

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

**MODELAGEM DO PLANEJAMENTO AGREGADO DA PRODUÇÃO EM USINAS
COOPERADAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO ROBUSTA**

RAFAEL PIATTI OITICICA DE PAIVA

TESE DE DOUTORADO

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

**MODELAGEM DO PLANEJAMENTO AGREGADO DA PRODUÇÃO EM USINAS
COOPERADAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA E OTIMIZAÇÃO ROBUSTA**

Rafael Piatti Oiticica de Paiva

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

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

SÃO CARLOS
2009

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

P149mp

Paiva, Rafael Piatti Oiticica de.

Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta / Rafael Piatti Oiticica de Paiva. -- São Carlos : UFSCar, 2009. 241 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Planejamento da produção. 2. Agroindústria sucroalcooleira. 3. Programação inteira mista. 4. Otimização robusta. 5. Programação estocástica. I. Título.

CDD: 658.5038 (20^a)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Rafael Piatti Oiticica de Paiva

TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 24/04/2009 PELA
COMISSÃO JULGADORA:



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



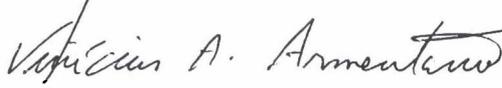
Prof. Dr. Moacir Godinho Filho
PPGE/UFSCar



Prof. Dr. Henrique Pacca Loureiro Luna
UFAL



Prof. Dr. João Alexandre Widmer
EESC/USP



Prof. Dr. Vinicius Amaral Armentano
FEEC/UNICAMP



Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE/UFSCar

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu saúde, motivação 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.

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

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 nesta tese, Professor Reinaldo Morabito, pela atenção, paciência e amizade que demonstrou desde o meu mestrado.

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

À Usina Santa Clotilde, à Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas e aos funcionários das duas empresas envolvidos na realização deste trabalho.

À minha noiva Mariana, pelo apoio e compreensão durante toda esta caminhada. Esta conquista também é sua!

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos de programação matemática para o planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético. Os modelos desenvolvidos devem considerar a relação hierárquica existente entre o planejamento anual de toda a cooperativa e o planejamento tático de safra de uma das usinas cooperadas. No nível de decisão da cooperativa o modelo deve indicar a meta de produção de cada usina e definir a política de estocagem e de atendimento da demanda. No nível de decisão da usina o modelo deve sugerir a quantidade de cana-de-açúcar colhida por fornecedor, a quantidade de cana transportada por prestador de serviço, a seleção dos processos de produção de açúcar, álcool, melaço e energia elétrica. Além disso, esta tese explora a aplicação de técnicas de otimização robusta para tratar incertezas inerentes aos parâmetros utilizados no processo decisório da cooperativa e de cada usina. Para resolver os modelos de programação linear e programação inteira mista, utilizou-se uma linguagem de modelagem algébrica e um *solver* de última geração de programação matemática. Um estudo de caso foi realizado na cooperativa regional dos produtores de açúcar e álcool do estado de Alagoas e na usina cooperada Santa Clotilde, localizada no município de Rio Largo-AL. Neste estudo, foi possível verificar a adequação dos modelos propostos quando aplicados para apoiar decisões envolvidas no planejamento agregado da produção das organizações estudadas. Resultados computacionais são apresentados e analisados, comparando o planejamento executado pelas empresas e os resultados obtidos com a modelagem.

Palavras-chave: Planejamento agregado de safra; programação linear inteira mista; otimização robusta; programação estocástica; setor sucroenergético.

ABSTRACT

The main concern of this work is related to the development of an aggregate production planning model of a cooperative society of sugar and alcohol milling companies. This mathematical model is based on a hierarquical approach between the annual planning problem of the cooperative and the tactical planning horizon of the sugarcane mills. In the cooperative level the main questions are related to the allocation of production goals to each mill and the management of inventory and dynamic demands. In the milling companies level a process selection model aims at helping the decision makers to determine 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, molasses and energy production. Besides that, this work presents an analysis of the impact of uncertainties in the aggregate planning problem parameters, using robust optimization techniques. To solve the linear and mixed integer mathematical problem found in this modeling, we applied a state of the art modelling language with an optimization solver. A case study was developed in a cooperative of sugar and alcohol milling companies located in the state of Alagoas-Brazil and at Santa Clotilde mill, located in the city of Rio Largo-AL. The results of this case study helped us to verify the applicability of the proposed models in the aggregate production planning of the studied organizations. Computational results are presented and analyzed with real data application.

Keywords: *aggregate production planning; mixed integer linear optimization; robust optimization; stochastic programming; sugarcane mills.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Níveis de planejamento e integração das várias etapas (Fonte: adaptado de Brunstein e Tomiya, 1995).....	22
Figura 2. Etapas da metodologia utilizada (Fonte: adaptada de Law e Kelton, 1991).....	25
Figura 3. Esquema representativo das sub-regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil...	28
Figura 4. Evolução da produção de cana-de-açúcar entre as safras 1998/1999 e 2007/2008 (Fonte: MAPA, 2008a; 2008b).....	29
Figura 5. Evolução da produção de açúcar e álcool entre as safras 1998/1999 e 2007/2008 (Fonte: MAPA, 2008a; 2008b).....	29
Figura 6. Receita por produto do setor canavieiro (Fonte: UNICA, 2008).....	31
Figura 7. Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)	34
Figura 8. Fluxograma das operações que compõem a etapa de CCT (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)	36
Figura 9. Fluxograma industrial de fabricação de açúcar, álcool, melaço e subprodutos (Fonte: Santa Elisa, 2005).....	39
Figura 10. Mapa de localização das usinas da CRPAAA (Fonte: Elaborado pelo autor).....	45
Figura 11. Horizontes de decisão e estratégias do PCP (Nahmias, 1995).....	50
Figura 12. Fluxo de material do primeiro nível de decisão do modelo PASUC.....	76
Figura 13. Fluxograma de correlacionamento entre os dois níveis do planejamento hierárquico	77
Figura 14. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e energia elétrica	78
Figura 15. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço	98
Figura 16. Demanda mínima a ser atendida (Anexo E)	110
Figura 17. Comparativo moagem modelo PASUC/N2, moagem planejada pela USC e moagem real	121
Figura 18. Comparativo de geração de energia por tonelada de cana – PASUC/N2	122
Figura 19. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2 e a dados da safra 2007/2008	122
Figura 20. Produção semanal do modelo PASUC/N2 (t ou m ³)	124
Figura 21. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2.....	124
Figura 22. Comparativo dos valores líquidos do açúcar cristal superior utilizados no modelo PASUC e valores reais ($VP^{Superior}_t$).....	129

Figura 23. Comparativo da eficiência global em ATR utilizada no modelo PASUC e valores reais ($E_{atr}^{USC^t}$).....	130
Figura 24. Comparativo do ATR da cana utilizado no modelo PASUC e valores reais (ATR^{USC^t}).....	131
Figura 25. Comparativo do tempo aproveitado utilizado no modelo PASUC e valores reais (ϕ_t).....	132
Figura 26. Comparativo da fibra da cana utilizada no modelo PASUC e valores reais ($Fibra_{mt}$).....	133
Figura 27. Percentual de incerteza em cada abordagem/cenário do modelo PASUC/N1-M-VP.....	156
Figura 28. Impacto dos parâmetros de robustez e variabilidade entre cenários na função objetivo do modelo PASUC/N1-M-VP/A2.....	159
Figura 29. Impacto dos parâmetros de robustez e variabilidade entre cenários na margem de contribuição provável do modelo PASUC/N1-M-VP/A2.....	160
Figura 30. Impacto dos parâmetros de robustez e variabilidade entre cenários na penalização por infactibilidade da função objetivo do modelo PASUC/N1-M-VP/A2.....	160
Figura 31. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2-M e a dados da safra 2007/2008.....	166
Figura 32. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2-M.....	166
Figura 33. Percentual de incerteza em cada abordagem do modelo PASUC/N1-B-VP.....	170
Figura 34. Impacto do grau de conservadorismo em PASUC/N1-B-VP/A1 e PASUC/N1-B-VP/A2.....	171
Figura 35. Impacto do grau de conservadorismo em PASUC/N1-B-VP/A1 e PASUC/N1-B-VP/A2 com Γ^{VP} pequeno.....	171
Figura 36. Impacto do grau de conservadorismo para PASUC/N2-B-VP/A1 e PASUC/N2-B-VP/A2.....	172
Figura 37. Limitante de violação da restrição Γ^{VP} e Γ^A	177
Figura 38. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2-B e a dados da safra 2007/2008.....	179
Figura 39. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2-B.....	179
Figura 40. Exemplo de cálculo do balanço de vapor e energia da USC.....	229
Figura 41. Exemplo de cálculo de rendimento e consumo de vapor de uma turbina.....	230

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados de produtividade da safra 1998/1999 a 2007/2008.....	28
Tabela 2. Evolução das exportações de açúcar entre 1998 e 2007.....	30
Tabela 3. Evolução mensal das exportações de álcool entre janeiro de 2006 e maio de 2008	30
Tabela 4. Previsão de dias disponíveis para moagem	106
Tabela 5. Previsão de moagem e capacidades de moagem, fabricação e destilação.....	107
Tabela 6. Capacidade máxima de produção das usinas por família de produtos ($CP_{max_{pu}}$) .	107
Tabela 7. Agrupamento em família de produtos	107
Tabela 8. Parâmetros considerados constantes para todos os períodos e usinas.....	108
Tabela 9. Conversão p/ t ATR ou ART produtos finais (CONSECANA-AL, 2008a).....	108
Tabela 10. Dados de eficiência global em ATR nas usinas.....	108
Tabela 11. Dados de ATR da cana (kg/t de cana)	109
Tabela 12. Capacidade máxima de estoque por família de produto ($E_{max_{pe}}$).....	109
Tabela 13. Estoque inicial por local de estoque e e produto p (I_{pe0})	109
Tabela 14. Custo de produção de cada produto por usina (\$/t ou m^3).....	111
Tabela 15. Custo de estocagem por produto por depósito (\$/t ou m^3)	111
Tabela 16. Relação entre períodos do modelo hierárquico e do modelo tático.....	112
Tabela 17. Dados para a determinação da matriz de rendimentos (A_{pkt}).....	113
Tabela 18. Dados auxiliares para o cálculo dos custos industriais, agrícolas e CCT.....	114
Tabela 19. Dados de entrada com variação em t	114
Tabela 20. Gastos e receitas semanais para o funcionamento da USC	115
Tabela 21. Dados de entrada para cálculo do balanço de energia	116
Tabela 22. Dados da cogeração de energia elétrica da USC	116
Tabela 23. Resultado da produção mensal da CRPAAA (t ou m^3) – PASUC/N1	118
Tabela 24. Tabela de atendimento da demanda por produto (t ou m^3) – PASUC-N1.....	119
Tabela 25. Resultado obtido para a meta de produção da USC (t ou m^3) – PASUC-N1	119
Tabela 26. Resultado moagem das usinas cooperadas (mil t) – PASUC-N1	120
Tabela 27. Comparativo entre a margem de contribuição do modelo PASUC-N1.....	120
Tabela 28. Comparação dos resultados globais – PASUC/N2.....	125
Tabela 29. Resultados do modelo PASUC/N1-M-VP/A1	157
Tabela 30. Resultados do modelo PASUC/N1-M-VP/A2	157
Tabela 31. Margem de contribuição do modelo PASUC/N1-M-VP (valores em \$).....	161
Tabela 32. Atendimento da demanda de açúcar refinado por abordagem/cenário - PASUC/N1-M-VP (t)	161

Tabela 33. Margem de contribuição do modelo PASUC/N1-M-EATR (valores em \$)	162
Tabela 34. Tabela de atendimento da demanda por produto (t ou m ³) – PASUC/N1-M.....	164
Tabela 35. Resultado obtido para a meta de produção da USC (t ou m ³) – PASUC/N1-M ..	165
Tabela 36. Comparação dos resultados globais de produção e exportação de energia - PASUC-M	167
Tabela 37. Comparação da margem de contribuição por cenário – PASUC/N1-M (mil \$)...	168
Tabela 38. Comparação da margem de contribuição por cenário – PASUC/N2-M (mil \$)...	168
Tabela 39. Tempo computacional PASUC/N2-B-VP/A1 e PASUC/N2-B-VP/A2 (segundos)	172
Tabela 40. Produção mensal do modelo PASUC-B-EATR	174
Tabela 41. Moagem mensal PASUC-B-EATR	174
Tabela 42. Tabela de limitantes de violação da restrição do modelo de otimização robusta.	176
Tabela 43. Tabela de atendimento da demanda por produto (t ou m ³) – PASUC/N1-B.....	177
Tabela 44. Resultado obtido para a meta de produção da USC (t ou m ³) – PASUC/N1-B ...	178
Tabela 45. Comparação dos resultados globais – PASUC/N1-B	180
Tabela 46. Comparação dos resultados globais – PASUC/N2-B	180
Tabela 47. Resumo dos modelos analisados	182
Tabela 48. Exemplo de composição tecnológica da cana	200
Tabela 49. Tipos de açúcares cristalizados de acordo com o teor de sacarose e a umidade ..	203
Tabela 50. Lista de processos	209
Tabela 51. Legenda dos calendários apresentados no Anexo C.....	215
Tabela 52. Resumo de duração prevista da safra para cada usina.....	215
Tabela 53. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Capricho (CAP).....	216
Tabela 54. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Paise (PAI)	217
Tabela 55. Calendário da safra 2007/2008 da destilaria Porto Alegre (PAL).....	218
Tabela 56. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Porto Rico (PRI).....	219
Tabela 57. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Santa Clotilde (USC).....	220
Tabela 58. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Santa Maria (USM)	221
Tabela 59. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Seresta (SER)	222
Tabela 60. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Sinimbu (SIN)	223
Tabela 61. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Sumaúma (USU)	224
Tabela 62. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Triunfo (TRI).....	225
Tabela 63. Moagem de cana por mês na safra 2007/2008.....	226
Tabela 64. Dados de previsão de moagem e capacidade de moagem das usinas.....	226

Tabela 65. Produção máxima em sacos de açúcar ou litros de álcool por dia.....	227
Tabela 66. Produção diária máxima em toneladas de açúcar ou metros cúbicos de álcool ...	227
Tabela 67. Demanda mínima e máxima estabelecida para o modelo PASUC/N1.....	228
Tabela 68. Preço de produtos do modelo PASUC/N1.....	228

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

\$	Unidade monetária
°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
AEHCren	Álcool Etílico Hidratado Carburante tipo REN
AEI	Álcool Etílico Industrial
AEN	Álcool Etílico Neutro
AR	Açúcares Redutores
ART	Açúcares Redutores Totais
Aterc	Armazéns de açúcar terceirizados
ATR	Açúcares Totais Recuperáveis
C/S	Centro/Sul
CAP	Usina Capricho
CCT	Corte, Carregamento e Transporte
CLSP	<i>Capacitated Lot-Sizing Problem</i>
CONSECANA	Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool
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>
EMPAT	Empresa Alagoana de Terminais
Eterc	Tanques de álcool terceirizados
FOB	<i>Free On Board</i>
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>

