a umidade de cada produto.

Tabela 62. Tipos de açúcares cristalizados de acordo com o teor de sacarose e a umidade

Nomenclatura dos açúcares	Graduação (°Z)	Umidade (%)
Cristal <i>standard</i>	99,3	0,0
Superior	99,5	0,0
Especial	99,7	0,0
Especial extra	99,8	0,0
VHP	99,3	0,1
VVHP	99,6	0,1
Demerara	98,8	0,2

Fonte: adaptada de Fernandes (2003)

Melaço (mel final): co-produto da fabricação de açúcar caracterizado por ser rico em potássio e em açúcares fermentescíveis. Normalmente utilizado como matéria-prima para várias indústrias, inclusive na fabricação de álcool etílico.