JAR	Central de armazéns de açúcar do Jaraguá
MCH	Micro Central Hidroelétrica
MD01	Central de armazéns de açúcar de Marechal Deodoro
Mprop	Cana própria
Mforn	Cana de fornecedores
N/N	Norte/Nordeste
PASUC	Modelo de Planejamento Agregado de Safra em Usinas Cooperadas do setor sucroenergético
PASUC/N1	Nível 1 do modelo PASUC (Planejamento de safra da cooperativa)
PASUC/N2	Nível 2 do modelo PASUC (Planejamento tático de safra de uma usina cooperada incorporando cogeração de energia)
PASUC/N1-B-VP	Modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim com incerteza no preço dos produtos do nível 1 do modelo PASUC
PASUC/N1-B-EATR	Modelo de otimização robusta Bertsimas-Thiele com incerteza na eficiência global das usinas do nível 1 do modelo PASUC
PASUC/N2-B-A	Modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim com incerteza na matriz de rendimentos industriais do nível 2 do modelo PASUC
PASUC/N2-B-PHI	Modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim com incerteza no tempo aproveitado do nível 2 do modelo PASUC
PASUC-B	Modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim com incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos, nível 1 e 2 do modelo PASUC
PASUC/N1-M-VP	Modelo de programação estocástica robusta com incerteza no preço dos produtos do nível 1 do modelo PASUC
PASUC/N1-M-EATR	Modelo de programação estocástica robusta com incerteza na eficiência global das usinas do nível 1 do modelo PASUC
PASUC/N2-M-A	Modelo de programação estocástica robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais do nível 2 do modelo PASUC
PASUC/N2-M-PHI	Modelo de programação estocástica robusta com incerteza no tempo aproveitado do nível 2 do modelo PASUC
PASUC-M	Modelo de programação estocástica robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos, nível 1 e 2 do modelo PASUC
PAI	Usina Paise
PAL	Destilaria Porto Alegre
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
PRI	Usina Porto Rico
Prock	Abreviação de Processo k
PUI	Período de Utilização Industrial
PZA	Pureza em pol
PZA _{ART}	Pureza em ART
s.a.	Sujeito a
Semt	Abreviação de Semana t
SER	Usina Seresta
SIM	Usina Sinimbu
SPDL	Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes
SPDL/PU2	Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes aplicado ao Planejamento agregado da produção em Usinas de açúcar e álcool, segunda versão
TAB	Central de armazéns de açúcar do Tabuleiro
TRI	Usina Triunfo
Tpetro	Terminal de estocagem de álcool da Transpetro
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
USC	Usina Santa Clotilde
USM	Usina Santa Maria
USU	Usina Sumaúma
VHP	<i>Very High Polarization</i>
VHPe	<i>Very High Polarization Especial</i>
VHP+	<i>Very High Polarization plus</i>
VVHP	<i>Very Very High Polarization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Apresentação	17
1.2	Objetivos e delimitação do problema	19
1.3	Justificativa.....	20
1.4	Metodologia.....	23
1.5	Organização do trabalho	25
2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	27
2.1	A agroindústria canavieira no Brasil	27
2.2	O processo de produção de açúcar, álcool e energia elétrica	32
2.2.1	Etapa agrícola	33
2.2.2	Etapa de corte, carregamento e transporte.....	35
2.2.3	Etapa industrial	36
2.3	Planejamento de safra no setor sucroenergético.....	40
2.3.1	Planejamento de safra em usinas cooperadas	41
2.4	Estudo de caso	45
2.4.1	Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas	45
2.4.2	Usina Santa Clotilde	46
3	REVISÃO DA LITERATURA RELACIONADA	49
3.1	Planejamento agregado hierárquico.....	49
3.2	Modelagem matemática de otimização	50
3.3	Modelos determinísticos.....	51
3.3.1	Modelos determinísticos aplicados ao planejamento agregado.....	52
3.3.2	Modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes	53
3.4	Otimização sob incerteza.....	57
3.4.1	Modelo estocástico baseado em restrições de chance	58
3.4.2	Modelo de programação estocástica em dois estágios com recurso.....	59
3.4.3	Modelo de programação estocástica robusta	61
3.4.4	Modelo de otimização robusta de Soyster	64
3.4.5	Modelo de otimização robusta de Bertsimas e Sim.....	66
3.4.6	Modelo de otimização robusta de Bertsimas e Thiele.....	71
4	MODELAGEM DETERMINÍSTICA.....	74
4.1	Modelo de Planejamento Agregado de Safra em Usinas Cooperadas do setor sucroenergético (PASUC)	74

4.2	Nível 1 - Planejamento de safra da cooperativa (PASUC/N1).....	79
4.3	Nível 2 - Planejamento tático de safra de uma usina cooperada incorporando cogeração de energia (PASUC/N2).....	84
4.4	Geração de parâmetros do modelo PASUC/N2	94
4.4.1	Parâmetros calculados com dados de saída do modelo PASUC/N1	94
4.4.2	Parâmetros da matriz de rendimentos industriais	96
4.4.3	Parâmetros de custo industrial e custo agrícola.....	102
5	RESULTADOS DOS MODELOS DETERMINÍSTICOS	106
5.1	Coleta de dados dos modelos determinísticos	106
5.1.1	Dados utilizados no modelo de planejamento da CRPAAA (PASUC/N1).....	106
5.1.2	Dados utilizados no modelo de planejamento da USC (PASUC/N2).....	111
5.2	Resultados computacionais do modelo PASUC.....	117
5.2.1	Comparação entre resultados do modelo PASUC e dados da safra 2007/08	117
5.2.2	Tempos computacionais de solução (PASUC/N1 e PASUC/N2).....	125
5.3	Considerações sobre a utilização do modelo PASUC	126
6	MODELAGEM SOB INCERTEZA	128
6.1	Análise da incerteza nos parâmetros do modelo PASUC	128
6.2	Modelagem de programação estocástica robusta	134
6.2.1	Incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-M-VP).....	134
6.2.2	Incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-M-EATR).....	137
6.2.3	Incerteza na matriz de rendimentos industriais (PASUC/N2-M-A).....	139
6.2.4	Incerteza no tempo aproveitado (PASUC/N2-M-PHI)	144
6.3	Modelagem de otimização robusta Bertsimas-Sim e Bertsimas-Thiele.....	145
6.3.1	Incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-B-VP).....	145
6.3.2	Incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-B-EATR).....	147
6.3.3	Incerteza na matriz de rendimentos industriais (PASUC/N2-B-A).....	150
6.3.4	Incerteza no tempo aproveitado (PASUC/N2-B-PHI)	154
7	RESULTADOS DOS MODELOS SOB INCERTEZA	155
7.1	Resultados do modelo de programação estocástica robusta.....	155
7.1.1	Resultados do modelo de programação estocástica robusta com incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-M-VP).....	155
7.1.2	Resultados do modelo de programação estocástica robusta com incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-M-EATR).....	162

7.1.3	Resultados do modelo de programação estocástica robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos (PASUC-M)	162
7.2	Resultados do modelo de otimização robusta.....	169
7.2.1	Resultados do modelo de otimização robusta com incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-B-VP)	169
7.2.2	Resultados do modelo de otimização robusta com incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-B-EATR).....	173
7.2.3	Resultados do modelo de otimização robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos (PASUC-B).....	175
7.3	Considerações sobre os testes executados	181
8	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	186
8.1	Considerações finais	186
8.2	Perspectivas para pesquisa futura	188
	REFERÊNCIAS	190
	GLOSSÁRIO.....	199
	ANEXO A – Modelo de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes para o Planejamento de Usinas (SPDL/PU2)	204
	ANEXO B – Lista de processos utilizados no estudo de caso	208
	ANEXO C – Calendário de funcionamento das usinas cooperadas	215
	ANEXO D – Dados relacionados com a capacidade das usinas cooperadas	226
	ANEXO E – Dados relacionados com demanda e preços dos produtos	228
	ANEXO F – Planilhas de rendimentos e fluxograma de balanço de vapor e energia.....	229
	ANEXO G – Resultados obtidos no cenário do modelo estratégico da CRPAAA.....	231
	ANEXO H – Resultados obtidos no cenário do modelo tático da USC.....	237

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 e o álcool foram responsáveis por 7,6 bilhões de dólares em exportações durante o ano de 2007, o que corresponde a 4,75% do total das exportações brasileiras no mesmo período (MDIC, 2008a, 2008b; SECEX, 2008), quanto na geração de emprego, em que o setor admite direta e indiretamente mais de quatro milhões de pessoas (ProCana, 2008).

O setor sucroalcooleiro do Brasil é um dos pioneiros no que diz respeito ao aproveitamento em larga escala da agroenergia, onde destaca-se a utilização 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 Quioto.

Além destes fatores, o Brasil é, atualmente, o maior produtor de açúcar do mundo, o segundo maior produtor de álcool e o maior exportador dos dois produtos. Segundo dados apresentados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o setor canavieiro processou na safra 1998/1999 o equivalente a 315,6 milhões de toneladas de cana, que geraram 17,96 milhões de toneladas de açúcar e 13,9 milhões de metros cúbicos de álcool (MAPA, 2008b). Na safra 2007/2008 foram processadas 493,4 milhões de toneladas de cana, com produção de 31,1 milhões de toneladas de açúcar e 22,4 milhões de metros cúbicos de álcool (MAPA, 2008a). Estes dados mostram um crescimento acelerado de 56,3% na quantidade de cana processada em apenas dez safras, fazendo com que a agroindústria canavieira seja um dos setores mais dinâmicos da economia brasileira.

As perspectivas de crescimento do setor continuam altas para os próximos anos. Vários projetos de investimento encontram-se em curso no Brasil para elevar a capacidade instalada de produção. Estimativas do setor produtivo indicam investimentos da ordem de US\$ 33 bilhões até 2012 (US\$ 23 bilhões na área industrial e US\$ 10 bilhões na área agrícola), fazendo com que o número total de unidades produtoras aumente de 370 (115 produtoras de álcool, 15 de açúcar e 240 de açúcar e álcool) para 470 (MDIC, 2008c). Para a safra 2008/2009, a expectativa é de uma moagem total entre 558,1 e 579,8 milhões de

toneladas de cana, o que corresponde a um aumento de 11,3% a 15,6% do obtido na safra passada (CONAB, 2008).

Toda esta dinâmica apresentada pelo setor canavieiro vem acompanhada de mudanças nas estratégias competitivas adotadas pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira (Belik e Vian, 2002; Vian, 2003). Dentre as principais estratégias competitivas que estão sendo adotadas deve-se destacar: o aprofundamento da especialização na produção de açúcar, álcool e energia; a busca por diferenciação de produto; a diversificação produtiva; a concentração do setor por meio de fusões e aquisições; a formação de grupos de comercialização (ou *pools*) de açúcar e álcool; e a verticalização da cadeia produtiva.

Uma das conseqüências deste processo de re-direcionamento estratégico das usinas é a crescente dificuldade que os profissionais de Planejamento e Controle da Produção (PCP) estão tendo em programar os processos de produção das usinas de açúcar e das destilarias de álcool. 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, à determinação da moagem semanal, à seleção dos processos de produção utilizados em cada semana, além da política de estoque e distribuição de produtos acabados. Para tanto, deve-se levar em consideração a melhor utilização dos recursos produtivos, os 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 pela empresa (Paiva, 2006).

Além dos pontos apresentados anteriormente, é interessante destacar que a agroindústria sucroenergética possui algumas peculiaridades que influenciam bastante no planejamento da produção. Dentre estas peculiaridades, deve-se destacar a sazonalidade, o alto custo relativo da matéria-prima (cerca de 60% do custo dos produtos finais), a perecibilidade desta matéria-prima após a colheita e a dificuldade de determinar de forma exata os parâmetros utilizados em um modelo de planejamento.

1.2 Objetivos e delimitação do problema

O objetivo principal desta tese é desenvolver e aplicar modelos de planejamento agregado de safra para um conjunto de usinas que fazem parte de um sistema cooperado de comercialização de açúcar e álcool, considerando incerteza nos parâmetros de entrada do modelo e buscando maximizar a margem de contribuição do sistema como um todo. Modelos deste tipo devem auxiliar de forma importante no planejamento agregado da produção de uma usina ou de várias usinas, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises feitas, abrindo portas para uma melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema e propiciando uma maior proteção contra variação nos parâmetros adotados inicialmente no planejamento de safra.

Para alcançar a meta principal deste estudo são propostos dois objetivos específicos. O primeiro é a elaboração de um modelo determinístico de otimização para representar as decisões envolvidas no planejamento agregado de safra de uma cooperativa e de suas usinas. O segundo objetivo específico é desenvolver uma extensão do modelo determinístico para tratar as incertezas que impactam no processo decisório da cooperativa e das usinas e, desta forma, ampliar o potencial da aplicação e o poder de análise do decisor.

Ao analisar o processo de planejamento agregado de safra de um conjunto de usinas cooperadas, admite-se uma relação hierárquica entre o planejamento anual de produção e comercialização da cooperativa (primeiro nível de decisão) e o planejamento tático de safra de uma das usinas cooperadas (segundo nível de decisão). O problema é abordado por meio de programação matemática, em particular, programação linear (PL) para o primeiro nível e programação linear inteira mista para o segundo nível (PIM).

O modelo determinístico desenvolvido deve auxiliar na definição do mix de produção de toda a cooperativa, na alocação de metas de produção para as usinas, na determinação da política de estoque e de comercialização do sistema cooperado. Além destas decisões no âmbito da cooperativa, o modelo deve também auxiliar na definição da moagem semanal, na seleção dos prestadores de serviço de transporte de cana, dos processos produtivos industriais e da quantidade de energia elétrica exportada de cada usina. Para tanto, propõe-se uma extensão do modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção, apresentado por Paiva (2006) e Paiva e Morabito (2007; 2008), que foi desenvolvido para o planejamento de uma usina de açúcar e álcool não cooperada sem considerar a cogeração de energia.

Para tratar das incertezas nos parâmetros de entrada do modelo aqui proposto, pretende-se estudar a aplicação de modelos de otimização sob incerteza, particularmente, modelos de programação estocástica robusta (Mulvey *et al.*, 1995) e otimização robusta (Bertsimas e Sim, 2003; Bertsimas e Thiele, 2006). A programação estocástica robusta é uma abordagem de modelagem que integra conceitos de programação de metas e de programação estocástica em dois estágios com recurso. Esta abordagem pretende obter uma solução com pequena deterioração da função objetivo e que permaneça factível para os cenários considerados na análise (Mulvey *et al.*, 1995). No caso da otimização robusta, tem-se uma técnica de pior caso que pretende obter soluções que minimizem o desvio máximo das variáveis aleatórias consideradas, de forma que seja assegurada a factibilidade do problema, sem grande perda de otimalidade, e sem considerar as distribuições de probabilidade associadas (Bertsimas e Sim, 2003). Ambas as técnicas pretendem agregar maior flexibilidade no controle do conservadorismo adotado na análise da incerteza e, por isso, são identificadas nesta tese pelo termo “otimização robusta”. Caso seja importante diferenciar as duas abordagens utiliza-se a denominação apresentada anteriormente neste parágrafo.

Vale lembrar que os processos de produção das usinas brasileiras não apresentam variações significativas, fazendo com que sejam necessárias pequenas modificações para adaptar os modelos propostos nesta tese à realidade de outras empresas do setor.

1.3 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, percebe-se 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 tecno-econômica 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 de programação matemática para abordar 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. Kawamura *et al.* (2006) 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). Iannoni e Morabito (2002; 2006) estudaram o sistema de recepção de cana de uma usina utilizando simulação discreta para analisar a logística de transporte de cana. Xavier (2008) apresentou um modelo de localização desenvolvido para identificar regiões promissoras para a construção de centros de estocagem ou distribuição de álcool dentro do território brasileiro.

Em outros países produtores de cana-de-açúcar (p.ex., Austrália, Cuba, Colômbia), a utilização de métodos quantitativos aplicados aos problemas da indústria sucroalcooleira teve início anteriormente. Dentre os principais trabalhos, destaca-se 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) aplicaram 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 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, percebe-se que existe um esforço crescente em desenvolver e aplicar modelos e métodos quantitativos para auxiliar nas decisões das principais operações do setor sucroenergético, 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 (Corte, Carregamento e Transporte) e para o estoque de produtos finais.

Na etapa industrial, grande parte dos esforços 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).

Recentemente, Paiva e Morabito (2007; 2008) apresentaram um modelo de otimização de PIM aplicado ao planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. Este modelo determinístico mostrou-se adequado para aplicações no planejamento de safra de uma usina típica, apoiando parte das principais decisões do PCP da etapa industrial de produção de açúcar e álcool. Além de propiciar uma integração entre o modelo econômico/estratégico da empresa, os modelos de planejamento tático discutidos nesta seção (etapa industrial, agrícola, CCT e comercialização/distribuição) e as ferramentas de controle e de custos gerenciais, conforme ilustrado na Figura 1.

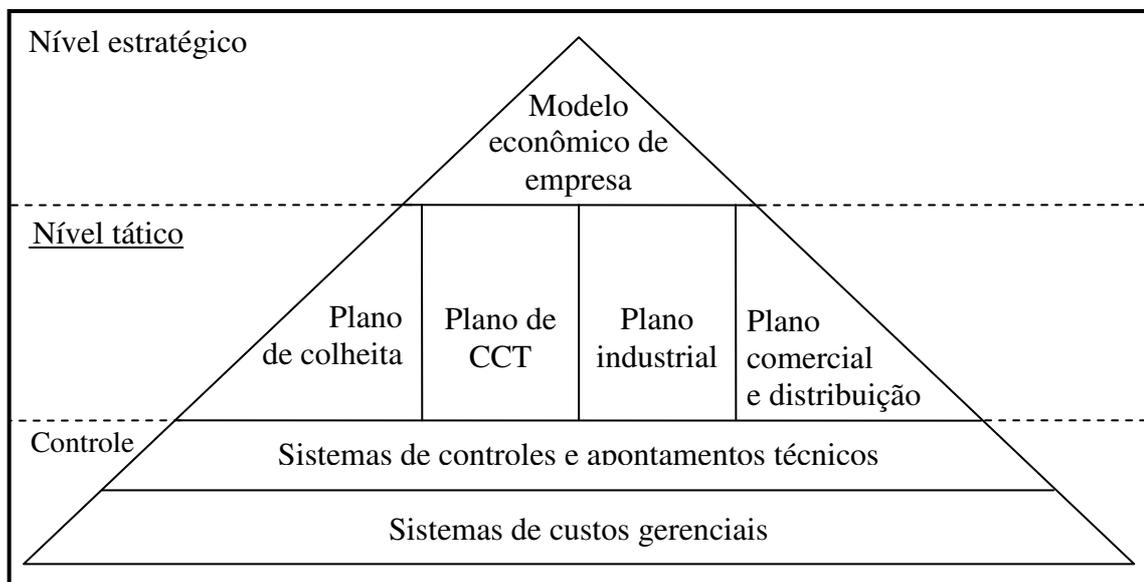


Figura 1. Níveis de planejamento e integração das várias etapas (Fonte: adaptado de Brunstein e Tomiya, 1995)

A partir do trabalho desenvolvido por Paiva e Morabito (2007; 2008), pretende-se desenvolver os modelos de planejamento agregado de safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético para o presente estudo.

A principal diferença entre a abordagem de Paiva e Morabito (2007; 2008) e a abordagem proposta nesta tese é a suposição, feita por Paiva e Morabito (2007; 2008), de que uma usina cooperada pode executar o seu planejamento desconsiderando o planejamento da

cooperativa e das outras usinas cooperadas. Para contornar esta limitação, adota-se nesta tese uma estratégia de planejamento hierárquico da produção, onde o primeiro nível corresponde ao planejamento agregado de safra da cooperativa, considerando todas as usinas cooperadas, e o segundo nível corresponde ao planejamento agregado de safra de uma usina desse sistema cooperado. Desta forma, o modelo proposto por Paiva e Morabito (2007; 2008) pode ser aplicado para usinas não cooperadas e com produção diversificada. Já o modelo proposto nesta tese é mais recomendado para usinas cooperadas, em particular para usinas que fazem parte da Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas (CRPAAA), organização onde o estudo de caso desta tese foi realizado.

Outra diferença que pode ser destacada entre a abordagem de Paiva e Morabito (2007; 2008) e a abordagem proposta nesta tese é a incorporação da cogeração de energia. Nesta abordagem, inclui-se a cogeração de energia como parte integrante do processo de decisão, considerando desde a necessidade de vapor para os processos de moagem, destilação de álcool e fabricação do açúcar, até a exportação e comercialização da energia excedente.

Além dos pontos apresentados acima, é interessante notar que a agroindústria sucroenergética possui muitas incertezas inerentes ao seu processo de planejamento. Incertezas com relação ao mercado de *commodities*, incertezas relativas à matéria-prima, incertezas relativas ao processo de produção. Desta forma, percebe-se a importância de também estudar a utilização de modelos de otimização sob incerteza, de forma que seja possível agregar maior poder de análise ao modelo proposto.

1.4 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) e Bertrand e Fransoo (2002), 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, levantados os dados relativos à lógica de planejamento do sistema cooperado e revisada a literatura técnica de produção de açúcar, álcool e energia. As informações colhidas foram utilizadas para modelar o processo de planejamento hierárquico da cooperativa e o sistema de cogeração de energia na usina;

- (b) *Coleta de dados*: consiste na obtenção dos dados históricos e parâmetros utilizados pelo PCP da empresa, além dos valores máximos e mínimos dos parâmetros considerados incertos nos modelos de otimização robusta. Nesta etapa, contou-se com o apoio da Usina Santa Clotilde (USC) e da Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas (CRPAAA) para obtenção dos dados de medições, boletins e relatórios internos;
- (c) *Modelagem*: representação do modelo conceitual por um modelo científico. Após uma análise mais detalhada das modificações necessárias no modelo de referência (Paiva e Morabito, 2008), iniciou-se o desenvolvimento de um modelo de otimização matemática incorporando os conceitos do planejamento hierárquico ao planejamento de safra da empresa em questão e incorporando técnicas de otimização robusta em um segundo estágio da modelagem;
- (d) *Experimento*: processo de obtenção de uma solução para o modelo científico. O quarto passo foi implementar os modelos propostos utilizando uma linguagem de modelagem algébrica e um *solver* de PL e PIM;
- (e) *Validação*: verificar se o modelo científico corresponde à realidade ou ao recorte da realidade considerado. Nesta etapa, contou-se com o apoio da USC e da CRPAAA para análise e validação dos resultados dos experimentos executados, assim como na elaboração de comparativos entre os dados de saída do modelo e os 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 inclui-se tanto a redação desta tese e as discussões e análises com os decisores da empresa, quanto os ajustes necessários para adequação do modelo proposto ao sistema real.

A Figura 2 resume as etapas da abordagem metodológica utilizada nesta tese, com destaque para as setas que conectam as etapas e ilustram a possibilidade de retornar a etapas anteriores para correções ou melhorias na modelagem.

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 e Fransoo, 2002).

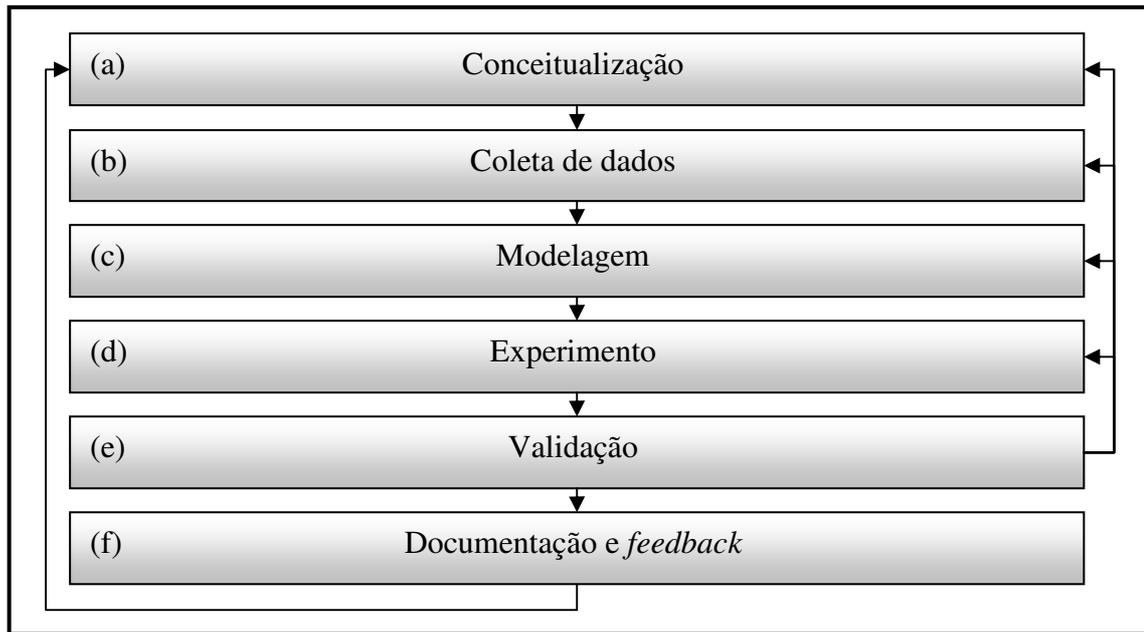


Figura 2. Etapas da metodologia utilizada (Fonte: adaptada de Law e Kelton, 1991)

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em oito capítulos, sendo o primeiro o capítulo introdutório. No capítulo 2, apresenta-se brevemente a agroindústria canieira no Brasil, seguindo-se de uma apresentação de sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e do processo de produção de açúcar, álcool, e energia elétrica. Este capítulo é finalizado com uma discussão mais detalhada das estratégias de comercialização adotadas no setor sucroenergético e do sistema de PCP de todo o sistema cooperado, além de uma discussão mais aprofundada do escopo desta tese.

No capítulo 3, faz-se uma breve introdução às questões gerais envolvidas no planejamento e controle da produção e, na seqüência, apresenta-se uma breve revisão dos modelos determinísticos de PL, PIM e das técnicas de otimização sob incerteza, tais como, restrições de chance, programação estocástica em dois estágios com recurso, programação estocástica robusta, e otimização robusta. Toda esta discussão serve de base para desenvolver as modelagens apresentadas no capítulo 4 e 6.

O capítulo 4 descreve toda a estrutura do modelo determinístico de Planejamento Agregado de Safra em Usinas Cooperadas do setor sucroenergético (PASUC), proposto nesta tese. Considerando, inicialmente, o primeiro nível do planejamento hierárquico que trata do planejamento agregado de safra da cooperativa (PASUC/N1), o modelo de planejamento de safra da usina, incorporando a cogeração de energia (PASUC/N2), e, por fim, a geração de parâmetros do modelo de planejamento de safra da usina. O capítulo 5

discute o processo de coleta de dados desenvolvida para o estudo de caso (safra 2007/2008) e os resultados computacionais encontrados na aplicação do modelo PASUC.

No capítulo 6, inicialmente, descreve-se o conjunto de parâmetros incertos considerados e, em seguida, apresenta-se o desenvolvimento dos modelos de otimização sob incerteza considerados nesta tese. No capítulo 7, são apresentados os resultados da incorporação da incerteza nos modelos apresentados no capítulo anterior, juntamente com os dados de entrada apresentados no capítulo 5.

As conclusões e sugestões de pesquisas futuras são apresentadas no capítulo 8.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

2.1 A agroindústria canavieira no Brasil

Esta seção não pretende revisar 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 e Sicsú, 2001; Moraes, 2002; Belik e Vian, 2002; Vian, 2003; MAPA, 2008b). 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 algumas características das sub-regiões produtoras do Brasil.

A agroindústria sucroalcooleira no Brasil é comumente dividida em duas sub-regiões, Centro/Sul (C/S) e Norte/Nordeste (N/N) (Figura 3), com um total de 370 unidades produtoras (240 unidades mistas, 115 destilarias e 15 produtoras de açúcar), cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia do MAPA até 22 de novembro de 2007 (MAPA, 2008c). Este sistema agroindustrial possui números expressivos tanto na geração de divisas, na qual o açúcar e o álcool foram responsáveis por 7,6 bilhões de dólares em exportações no ano de 2007, o que corresponde a 4,75% do total das exportações brasileiras no mesmo período (MDIC, 2008a, 2008b; SECEX, 2008), quanto na geração de emprego, em que o setor admite direta e indiretamente mais de quatro milhões de pessoas (ProCana, 2008).

Conforme mencionado no capítulo 1, o Brasil é atualmente o maior produtor de açúcar do mundo, o segundo maior produtor de álcool e o maior exportador dos dois produtos. Segundo dados apresentados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o setor canavieiro processou na safra 1998/1999 o equivalente a 315,6 milhões de toneladas de cana, que geraram 17,96 milhões de toneladas de açúcar e 13,9 milhões de metros cúbicos de álcool (MAPA, 2008b). Na safra 2007/2008 foram processadas 493,4 milhões de toneladas de cana, com produção de 31,1 milhões de toneladas de açúcar e 22,4 milhões de metros cúbicos de álcool (MAPA, 2008a). Estes dados mostram um crescimento acelerado de 56,3% na quantidade de cana processada em apenas dez safras, 73,2% na produção de açúcar e 61,2% na produção de álcool. Na Tabela 1 é possível verificar a variação destas medidas desde a safra 1998/1999 até a safra 2007/2008, tanto para a sub-região N/N como para o C/S.

Por meio destes dados, pode-se 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 no mix de produção de ambas as regiões, com uma pequena diminuição na porcentagem de álcool produzido do total de cana-de-açúcar processada (Figura 5).

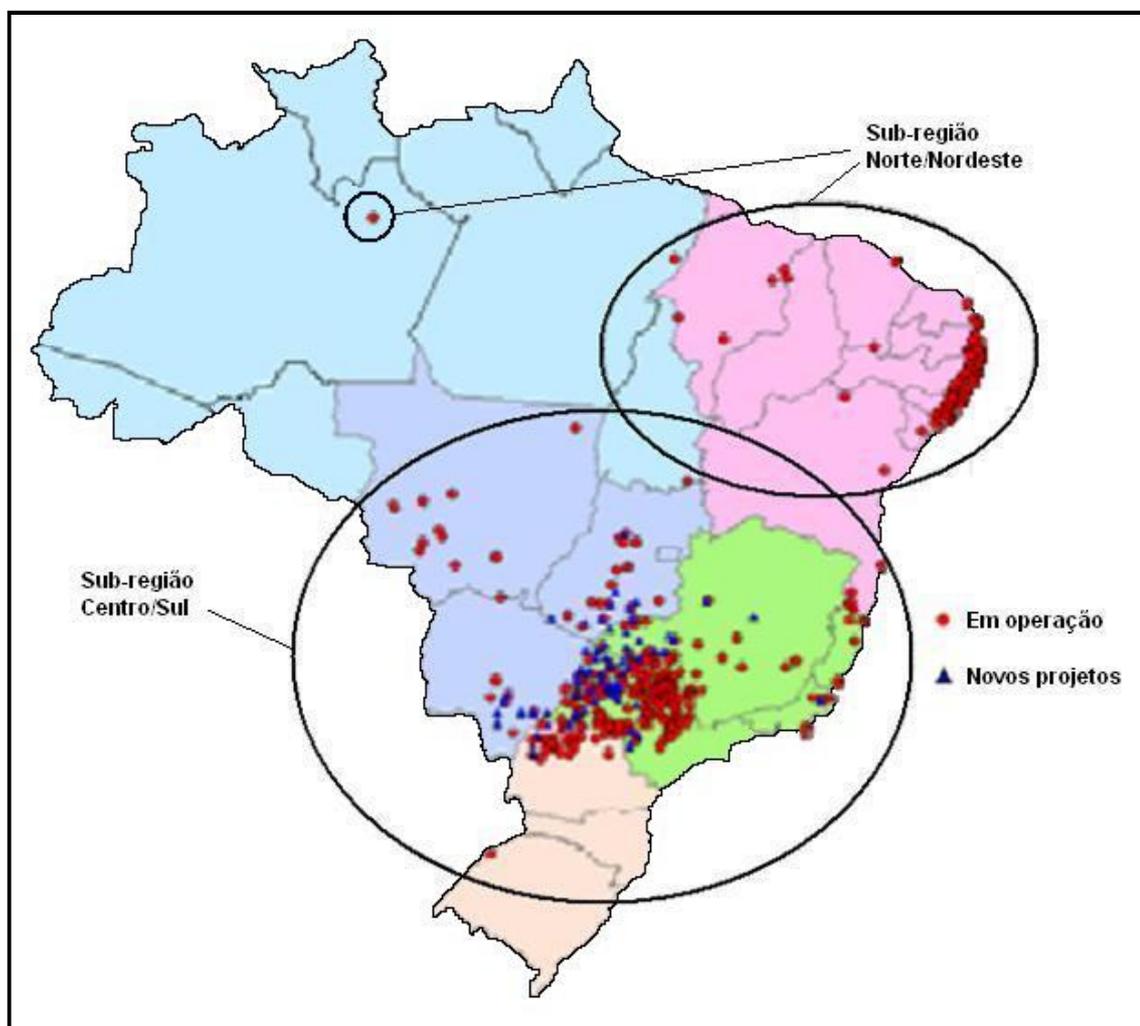


Figura 3. Esquema representativo das sub-regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil

Tabela 1. Dados de produtividade da safra 1998/1999 a 2007/2008

Safra	Cana (mil toneladas)		Açúcar (toneladas)		Álcool (m ³)	
	C/S	N/N	C/S	N/N	C/S	N/N
1998/1999	268.911	46.730	15.097.275	2.863.312	12.267.168	1.659.653
1999/2000	267.004	43.119	16.892.776	2.487.421	11.698.456	1.379.309
2000/2001	205.203	49.718	12.465.973	3.554.367	8.990.317	1.527.218
2001/2002	243.505	48.824	15.748.527	3.245.836	10.107.831	1.359.964
2002/2003	265.878	50.243	18.592.131	3.789.205	11.014.285	1.471.141
2003/2004	297.121	59.990	20.451.796	4.492.638	12.916.507	1.723.416
2004/2005	324.054	57.393	22.095.985	4.536.089	13.382.123	1.825.786
2005/2006	334.137	48.345	22.406.502	3.807.889	14.298.845	1.509.339
2006/2007	373.913	53.607	26.543.029	4.086.798	16.160.925	1.748.897
2007/2008	431.234	62.200	26.472.055	4.589.017	20.252.621	2.133.390

Fonte: MAPA (2008a, 2008b)

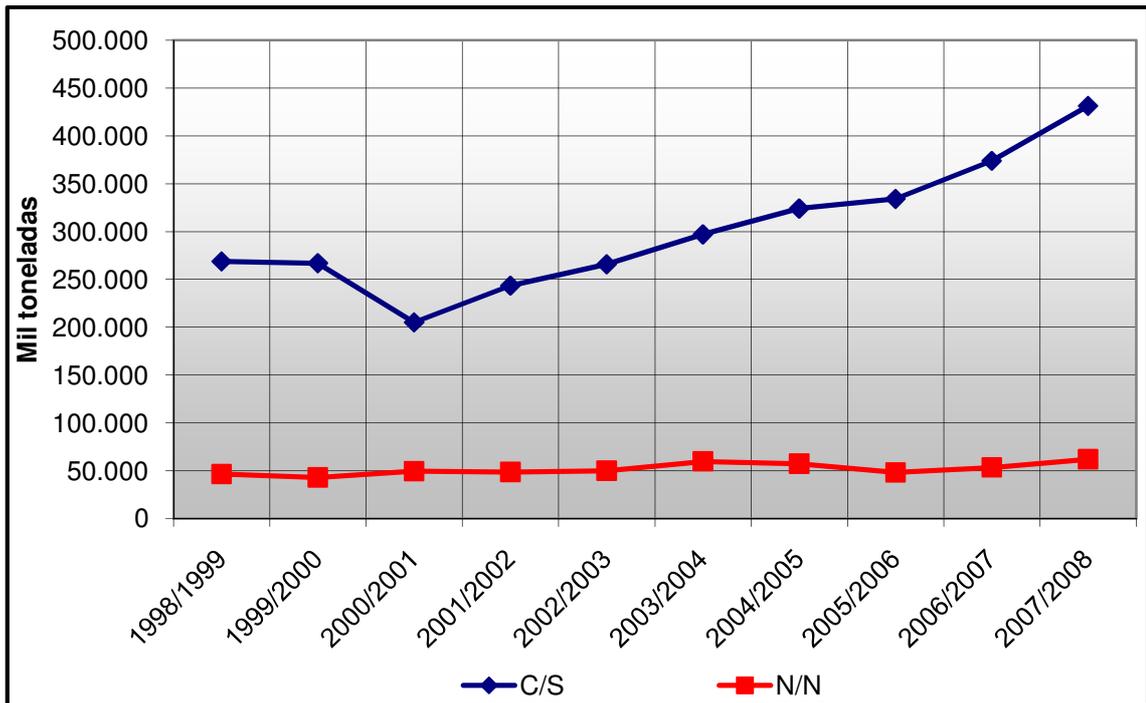


Figura 4. Evolução da produção de cana-de-açúcar entre as safras 1998/1999 e 2007/2008 (Fonte: MAPA, 2008a; 2008b)

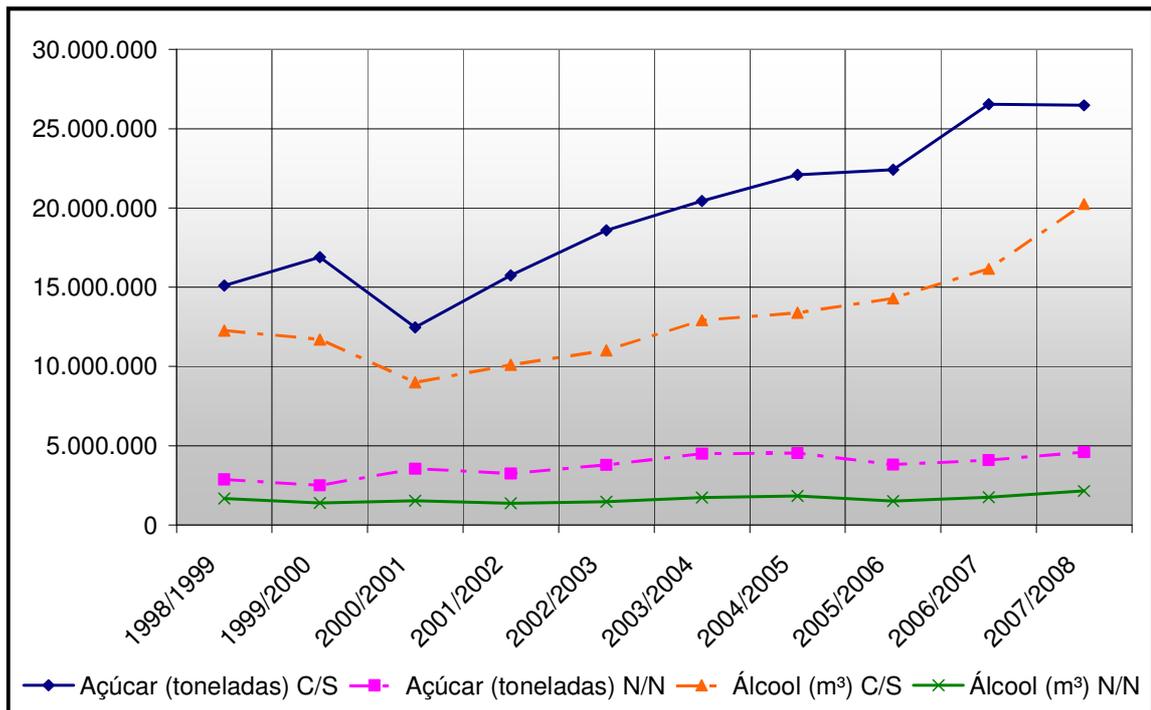


Figura 5. Evolução da produção de açúcar e álcool entre as safras 1998/1999 e 2007/2008 (Fonte: MAPA, 2008a; 2008b)

As exportações brasileiras de açúcar também apresentaram crescimento representativo nos últimos anos. Segundo dados do MDIC (2008a), o Brasil exportou 8.371 mil toneladas de açúcar em 1998 e obteve uma receita de 1.943 milhões de US\$ FOB. No ano de 2007, as exportações de açúcar geraram uma receita de 6.167 milhões de US\$ FOB com a

negociação de 18.870 mil toneladas. Estes dados mostram um aumento de 217,4% na receita de exportação, considerando a receita em dólares, e de 125,4% na quantidade de açúcar exportado (Tabela 2).

Tabela 2. Evolução das exportações de açúcar entre 1998 e 2007

Ano	Açúcar (mil t)	Receita (milhões US\$ FOB)	Preço médio (US\$/t)
1998	8.371	1.943	232,15
1999	12.100	1.911	157,91
2000	6.502	1.199	184,41
2001	11.168	2.278	203,92
2002	13.344	2.090	156,65
2003	12.914	2.140	165,71
2004	15.764	2.640	167,49
2005	18.147	3.919	215,95
2006	18.576	6.003	323,16
2007	18.870	6.167	326,81

Fonte: MDIC (2008a)

Antes da desregulamentação do setor sucroalcooleiro o álcool produzido no Brasil era comercializado primordialmente no mercado interno, porém, esta realidade vem mudando principalmente após a ratificação do protocolo de Quioto. Dados do MDIC (2008b) indicam que as exportações de álcool alcançaram a marca de 3,5 milhões de metros cúbicos em 2007, gerando uma receita de 1.467 milhões de US\$ FOB. Este valor corresponde a 19,6% da produção de álcool da safra 2006/2007 e coloca o Brasil como o maior exportador de álcool do mundo, sendo os Estados Unidos o principal mercado consumidor do álcool brasileiro, com 55% do volume exportado no ano de 2006 e 24% no ano de 2007 (MDIC, 2008d). A Tabela 3 mostra os dados de exportação mensal de álcool entre os meses de janeiro de 2006 e maio de 2008.

Tabela 3. Evolução mensal das exportações de álcool entre janeiro de 2006 e maio de 2008

Mês	Álcool (mil m³)			Receita (mil US\$ FOB)			Preço médio (US\$/m³)		
	2006	2007	2008	2006	2007	2008	2006	2007	2008
Jan	159,7	337,8	220,4	56.966	158.020	89.026	356,63	467,80	403,86
Fev	145,1	207,8	364,6	45.540	93.140	158.249	313,80	448,33	434,05
Mar	188,1	224,3	278,8	70.003	108.074	124.980	372,07	481,84	448,22
Abr	144,3	263,4	288,5	62.680	119.893	137.393	434,50	455,10	476,30
Mai	101,0	278,7	391,5	39.385	122.063	182.614	389,84	437,92	466,44
Jun	166,3	214,2		76.646	86.525		460,96	403,95	
Jul	563,3	410,4		289.436	161.530		513,83	393,59	
Ago	479,7	439,1		242.394	171.380		505,32	390,31	
Set	361,3	336,6		175.877	131.140		486,91	389,59	
Out	544,8	328,4		276.002	129.260		506,62	393,58	
Nov	291,7	228,7		140.876	88.811		483,02	388,38	
Dez	283,7	242,8		128.924	97.433		454,50	401,30	
Total	3.428,9	3.512,2	1.543,8	1.604.729	1.467.269	692.262			

Fonte: MDIC (2008b)

Além das exportações, o consumo de álcool combustível hidratado também vem crescendo no mercado interno, devido ao advento do carro bicomustível. Dados apontam para um aumento de 4,3 milhões de metros cúbicos em 2003 para 10,1 milhões de metros cúbicos em 2007 (MDIC, 2008c).

Outro produto que está definitivamente incorporado no mix de produção da agroindústria canaveira é a energia elétrica. Na safra 2006/2007 foram cogenerados 1200 MWh em média, o que equivale ao potencial de geração da Usina Nuclear de Angra 3. Para a safra 2012/2013, espera-se uma cogeração na ordem de 5.300 MWh médios, apenas com a utilização do bagaço da cana. Caso seja utilizado 50% da palha e da ponta de cana que ficam no campo, este número pode chegar a 10.100 MWh médios na safra 2012/2013, valor superior aos 9.699 MWh médios gerados pela Usina Hidroelétrica de Itaipu (UNICA, 2008). Com este quadro de crescimento na cogeração de energia, estima-se que na safra 2015/2016 a receita proveniente da energia elétrica alcance 16% do total da receita do setor (Figura 6).

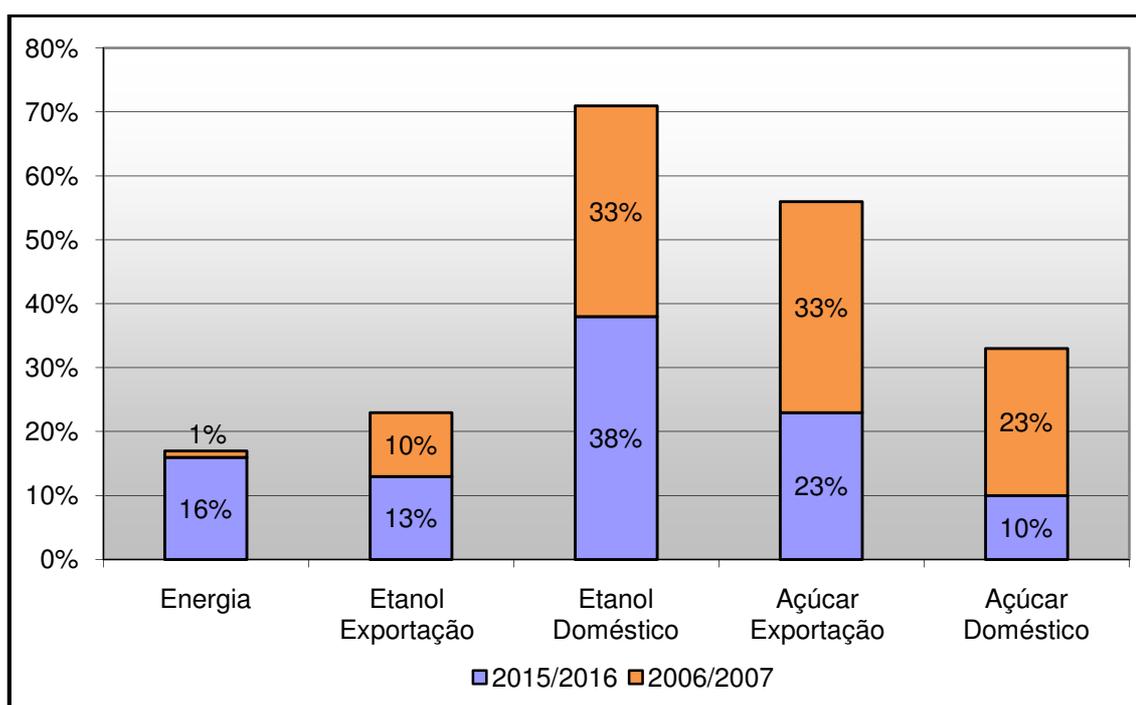


Figura 6. Receita por produto do setor canaveiro (Fonte: UNICA, 2008)

Este quadro de crescimento promete continuar aquecido dentro dos próximos anos. Segundo dados da UNICA (2008), o Brasil deve contar com mais 70 usinas de médio e grande porte até a safra 2012/2013, aumentando a safra de cana-de-açúcar para valores em torno de 695 milhões de toneladas. Ou seja, um crescimento em torno de 41% da produção de cana atual, sendo o álcool e a cogeração de energia os dois grandes motivadores dessa expansão.

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 de açúcar, álcool e energia elétrica

Nesta seção, descreve-se de forma genérica o processo de produção de açúcar, álcool, melado e energia elétrica. 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 tese, tanto na Usina Santa Clotilde (USC), onde foi feito o estudo de caso, quanto em 27 visitas técnicas realizadas em diferentes unidades produtoras antes e durante a realização deste trabalho, a saber: usina Santa Maria (Porto Calvo-AL), usina Leão (Rio Largo-AL), usina Caeté matriz (São Miguel dos Campos-AL), usina Caeté filial Cachoeira (Maceió-AL), usina Caeté filial Delta (Delta-MG), usina Coruripe matriz (Coruripe-AL), usina Coruripe filial Campo Florido (Campo Florido-MG), usina Coruripe filial Iturama (Iturama-MG), usina Seresta (Teotônio Vilela-AL), usina Porto Rico (Campo Alegre-AL), usina João de Deus (Capela-AL - desativada), usina Terra Nova (Pilar-AL - desativada), usina Pindorama (Coruripe-AL), usina Da Barra (Barra Bonita-SP), usina Batatais (Batatais-SP), usina Cerradinho (Catanduva-SP), usina Alto Alegre unidade Floresta (Ameliópolis-SP), usina Santa Adélia (Jaboticabal-SP), usina São Francisco (Sertãozinho-SP), usina Ipiranga (Descalvado-SP), usina São João (Araras-SP), usina Santa Lúcia (Araras-SP), usina Ferrari (Santa Cruz das Palmeiras-SP), usina Cresciumal (Leme-SP), usina Costa Pinto (Piracicaba-SP), usina Ibéria (Ibéria-SP).

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 tese. 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 (sacarose, glicose e frutose) e da biomassa, e a usina é responsável pela recuperação e cristalização da sacarose (fabricação de açúcar), pela fermentação e destilação dos açúcares redutores (fabricação de álcool) ou pela transformação energética da biomassa (cogeração de energia). 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 dividida em três macro-atividades: (a) formação do canavial; (b) tratos culturais; e (c) irrigação. Outra atividade que muitas vezes é considerada como parte integrante da etapa agrícola, estando subordinada à gerência agrícola das usinas, é o CCT; porém, nesta tese esta etapa é tratada separadamente (seção 2.2.2).

A primeira macro-atividade da etapa agrícola está representada na Figura 7 pela letra **a** e pode ser subdividida em duas sub-atividades principais: preparo de solo (a.1) e sulcação, adubação e plantio (a.2). O preparo do solo é a atividade executada antes do plantio que visa atenuar ou eliminar alguns fatores físicos, químicos e biológicos que podem vir a prejudicar o desempenho do canavial. De forma geral, são executadas operações de descompactação e sistematização do solo (gradagem, homogeneização, terraplanagem, terraceamento, delimitação de talhões), correção das características químicas do solo (calagem, gessagem) e aplicação de herbicidas e fungicidas (controle de ervas daninhas, cupins, entre outros). Estas operações pretendem proporcionar boas condições para o crescimento radicular da cana-de-açúcar, contribuindo para a longevidade do canavial e facilitando a mecanização das operações subsequentes (Embrapa, 2009a). Após o preparo de solo (a.1), executa-se a sulcação, adubação e o plantio (a.2), que correspondem a efetiva abertura do sulco, a adubação e a aplicação de resíduos industriais (torta de filtro e vinhaça) e a colocação dos colmos de cana que originarão o novo canavial.

Uma particularidade existente no manejo da cana-de-açúcar se refere à escolha do momento de realização das operações descritas no parágrafo anterior. Para exemplificar esta particularidade, é interessante destacar que na sub-região C/S o plantio pode ser feito no período de janeiro a março (cana de 18 meses) ou no período de setembro a novembro (cana de 12 meses). No caso da região N/N o plantio de 18 meses é realizado entre junho e setembro e o plantio de 12 meses é realizado entre outubro a fevereiro (feito com a utilização de irrigação). Além disso, no caso do plantio de 18 meses, é possível realizar a rotação de culturas durante a entressafra agrícola, prática que propicia a fixação de nitrogênio no solo, facilita o controle de ervas daninhas, reduz a erosão do solo em períodos chuvosos e aumenta a rentabilidade do uso da terra (Embrapa, 2009b).

A macro-atividade **b** (tratos culturais) também pode ser dividida em duas sub-atividades, são elas: (b.1) tratos culturais de cana planta (cana plantada e que ainda não foi

colhida) e (b.2) tratos culturais de socaria (cana proveniente da rebrota dos colmos remanescentes da cana planta após a colheita). A diferença entre estas duas sub-atividades é a idade do canavial, no caso da atividade b.1 executa-se os tratos culturais em um canavial plantado recentemente (menos de 1 ano) e que ainda não foi colhido, já a atividade b.2 é realizada em um canavial com idade superior a 24 meses. Esta diferença existe pelo fato da cana ser uma cultura semi-permanente, ou seja, a cana-de-açúcar é plantada uma vez e propicia em média cinco cortes, ou cinco safras. Durante os quatro anos subseqüentes ao plantio, a socaria é deixada no campo e deve ser tratada para manter o desempenho produtivo das safras posteriores. Portanto, a atividade b.2 é executada em aproximadamente 80% do canavial, enquanto a atividade b.1 é executada em aproximadamente 20%.

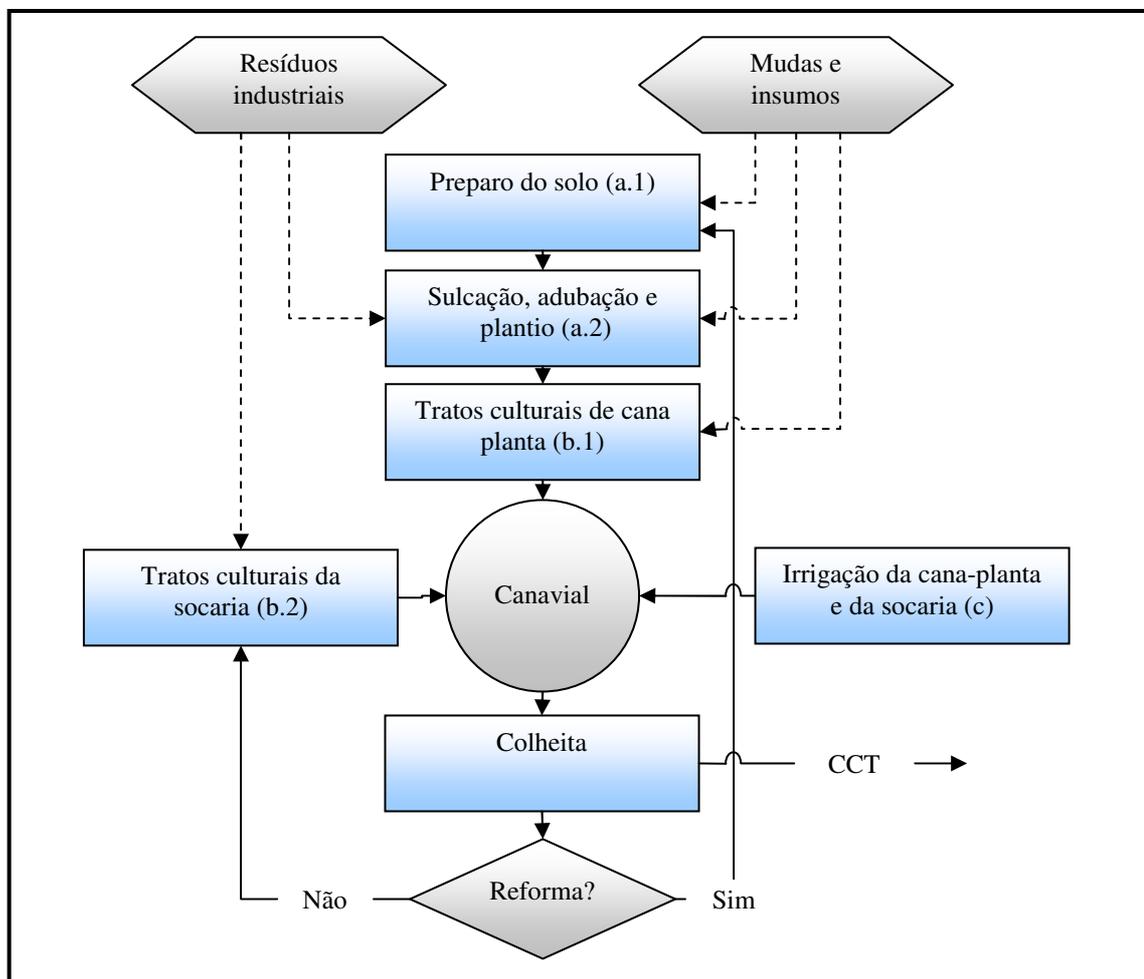


Figura 7. Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)

Além da diferença de idade do canavial, as operações executadas em b.1 e b.2 também apresentam variações. No caso da atividade b.2, geralmente executa-se a adubação, a fertirrigação (aplicação de vinhaça), a calagem (caso necessário), a aplicação de herbicidas e operações para o controle pragas e doenças, já a atividade b.1 é composta principalmente pelo

controle de plantas daninhas, visto que o solo já foi recentemente manipulado durante sua preparação para o plantio (atividade a.1).

A irrigação é considerada, nesta tese, 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 o déficit hídrico dos 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 tese, considera-se esta atividade como parte integrante da etapa de CCT.

2.2.2 Etapa de corte, carregamento e transporte

A etapa de CCT consiste em três operações principais que determinam o tipo de colheita que será adotado (Figura 8): a primeira é o corte da cana, que pode ser manual ou mecanizado; a segunda é o carregamento da cana, que geralmente é mecanizado, mas em condições especiais também pode ser manual; e a terceira é o transporte da cana para a unidade de processamento. Fazendo a combinação das duas primeiras operações, destacam-se os seguintes tipos de colheita: (d) corte manual de cana crua com carregamento mecanizado; (e) corte manual de cana queimada com carregamento mecanizado; (f) corte mecanizado de cana inteira com carregamento mecanizado; (g) corte mecanizado de cana picada sem transbordo; (h) corte mecanizado de cana picada com transbordo. Apesar da existência de todas estas possibilidades de colheita, não é comum encontrar nas usinas brasileiras a utilização dos tipos **f** e **g**. Além disso, o tipo **d** é utilizado em menor escala apenas para plantio e para áreas em que não se pode queimar a cana ou utilizar colheita mecanizada. Desta forma, destacam-se os tipos **e** e **h** como os principais tipos de colheita existentes.

Além destas questões operacionais, é importante destacar alguns pontos referentes à qualidade do CCT realizado. Primeiramente, é importante que a definição do momento de colheita de cada talhão seja especificado de forma otimizada, dado a necessidade de obter uma matéria-prima com maior teor de ART (Açúcares Redutores Totais) e com uma pureza alta. Outro ponto é a necessidade de que todas as operações do CCT sejam executadas em um intervalo inferior a 48 horas, fazendo com que o tempo médio de colheita, também conhecido como *tempo de queima*, seja baixo e evitando a inversão dos açúcares da cana e o aparecimento de dextrana.

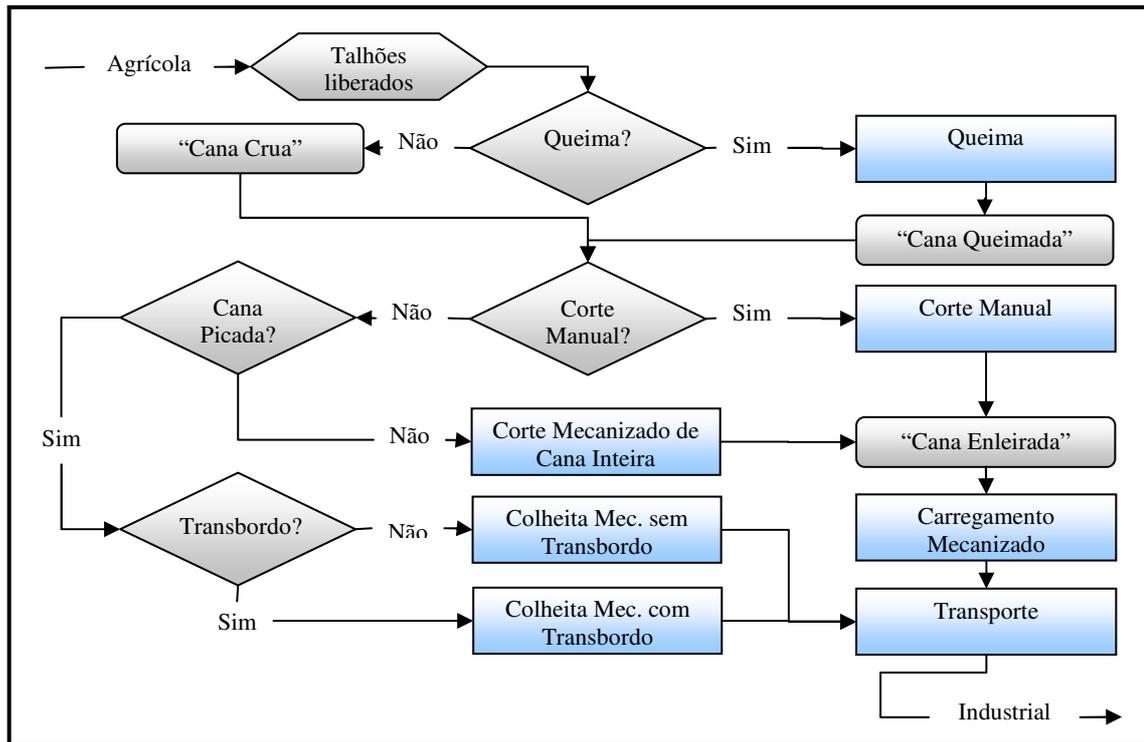


Figura 8. Fluxograma das operações que compõem a etapa de CCT (Fonte: adaptada de Fernandes, 2003)

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 CONSECANA (Pagamento de Cana pelo Teor de Açúcares Totais Recuperáveis-ATR) ou para fins de controle dos rendimentos industriais. Nesta fase são determinados o PC (Pol da Cana), o AR (Açúcares Redutores), 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. Outro sistema utilizado atualmente nas usinas do Brasil é a limpeza a seco. Neste caso, as impurezas minerais e vegetais são separadas da cana por meio de um sistema de ventilação forçada. Também existem usinas que aboliram definitivamente a limpeza da cana, seja a seco ou por meio da lavagem de cana. Estas empresas possuem um grande percentual de cana colhida mecanicamente e, também, controlam a quantidade de impurezas minerais e vegetais

existentes na sua cana-de-açúcar por meio de programas de qualidade de matéria-prima, procurando evitar o transporte de impurezas para a indústria.

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 um total de quatro a sete ternos de moagem. 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 (moenda e preparo de cana) e turbo-geradores que produzem a energia elétrica necessária às atividades de produção de açúcar, álcool e o excedente é destinado à cogeração de energia junto à concessionária. O vapor de escape das turbinas é usado no processo de aquecimento e evaporação do caldo, cozimento de açúcar e destilação do álcool.

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; 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 flotadores 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 (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 é
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.

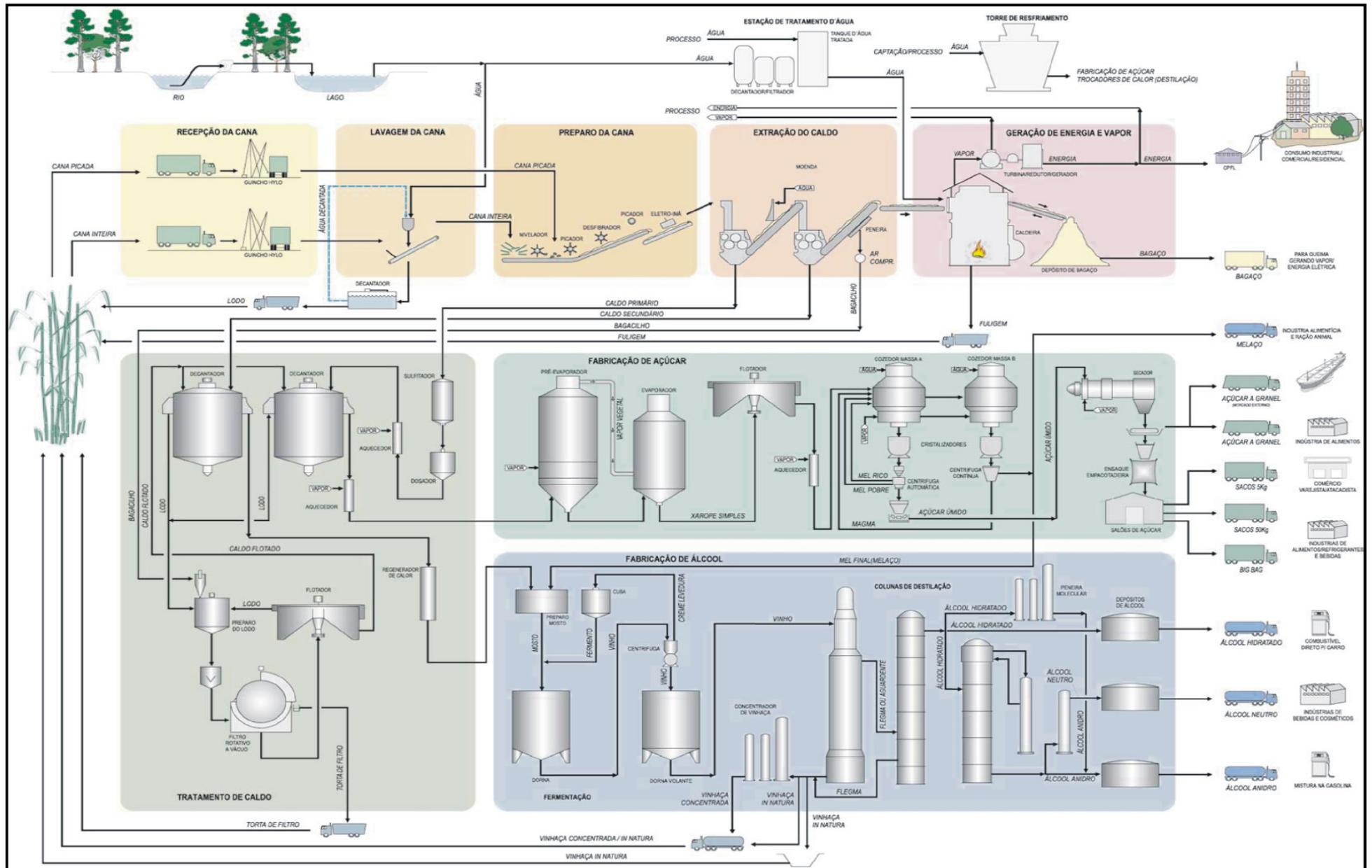


Figura 9. Fluxograma industrial de fabricação de açúcar, álcool, melão e subprodutos (Fonte: Santa Elisa, 2005)

Para ilustrar toda a etapa industrial de produção de açúcar, álcool, melaço e energia elétrica, apresenta-se a Figura 9, que representa a planta industrial da Companhia Energética Santa Elisa. Nesta figura, é possível 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, geração de energia, tratamento de caldo, fabricação de açúcar e fabricação de álcool. Percebe-se 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 produtos e subprodutos.

Vale lembrar que os processos de produção das usinas brasileiras não apresentam variações significativas, fazendo com que a descrição apresentada nesta seção seja facilmente adaptada à realidade de outras usinas. Nas próximas seções, são apresentadas as especificidades do planejamento de safra em usinas cooperadas (seção 2.3) e as peculiaridades do processo produtivo da USC e da CRPAAA (seção 2.4).

2.3 Planejamento de safra no setor sucroenergético

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 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 preocupa-se com a análise do planejamento agregado de safra de um conjunto de usinas em um horizonte de planejamento 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, procurando com isso atingir uma melhor margem de contribuição para a empresa de uma forma robusta, ou seja, de forma que a variação (incertezas) dos parâmetros de entrada não acarrete em infactibilidade da solução proposta.

A agregação proposta neste trabalho está relacionada ao período de análise adotado, ao agrupamento dos recursos produtivos e uma leve agregação de produtos em famílias para simplificar a utilização de alguns dados de entrada, como discutido em Nahmias (1995). No capítulo 4, discuti-se com mais detalhes estas simplificações do modelo.

Até este ponto do capítulo 2, apresentou-se de forma generalista a situação da agroindústria canavieira no Brasil, descreveu-se o processo de produção adotado por grande parte das unidades brasileiras e foram apontadas características gerais do planejamento agregado de safra. A seção 2.3.1 tem como objetivo apontar as peculiaridades do planejamento agregado de safra das usinas que fazem parte do sistema cooperado em estudo. Para iniciar essa discussão, adota-se a proposta de classificação de usinas em função de sua estratégia de comercialização apresentada por Paiva (2006). Posteriormente, são apresentadas as características do processo de produção e da estratégia de comercialização da USC e da CRPAAA, visto que estas organizações foram escolhidas para compor o estudo de caso desta tese.

2.3.1 Planejamento de safra em usinas cooperadas

É interessante notar que as usinas e destilarias compartilham muitas características comuns, tanto nos seus processos produtivos 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 sucroenergético sofreram modificações consideráveis nos últimos anos (Belik e 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 alterações nas políticas de mercado das empresas. Sendo assim, considera-se

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 tese, adota-se uma classificação de acordo com a variedade de produtos e as parcerias estabelecidas com fins de comercialização (Paiva, 2006). Esta classificação baseia-se em entrevistas não estruturadas executadas durante visitas a unidades produtoras e empresas de comercialização, além da base de classificação apresentada por Waack *et al.* (1998). A seguir, são apresentadas as características das quatro classes consideradas nesta tese.

- (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, podendo ser aplicado apenas um conjunto de planilhas para sua determinação e direcionar o foco para o planejamento da colheita. Um exemplo de usina desta classe é a usina Roçadinho (São Miguel dos Campos-AL);
- (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 (Catanduva-SP).

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 meio de metas entre a cooperativa e a unidade produtora, sendo de responsabilidade da cooperativa a realização da venda e o cumprimento dos prazos de entrega. Esta diferença faz com que o planejamento agregado da produção das usinas cooperadas tenha características distintas do planejamento de safra das usinas autônomas, como discutido ao longo desta seção e no capítulo 4.

Tendo estabelecido esta diferenciação, é possível 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 (Colônia Leopoldina-AL).
- (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 alcoóis 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 (Rio Largo-AL).

É importante destacar que, para esta classificação, usinas que fazem parte de grandes grupos produtores (p.ex., grupo Cosan, 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), é possível afirmar 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 do mix de produção a ser adotado. Como exemplo desta prática, é possível 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 melação para posterior conversão em álcool.

Dentre as outras variáveis apresentadas por MacCarthy e Fernandes (2000), tem-se 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, é possível justificar a adoção de uma estratégia de modelagem ligeiramente diferente para as usinas das classes **b** e **d**, sendo o intermédio estabelecido pela cooperativa o principal fator de diferenciação. Desta forma, o modelo proposto por Paiva e Morabito (2007; 2008) deve ser aplicado para usinas da classe **b**, e o modelo proposto nesta tese deve ser aplicado preferencialmente para usinas cooperadas e diversificadas, classe **d**, em particular para usinas que fazem parte da CRPAAA. Entretanto, a abordagem hierárquica apresentada nesta tese também é recomendada para usinas da classe **b**, sendo necessárias apenas algumas adaptações para considerar as especificidades de cada grupo empresarial.

Conforme mencionado anteriormente, a principal diferença entre a abordagem de Paiva e Morabito (2007; 2008) e a abordagem proposta nesta tese é a suposição, feita por Paiva e Morabito (2007; 2008), de que uma usina cooperada pode executar o seu planejamento desconsiderando o planejamento da cooperativa e das outras usinas cooperadas. Para contornar esta limitação, adota-se nesta tese uma estratégia de planejamento hierárquico da produção, onde o primeiro nível corresponde ao planejamento agregado de safra da cooperativa, considerando todas as usinas cooperadas, e o segundo nível corresponde ao planejamento agregado de safra de uma usina desse sistema cooperado. No capítulo 4, esta estratégia de modelagem é discutida com mais detalhes.

2.4 Estudo de caso

O estudo de caso desta tese está baseado em duas organizações, CRPAAA e USC, que compõem um único problema de planejamento hierárquico. A USC foi escolhida entre as usinas cooperadas pela facilidade de coleta de dados e pelo interesse demonstrado por esta empresa na pesquisa desenvolvida na presente tese. Nesta seção, as características de cada uma das organizações estudadas são expostas de forma mais detalhada.

2.4.1 Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas

A CRPAAA é composta por 10 usinas em operação, localizadas no estado de Alagoas, ou seja, na sub-região N/N; são elas: Usina Santa Clotilde (USC), Usina Santa Maria (USM), Usina Porto Rico (UPR), Destilaria Porto Alegre (DPA), Usina Capricho (CAP), Usina Penedo - Paisa (PAI), Usina Sumaúma (SUM), Usina Triunfo (TRI), Usina Seresta (SER) e Usina Sinimbu (SIM). A Figura 10 mostra a localização de cada uma das usinas mencionadas acima.

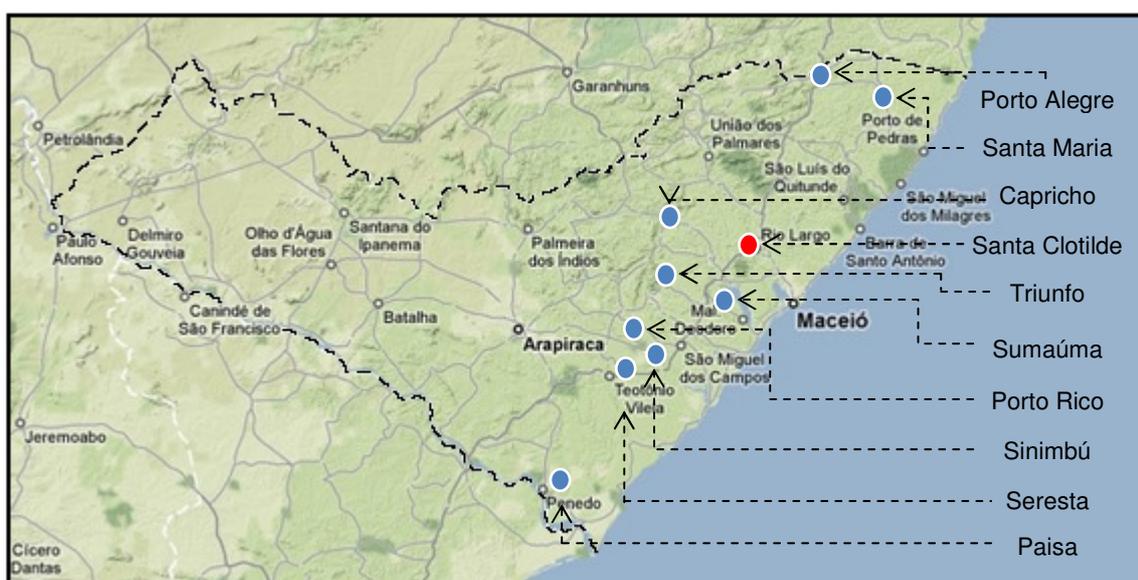


Figura 10. Mapa de localização das usinas da CRPAAA (Fonte: Elaborado pelo autor)

Na safra 2007/2008 a soma da cana moída pelas usinas que fazem parte da CRPAAA foi de 11,249 milhões de toneladas de cana (equivalente a 2,37% da safra brasileira de 2007/2008), propiciando uma comercialização de 948,102 mil toneladas de açúcar, 328,855 milhões de litros de álcool e 15,677 mil toneladas de melaço.

Considerando o mix de produção de todas as usinas cooperadas na safra 2007/2008, a CRPAAA possui uma carteira de produtos composta pelos açúcares cristal *standard*, superior, especial, especial extra, refinado, VHP, VHP+ e VHPe; os alcoóis anidro (AEAC), hidratado (AEHC) e hidratado neutro (AEN) e o co-produto melaço.

Em termos logísticos, a CRPAAA possui um armazém para açúcar granel, localizado no município de Marechal Deodoro, que comporta 100 mil toneladas de açúcar, além de possuir uma cota de outras 72 mil toneladas nos armazéns da Empresa Alagoana de Terminais (EMPAT). Para a armazenagem dos açúcares ensacados a CRPAAA possui um conjunto de armazéns, localizados na região metropolitana de Maceió, que são capazes de estocar 175 mil toneladas de açúcar. Além disso, a CRPAAA possui um conjunto de dez tanques destinados ao estoque de melaço com capacidade total de 70 mil toneladas. No caso do álcool, a estocagem é feita nos tanques de cada usina cooperada, totalizando 219,46 mil metros cúbicos de capacidade de armazenagem.

Toda a logística de distribuição de álcool da CRPAAA é administrada pelo *pool* de álcool do estado de Alagoas, esta instituição é responsável pela contratação e alocação do serviço de frete da CRPAAA, assim como de um grande número de outras usinas que também aderiram ao *pool*. No caso do açúcar e do melaço, a CRPAAA é a responsável direta pela contratação e o gerenciamento desses serviços.

A função fundamental da CRPAAA é estabelecer a conexão entre o mercado consumidor e as usinas cooperadas. Desta forma, a CRPAAA é responsável pela prospecção do mercado, venda dos produtos, definição das usinas que irão produzir cada produto, gestão da logística de distribuição do produto entre as usinas e clientes, gestão do capital proveniente da receita de comercialização e repasse do capital para as unidades cooperadas. Atualmente, não são utilizados recursos de otimização para auxiliar nestas atividades da CRPAAA.

Mais detalhes sobre este objeto de estudo são apresentados no capítulo 4, durante a modelagem do problema. Na próxima seção, as características da USC são apresentadas com mais profundidade.

2.4.2 Usina Santa Clotilde

A USC está situada no município de Rio Largo-AL, onde atua na fabricação dos açúcares cristal *standard*, superior, especial, especial extra, VHP, VHP+ e VHPe, na fabricação dos alcoóis anidro (AEAC) e hidratado (AEHC) e de energia elétrica, além do co-produto melaço e dos subprodutos como torta de filtro, bagaço, vinhaça e óleo fúsel. Sua produção de açúcar, álcool e melaço é entregue inteiramente à CRPAAA, que é responsável pela comercialização e pela logística de distribuição desses produtos.

O processo produtivo da USC possui as mesmas etapas descritas na seção 2.2 deste texto (etapa agrícola, etapa CCT e etapa industrial) e algumas características específicas detalhadas a seguir.

Na etapa agrícola, é importante destacar que a USC está situada na sub-região N/N. 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, sendo 34 semanas o número máximo. Na etapa de CCT, a USC utiliza o corte mecanizado de cana picada em cerca de 30% de seu canavial, um percentual pequeno de colheita com corte manual de cana crua (~2%) e o corte manual de cana queimada no restante da área.

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 safra 2007/2008 1.249.464 toneladas de cana, tendo produzido 102.227,1 toneladas de açúcar e 29.423,6 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 2007/2008 foi de 34.407,9 Mwh, sendo deste total 31.819,2 Mwh gerados pela termoelétrica da USC e 2.588,7 Mwh gerados pela MCH (Micro Central Hidroelétrica) Gustavo Paiva, pertencente ao grupo.

A USC utiliza o processo de sulfitação a quente e posterior caleação, com temperatura final de 105 °C para decantação. A decantação é feita por três decantadores de bandeja com projeto tradicional. O sistema de evaporação é composto por duas linhas de evaporadores *Robert*, sendo um tríplice efeito e um quádruplo efeito, 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 dois aparelhos, um deles capaz de produzir 120 mil litros de álcool AEAC ou AEHC por dia e o outro capaz de produzir 90 mil litros de AEHC por dia.

Como exposto anteriormente, 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 da empresa, tais como a matéria-prima e a capacidade industrial. Atualmente, não são utilizados recursos de otimização para auxiliar neste planejamento tático da USC.

Entende-se que, apesar do modelo desta tese estar especificamente embasado no caso USC e CRPAAA, é possível aplicá-lo em outros sistemas cooperados e não-cooperados com pequenas adaptações. Para este objeto de estudo, é necessária uma adequação dos parâmetros de entrada e uma adequação na modelagem de integração entre o planejamento da cooperativa (primeiro nível do planejamento hierárquico) e o planejamento de uma usina (segundo nível do planejamento hierárquico), não sendo necessário modificar o modelo de otimização proposto para ambos os níveis do planejamento.

Mais detalhes sobre este problema de estudo são apresentados no capítulo 4. No próximo capítulo é feita uma breve revisão da literatura relacionada à modelagem matemática deste problema.

3 REVISÃO DA LITERATURA RELACIONADA

3.1 Planejamento agregado hierárquico

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 e 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 as organizações garantem 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 e Gianesi, 1997; Nahmias, 1995; Sipper e Bulfin Jr, 1998). Pode-se dizer também que, o planejamento da produção trata do estabelecimento de metas para um período futuro (horizonte de planejamento), buscando otimizar 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 e Montgomery, 1974; Nahmias, 1995).

O tipo de decisão envolvida na atividade de planejamento depende fortemente do horizonte adotado para a análise e do nível de agregação praticado. Esta interrelação faz com que seja possível classificar a atividade de planejamento em três subclasses: planejamento estratégico, tático e operacional (conforme ilustrado na Figura 11). O planejamento estratégico envolve decisões de longo prazo (horizonte maior que um ano) com alto nível de agregação. Neste tipo de planejamento, os produtos são identificados por famílias e as capacidades são tratadas de forma agregada. No caso do planejamento tático (horizonte de planejamento geralmente entre seis meses e um ano), os decisores devem solucionar questões relativas ao dimensionamento da força de trabalho, contratação de serviços terceirizados e/ou de capacidade adicional, além da definição do mix de produção, levando em conta um nível de agregação um pouco menor, tanto para os produtos quanto para a capacidade produtiva. Por fim, o planejamento operacional trata de questões de curto prazo com desagregação máxima, tais como: seqüenciamento da produção, nível de estoques de insumos e manutenção do nível de produção e/ou serviço da organização (Sipper e Bulfin Jr, 1998).

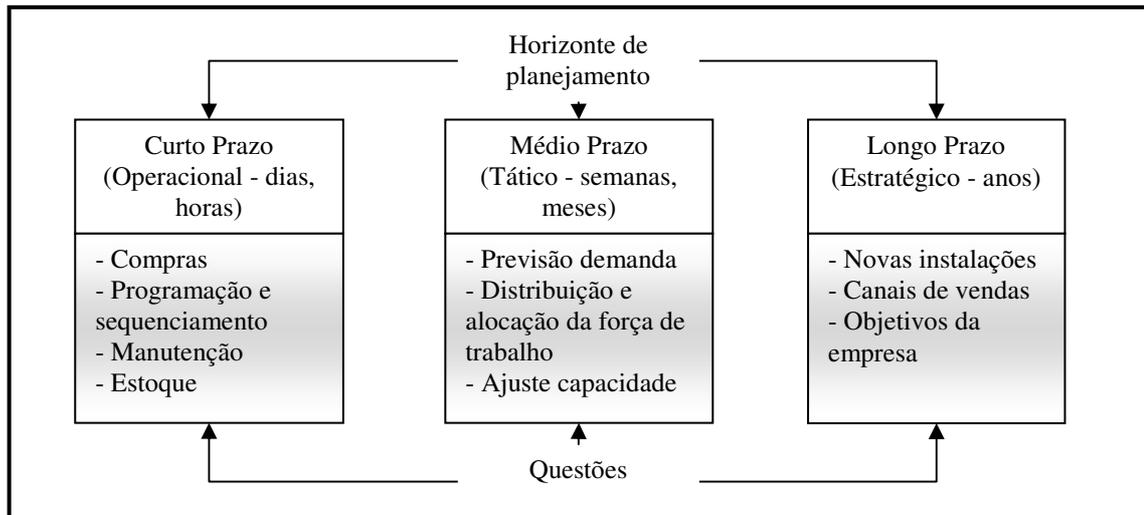


Figura 11. Horizontes de decisão e estratégias do PCP (Nahmias, 1995)

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, qualidade da matéria-prima). Assim, todas as etapas de produção devem ser planejadas de forma agregada para obter uma utilização eficiente dos recursos produtivos (Hax e Candea, 1984).

Nesta tese, utilizam-se as técnicas de otimização matemática para desenvolver um modelo de planejamento agregado de safra de um conjunto de usinas que fazem parte de um sistema cooperado de comercialização de açúcar e álcool. Para isso, adotou-se uma abordagem de planejamento agregado hierárquico, onde o primeiro nível de decisão é um modelo de PL que representa o planejamento tático/estratégico de safra de toda a cooperativa, e o segundo nível de decisão é um modelo de PIM que representa o planejamento/operacional de safra de uma das usinas, considerando a produção de açúcar, álcool e energia elétrica. Numa segunda etapa, incorpora-se a análise de incerteza nos dados do problema, aplicando-se técnicas de otimização robusta.

As seções seguintes apresentam uma breve revisão sobre os modelos de otimização determinística (seção 3.3) e otimização sob incerteza (seção 3.4) utilizados como embasamento teórico desta tese.

3.2 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 e Lieberman, 1995; Goldberg e Luna, 2000; Arenales *et al.*, 2007).

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 apresentarem qualquer tipo de não-linearidade, seja na função objetivo ou em qualquer de suas restrições; modelos de *programação inteira* (PI), que apresentam variáveis que não podem assumir valores contínuos, ficando condicionados a assumir valores discretos. Além disso, é possível ter modelos que são uma combinação das classes acima descritas, como por exemplo: modelos de *programação linear inteira mista* (PIM), quando são utilizadas variáveis inteiras e contínuas num mesmo modelo linear.

É interessante observar ainda que os modelos matemáticos podem ser caracterizados pelas seguintes dicotomias (Goldberg e 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. Ao longo da apresentação dos modelos deste estudo, destaca-se a dicotomia utilizada para cada caso.

3.3 Modelos determinísticos

Os modelos determinísticos aplicados ao PCP são ferramentas muito utilizadas na Pesquisa Operacional (PO). Dentre os modelos mais difundidos, 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 e Montgomery, 1974; Hax e Candea,

1984; Nahmias, 1995; Williams, 1978). A seguir, são listados alguns modelos encontrados na literatura para este tipo de aplicação e que são úteis na modelagem desenvolvida no presente estudo.

3.3.1 Modelos determinísticos aplicados ao planejamento agregado

Um dos modelos determinísticos 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 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 e Montgomery, 1974).

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.

A junção dos dois modelos anteriores constitui um *modelo de mix de produção com processos alternativos*, um dos modelos de programação matemática mais aplicados na indústria em geral (Johnson e Montgomery, 1974). Neste tipo de modelo, a suposição de produção ser igual à demanda apresentada no modelo de seleção de processos é substituída pela relação de oportunidade de venda e produção mínima do modelo de mix de produção. A função objetivo volta a ser maximizada como no modelo de mix de produção.

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.

Para todos os exemplos citados acima, é interessante considerar a possibilidade de *planejamento da produção em múltiplos períodos*. Neste caso, 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, por exemplo, Williams (1978), esta amarração pode ser feita por meio de uma relação de balanceamento de estoque, 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.

Na próxima seção são apresentados os modelos que foram utilizados para embasar o desenvolvimento do modelo de planejamento agregado proposto nesta tese.

3.3.2 Modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes

Antes de apresentar o modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes (SPDL), utilizado como base para o desenvolvimento do modelo de planejamento agregado da produção proposto nesta tese, apresenta-se o modelo de dimensionamento e seqüenciamento de lotes discretos (ou *Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem-DLSP*), dado que o modelo SPDL é um caso particular do DLSP. Para uma revisão mais completa desta classe de modelos, consulte, por exemplo, Drexl e Kimms (1997), Staggemeier e Clark (2001), Araújo (2003) e Karimi *et al.* (2003), Araújo *et al.* (2004). Algumas aplicações em situações reais estudadas na UFSCar aparecem, por exemplo, nos trabalhos de Toso (2003), Toso e Morabito (2005), Toso *et al.* (2008), Luche (2003), Luche e Morabito (2005), Luche *et al.* (2008), Ferreira (2006) e Ferreira *et al.* (2008; 2009).

O modelo DLSP consiste em um problema monoestágio, multiproduto (ou multiprocesso), dinâmico, capacitado e que combina decisões de dimensionamento e seqüenciamento de lotes. A pressuposição principal deste tipo de modelo é que em um período de análise só poderá ser utilizado um lote, ou seja, tem-se um modelo de produção *tudo ou nada* (ou *small Bucket*). Logo, só ocorre custo de preparação (ou *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 (Johnson e Montgomery, 1974):

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

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + x_{it} - D_{it} \quad \forall i, t \quad (2)$$

$$p_i x_{it} = C_t y_{it} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{it} \leq 1 \quad \forall t \quad (4)$$

$$z_{it} \geq y_{it} - y_{i,t-1} \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$I_{it}, x_{it}, z_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (7)$$

A notação adotada neste modelo [equações (1) a (7)] está descrita a seguir:

Parâmetros

- r_{it} Receita obtida na venda do produto i no período t ;
- c_{it} Custo de produzir o produto i no período t ;
- s_i Custo de preparação para produzir o produto i ;
- h_i Custo de estocar o produto i ;
- 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 ;

Variáveis

- Z Função objetivo de contribuição ao lucro gerada por todos os produtos durante os períodos analisados;
- 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 ;
- x_{it} Quantidade produzida do produto i 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 ;
- I_{it} Variável de estoque do produto i no fim do período t ;

A função objetivo [equação (1)] é a margem de contribuição ao lucro gerada pela produção dos produtos i em todos os períodos t analisados. A restrição (2) faz o

balanceamento de estoque de cada produto i em cada período t , a igualdade (3) indica a produção *tudo ou nada*, ou seja, produção do produto i com a capacidade total em todo período t . A inequação (4) restringe a produção a apenas um produto i por período t , a equação (5) identifica quando acontece a troca de lotes, e as restrições (6) e (7) definem os domínios da variável de seleção de processos (y_{it}) e das demais variáveis de decisão (I_{it} , x_{jt} , z_{it}).

É interessante notar que a combinação das restrições (5), (6) e (7), juntamente com a função objetivo, fazem com que a variável z_{it} assumam valores binários (1, quando houver uma troca de produtos e 0, quando não houver). Este modelo pode ser facilmente estendido para considerar o tempo necessário para fazer a preparação (*setup*), e 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 tese, considera-se o dimensionamento de lotes de processos de produção, que por sua vez podem produzir vários produtos ao mesmo tempo (como apresentado no capítulo 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.

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

$$\max Z = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{i=1}^n (r_{it} a_{ij} - c_{jt}) x_{jt} - \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n h_{it} I_{it} \quad (8)$$

s.a.

$$I_{it} = I_{i,t-1} + \left(\sum_{j=1}^{J_i} a_{ij} x_{jt} \right) - D_{it} \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} x_{jt} \leq 1 \quad \forall t \quad (10)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, I_{it} \geq 0 \quad \forall j, i, t \quad (11)$$

A simbologia adotada neste modelo [equações (8) a (11)] está descrita a seguir:

Parâmetros

- a_{ij} Quantidade do produto i produzido pelo processo j ;
- c_{jt} Custo de utilizar o processo j no período t ;
- D_{it} Demanda do produto i no período t .
- h_{it} Custo de estocar o produto i no período t ;
- r_{it} Receita obtida na venda do produto i no período t ;

Variáveis

- Z Função objetivo de contribuição ao lucro na produção total em todos os períodos;
- x_{jt} Variável binária que determina a utilização ($x_{jt}=1$), ou não ($x_{jt}=0$), do processo j no período t ;
- I_{it} Variável de estoque do produto i no período t

Neste modelo, a equação (8) maximiza a margem de contribuição ao lucro em todos os períodos t analisados, de acordo com a produção de i gerada pela escolha dos processos j ; a restrição (9) faz o balanceamento de estoque, produção e demanda de cada produto i em cada período t ; a inequação (10) indica a utilização de apenas um processo por período t , visto que x_{jt} é um valor binário; e a equação (11) define o domínio das variáveis de seleção de processos (x_{jt}) e da variável de estoque (I_{it}).

Esta formulação [equações (8) a (11)] é equivalente ao “modelo 4” apresentado por Luche (2003) para tratar o problema da produção de grãos eletrofundidos. No trabalho de Paiva (2006), este modelo é utilizado como base para o modelo de planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool, devido às semelhanças do sistema de produção de grãos eletro fundidos e de açúcar, álcool, melão e subprodutos (produção divergente), além da facilidade de definir processos de produção para estas duas indústrias.

Dentre as semelhanças existentes entre o modelo SPDL [equações (8) a (11)] e o modelo proposto por Paiva (2006), formulação disponível no Anexo A, deve-se destacar a utilização da variável binária de seleção de processos [x_{jt} no modelo SPDL e X_{kt} no modelo de Paiva (2006)], a utilização da matriz de rendimento de cada processo [a_{ij} no modelo SPDL e A_{pkt} no modelo de Paiva (2006)], a restrição que limita a utilização de apenas um processo por período [restrições (10) e (263), respectivamente] e a estruturação da função objetivo [equações (8) e (261), respectivamente] onde se analisa a maximização da margem de contribuição. Todas estas particularidades podem ser encontradas em ambos os modelos.

Os modelos apresentados nesta seção constituem apenas um pequeno resumo sobre a quantidade de modelos determinísticos relacionados com planejamento da produção. Outros modelos amplamente utilizados para apoiar estas decisões são encontrados, por exemplo, em Johnson e Montgomery (1974), Williams (1978) Hax e Candea (1984), Winston

(1991), Askin e Standridge (1993), Nahmias (1995), Hillier e Lieberman (1995), Drexl 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, por exemplo, em Hax e Candea (1984) e Arenales *et al.* (2007). Um exemplo de aplicação prática no planejamento da produção e distribuição de suco de laranja pode ser encontrado em Munhoz (2000) e Munhoz e Morabito (2001a; 2001b). 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). Na próxima seção, são revisadas as abordagens de otimização sob incerteza.

3.4 Otimização sob incerteza

Em análises com modelos determinísticos, o planejamento consiste em determinar um nível de utilização dos recursos que atenda às restrições do problema e maximize a contribuição ao lucro da empresa (ou minimize os custos). Para tanto, toda a informação necessária para a análise deve ser conhecida no momento de realização do planejamento (Sen e Hagle, 1999). Entretanto, além das incertezas inerentes às informações do presente, o futuro não pode ser perfeitamente previsto e deve ser considerado aleatório ou incerto. Neste tipo de situação, os modelos de otimização sob incerteza são utilizados para que o impacto das variáveis aleatórias seja considerado de forma direta na modelagem (Joshi, 1995; Diwekar, 2002; Sahinidis, 2004).

A análise de sensibilidade é a forma mais direta para tratar a incerteza dos parâmetros de entrada de um modelo. Esta técnica consiste na análise da perturbação dos parâmetros de entrada de forma que seja possível verificar o impacto desta perturbação na função objetivo do problema, avaliando a estabilidade da solução com relação à factibilidade e à otimalidade. Em outras palavras, a pergunta que se pretende responder com a análise de sensibilidade é: *Qual a diferença relativa entre a solução do problema perturbado e a solução do problema nominal, dado uma perturbação infinitesimal dos parâmetros de entrada?*. Desta forma, a análise de sensibilidade é uma abordagem local de pós-otimalidade, que apenas analisa o impacto da perturbação após solução do problema nominal ter sido obtida, não sendo possível incorporar a incerteza na modelagem e tomar decisões de forma antecipada (Mulvey *et al.*, 1995; Ben-Tal e Nemirovski, 1999).

As próximas seções apresentam uma breve revisão das técnicas de otimização sob incerteza que foram consideradas para a aplicação no modelo proposto nesta tese; são elas: restrições de chance (Charnes e Cooper, 1959; Johnson e Montgomery, 1974), programação estocástica em dois estágios com recurso (Dantzig, 1955; Beale, 1955), programação estocástica robusta (Mulvey *et al.*, 1995; Vladimirov e Zenios, 1997) e otimização robusta (Soyster, 1973; Ben-Tal e Nemirovski, 1998; 1999; 2000; Bertsimas e Sim, 2003; 2004; e Bertsimas e Thiele, 2006). Mais detalhes sobre as técnicas de otimização sob incerteza também podem ser encontrados em Joshi (1995), Sox e Muckstadt (1996; 1997), Birge e Louveaux (1997), Sen e Hingle (1999), Diwekar (2002); além das pesquisas sobre o estado da arte em otimização sob incerteza (Sahinidis, 2004; Herroelen e Leus, 2005), programação estocástica (Bouza, 1993) e otimização robusta (Beyer e Sendhoff, 2007).

3.4.1 Modelo estocástico baseado em restrições de chance

Modelos bastante utilizados na literatura de programação estocástica para tratar incertezas que impactam na factibilidade do problema são os modelos com restrições de chance (Charnes e Cooper, 1959; Johnson e Montgomery, 1974). Este tipo de modelo envolve a consideração de restrições que são satisfeitas apenas numa determinada proporção das vezes. Em outras palavras, as restrições são satisfeitas com uma probabilidade específica (Diwekar, 2002).

Para ilustrar este tipo de modelo, faz-se uso do problema de determinação do mix de produção, apresentado por Johnson e Montgomery (1974). A modificação imposta ao modelo apresentado por estes autores é a incorporação da equação (12), que permite fixar uma determinada probabilidade α_i de excesso de produção sobre o valor da variável aleatória de demanda u_i , como mostrado a seguir:

$$P(u_i \leq x_i) \leq \alpha_i \quad \forall i \quad (12)$$

Onde:

- α_i Valor que representa a porcentagem de vezes que se quer obedecer à restrição de demanda do produto i ($u_i \leq x_i, \forall i$), determinado pela política de atendimento da demanda estudada;
- u_i Variável aleatória com uma distribuição de probabilidade conhecida, que representa a demanda (ou venda) do produto i ;
- x_i Quantidade do produto i produzido no período de análise.

Considerando, por exemplo, que a demanda u_i está normalmente distribuída com média μ_i e variância σ_i , a equação (12) pode ser reescrita da seguinte forma (para mais

detalhes sobre esta transformação, consultar Johnson e Montgomery, 1974, e Arenales *et al.*, 2007):

$$x_i \leq \mu_i + z_{\alpha_i} \sigma_i \quad \forall i \quad (13)$$

Onde:

z_{α_i} Valor da normal padrão para a porcentagem α_i desejada.

Considerando a equação (13), o modelo de mix de produção pode ser escrito da seguinte forma:

$$\max Z = \sum_{i=1}^n (r_i - c_i) x_i \quad (14)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^n a_{ik} x_i \leq b_k \quad \forall k \quad (15)$$

$$l_i \leq x_i \leq \mu_i + z_{\alpha_i} \sigma_i \quad \forall i \quad (16)$$

$$l_i \geq 0 \quad \forall i \quad (17)$$

A simbologia adotada neste 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 ;
- 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;

Desta forma, o modelo terá como valor da função objetivo uma contribuição ao lucro provável dependente do valor de α_i , que considera a probabilidade de violação da restrição $u_i \leq x_i, \forall i$. Mais detalhes sobre os modelos de restrição de chance também podem ser encontrados em Prékopa (1995).

3.4.2 Modelo de programação estocástica em dois estágios com recurso

Outra abordagem clássica da literatura de otimização sob incerteza, introduzida por Dantzig (1955) e Beale (1955), é a programação estocástica em dois estágios com recurso (Sahinidis, 2004). Este tipo de modelagem utiliza dois estágios de modelagem: estágio *estrutural* e estágio de *controle*. Os parâmetros do estágio estrutural são determinísticos e

desconsideram a incerteza inerente ao problema. Estes parâmetros são normalmente relacionados com itens de planejamento (p.ex., decisões do planejamento da produção). Já os parâmetros associados ao estágio de controle são modelados por variáveis aleatórias e são, normalmente, relacionados com decisões operacionais ou de ajuste de produção (p.ex., decisões de seqüenciamento da produção). Para modelar este dois estágios as variáveis de decisão são divididas em dois grupos distintos, conforme Vladimirou e Zenios (1997):

$x \in \mathfrak{R}$ Vetor de variáveis do primeiro estágio, também conhecido como “decida agora”, que deve ser fixado antes dos valores aleatórios tornarem-se conhecidos. O valor destas variáveis não pode ser ajustado após a definição das variáveis aleatórias.

$y \in \mathfrak{R}$ Vetor de variáveis do segundo estágio, também conhecido como ações recurso ou variáveis “espere e veja”, que são determinados após a realização das variáveis aleatórias. O valor ótimo destas variáveis depende da decisão do primeiro estágio e também da incerteza inerente ao problema.

Para modelar as variáveis aleatórias do segundo estágio é comum utilizar a abordagem de cenários com variáveis discretas. Esta abordagem consiste em definir um conjunto $\Omega = \{s_1, s_2, \dots, S\}$, onde cada cenário s representa um conjunto de realização dos parâmetros incertos do segundo estágio, com probabilidades associadas p_s e as seguintes propriedades: $p_s > 0$; $\sum_{s \in \Omega} p_s = 1$; $P(s_i \cup s_j) = p_{s_i} + p_{s_j}$ e $s_i \cap s_j = \{\emptyset\}$, para todo $s \in \Omega$. A vantagem de utilizar a abordagem por cenários é que o modelo obtido preserva a linearidade do modelo determinístico inicial, além de ser possível trabalhar em problemas que não se conhece a distribuição de probabilidade que representa a variável aleatória que está sendo considerada. A seguir, apresenta-se a formulação geral de um modelo de programação estocástica em dois estágios com recurso (Vladimirou e Zenios, 1997):

$$\min \xi = c^T x + \sum_{s=1}^S p_s d_s^T y_s \quad (18)$$

s.a.

$$Ax = b \quad (19)$$

$$T_s x + W_s y_s = h_s \quad \forall s \quad (20)$$

$$l_x \leq x \leq u_x \quad (21)$$

$$l_y \leq y_s \leq u_y \quad \forall s \quad (22)$$

A simbologia adotada neste modelo [equações (18) a (22)] está descrita a seguir:

ξ Função objetivo de minimização do custo esperado;

c	Vetor de custo do primeiro estágio;
x	Vetor da variável de decisão do primeiro estágio;
A	Matriz de coeficientes do primeiro estágio;
b	Vetor de disponibilidade de recursos do primeiro estágio;
d_s	Vetor de custo do segundo estágio para um dado cenário s ;
p_s	Vetor de probabilidade de ocorrência do cenário s ;
y_s	Vetor de variável de decisão do segundo estágio para um dado cenário s ;
W_s	Matriz de coeficientes do segundo estágio para cada cenário s , ou matriz recurso;
h_s	Vetor de disponibilidade de recursos do segundo estágio para cada cenário s ;
T_s	Matriz de coeficientes que relaciona o primeiro e o segundo estágio para cada cenário s ;
l_x, u_x, l_y, u_y	Vetores de definição de domínio das variáveis de primeiro e segundo estágio.

A função objetivo (18) da formulação apresentada procura minimizar o custo do primeiro estágio somado ao valor esperado do custo de utilização dos recursos do segundo estágio. Este tipo de modelagem pode ser utilizada para tratar uma grande quantidade de problemas de otimização sob incerteza, tais como: planejamento de capacidade, planejamento da produção, localização de facilidades e dimensionamento de lotes (Higle e Sen, 1991). Entretanto, a limitação desta abordagem é o fato de não haver tratamento específico para a variabilidade da função objetivo em situação de incerteza, ou seja, não há garantia de que a solução encontrada pelo modelo permaneça próxima da solução ótima quando as variáveis aleatórias sejam conhecidas (Mulvey *et al.*, 1995). Para lidar com esta limitação, Mulvey *et al.* (1995) propõem o modelo de programação estocástica robusta, que é apresentado na próxima seção.

3.4.3 Modelo de programação estocástica robusta

Programação estocástica robusta é uma abordagem de modelagem que integra conceitos de programação de metas e de programação estocástica em dois estágios com recurso, de forma que se consiga garantir uma “solução robusta” e uma “modelagem robusta” para um dado conjunto de cenários que são considerados na análise. Segundo Mulvey *et al.* (1995): “Solução robusta” é toda solução que permanece *próxima* à solução ótima em todos os cenários considerados, e “modelagem robusta” é toda modelagem que gera soluções factíveis ou *quase factíveis* em todos os cenários considerados.

Tendo estabelecido estes conceitos e considerando a limitação da programação estocástica em dois estágios para garantir uma solução robusta e uma modelagem robusta,

Mulvey *et al.* (1995) propuseram a programação estocástica robusta como uma alternativa para tratar o *trade-off* entre otimalidade e robustez em ambientes de incerteza. A principal contribuição desta abordagem é a consideração de penalidades para a violação das restrições nos diferentes cenários e a flexibilização da função objetivo de forma a contemplar diferentes critérios de otimização, tais como: valor médio esperado; valor esperado para a combinação entre média e variância das soluções de cada cenário; valor esperado do arrependimento, ou seja, minimização do máximo desvio entre a meta e o resultado encontrado para os cenários (Mulvey *et al.*, 1995; Yamashita *et al.*, 2007).

A seguir apresenta-se a formulação geral de um modelo de programação estocástica robusta (Mulvey *et al.*, 1995):

$$\min \xi = \sigma(x, y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_s) + \omega\rho(z_{s1}, z_{s2}, \dots, z_s) \quad (23)$$

s.a.

$$Ax = b \quad (24)$$

$$T_s x + W_s y_s + z_s = h_s \quad \forall s \quad (25)$$

$$l_x \leq x \leq u_x \quad (26)$$

$$l_y \leq y_s \leq u_y \quad \forall s \quad (27)$$

$$z_s \geq 0 \quad \forall s \quad (28)$$

A simbologia adotada neste modelo segue a mesma notação descrita para as equações (18) a (22), adicionando-se a variável z_s e modificando-se a função objetivo, como descrito a seguir:

- σ Função adotada como critério de otimalidade do modelo;
- ρ Função adotada como critério de penalidade para a infactibilidade do modelo;
- ω Fator de ajuste do *trade-off* entre otimalidade e robustez do modelo;
- z_s Vetor da variável de controle de infactibilidade do segundo estágio no cenário s ;

O modelo de programação estocástica robusta [equações (23) a (28)] tem características de programação multiobjetivo, onde o fator de ajuste ω desempenha o papel de controlar o peso entre robustez da solução (σ) e robustez do modelo (ρ).

Considere, por exemplo, o caso em que o critério de otimalidade σ é o valor médio esperado, analogamente à equação (18), e a função de penalidade ρ é dada pelo somatório dos valores positivos de z_s ($\rho = \sum_{s=1}^S p_s z_s$). Para este caso, a função objetivo do modelo de programação estocástica robusta é dada pela expressão (29). É interessante notar que se $\omega \rightarrow \infty$, então a formulação (29) tende a formulação (18).

$$\min \xi = c^T x + \sum_{s=1}^S p_s d_s^T y_s + \omega \sum_{s=1}^S p_s z_s \quad (29)$$

Como mencionado anteriormente, esta abordagem proporciona a flexibilidade necessária para serem estabelecidos diferentes critérios de otimalidade e diferentes critérios de penalidade, levando-se em consideração as necessidades de cada modelagem e o grau de aversão ao risco do decisor, como pode ser visto em Takriti e Ahmed (2004), Yamashita *et al.* (2007) e Khor *et al.* (2008). Sendo assim, é possível considerar as diversas modelagens de risco existentes na literatura, tais como, modelos de média/variação, mínimo arrependimento, assim como balancear otimalidade e robustez em um único modelo.

Segundo Mulvey *et al.* (1995), em situações de alto risco não é recomendável utilizar o valor médio esperado como critério de otimalidade [equação (29)]. Nestes casos, pode-se utilizar, por exemplo, a função média/variação, pois esta função considera a variação entre os resultados obtidos em cada cenário e propicia maior robustez ao modelo. Para aprofundar esta discussão, considere a análise em que o critério de otimalidade σ é dado pela média/variação [equação (30)] e a função de penalidade ρ é dada, novamente, pelo somatório dos valores positivos de z_s ($\rho = \sum_{s=1}^S p_s z_s$). Considere também o parâmetro λ como sendo uma constante e $\zeta_s = c^T x + d_s^T y_s$. Desta forma, tem-se:

$$\sigma = \sum_{s=1}^S p_s \zeta_s + \lambda \sum_{s=1}^S p_s \left(\zeta_s - \sum_{s'=1}^S p_{s'} \zeta_{s'} \right)^2 \quad (30)$$

Esta formulação agrega a variação à análise. Entretanto, isto é feito com uma formulação quadrática. Uma opção para linearização do termo quadrático é a adição de variáveis auxiliares θ_s^+ e θ_s^- , para representar os desvios positivos e negativos, respectivamente. Com a adoção destas variáveis auxiliares é possível reescrever o modelo de programação estocástica robusta, como apresentado abaixo [equações (31) a (37)]. Outra proposta de linearização, que não é utilizada nesta tese, é apresentada por Yu e Li (2000), onde pretende-se evitar a adição de variáveis auxiliares como na proposta apresentada acima.

$$\min \xi = \sum_{s=1}^S p_s \zeta_s + \lambda \sum_{s=1}^S p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) + \omega \sum_{s=1}^S p_s z_s \quad (31)$$

s.a.

$$Ax = b \quad (32)$$

$$T_s x + W_s y_s + z_s = h_s \quad \forall s \quad (33)$$

$$\zeta_s - \sum_{s'=1}^S p_{s'} \zeta_{s'} = \theta_s^+ - \theta_s^- \quad \forall s \quad (34)$$

$$l_x \leq x \leq u_x \quad (35)$$

$$l_y \leq y_s \leq u_y \quad \forall s \quad (36)$$

$$\theta_s^+, \theta_s^-, z_s \geq 0 \quad \forall s \quad (37)$$

Da mesma forma que a discussão apresentada sobre a flexibilidade do critério de otimalidade σ , o critério de penalidade ρ também possui várias formulações possíveis. Dentre estas possibilidades, é possível destacar a penalidade quadrática (38) e a penalidade do máximo desvio positivo (39), descritas a seguir.

$$\sigma = \sum_{s=1}^S p_s z_s^T z_s \quad (38)$$

$$\sigma = \sum_{s=1}^S \max\{0, z_s\} \quad (39)$$

A diferença de aplicação entre estas abordagens é a necessidade de considerar, com igual importância, as violações positivas e negativas das equações de controle. Caso seja necessário considerar os dois desvios, a formulação (38) torna-se mais adequada. Caso contrário, a penalidade (39) pode ser mais vantajosa por ser possível reescrever o problema não linear em questão como um modelo linear por partes.

Convém observar que uma dificuldade das abordagens de programação estocástica e programação estocástica robusta (seções 3.4.2 e 3.4.3) é a necessidade do tomador de decisão ter boas estimativas das probabilidades associadas a cada cenário s . Além desta dificuldade, o número de variáveis e restrições associadas ao segundo estágio de decisão do problema cresce em torno de s vezes o tamanho do problema determinístico original.

3.4.4 Modelo de otimização robusta de Soyster

Como visto nas seções anteriores, alguns autores têm apontado dificuldades para garantir a otimalidade e a factibilidade da solução encontrada por modelos determinísticos e modelos de otimização estocástica em situações onde existe incerteza nos dados de entrada. Exemplos dessa dificuldade são reportados por Ben-Tal e Nemirovski (2000) em testes para avaliar a degradação da solução de problemas de PL quando se impõe pequenas variações (<1%) no valor dos parâmetros de instâncias disponíveis na NETLIB (www.netlib.org).

Uma alternativa para tratar esta questão são os modelos de otimização robusta. Nestes modelos, a garantia de factibilidade é obtida por uma análise de pior caso, que incorpora a incerteza nos parâmetros de forma direta em um modelo de minimização do

máximo desvio previsto para a variável aleatória (Bertsimas e Sim, 2003). Com esta abordagem de pior caso não é necessário trabalhar com penalização à infactibilidade do modelo, como no modelo de programação estocástica robusta (seção 3.4.3). Além disso, é possível garantir que a solução obtida é factível para qualquer caso em que os parâmetros incertos variem dentro de um conjunto convexo pré-estabelecido.

O primeiro passo na direção da teoria de otimização robusta foi dado por Soyster (1973), que propôs uma abordagem de pior caso para garantir a factibilidade em modelos de PL com incerteza na matriz tecnológica \tilde{a}_{ij} , $j \in J_i$. Para ilustrar melhor a abordagem de Soyster (1973), considere um modelo de PL clássico [equações (40) a (42)]:

$$\max Z = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (40)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i \quad (41)$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \quad (42)$$

Onde:

a_{ij} Valor esperado para a variável aleatória \tilde{a}_{ij} ;

\tilde{a}_{ij} Variável aleatória contida em uma hiperesfera com centro em a_{ij} e raio \hat{a}_{ij} , como segue: $K_{ij} = \{\tilde{a}_{ij} \in \mathfrak{R} \mid |\tilde{a}_{ij} - a_{ij}| \leq \hat{a}_{ij}\}$, $i = 1, \dots, n; j \in J_i$;

\hat{a}_{ij} Desvio máximo da variável aleatória \tilde{a}_{ij} com relação ao valor esperado a_{ij} ;

J_i Conjunto de parâmetros j que possuem incerteza para cada restrição i ;

η_{ij} Desvio unitário da variável aleatória \tilde{a}_{ij} , definido como segue:

$$\eta_{ij} = (\tilde{a}_{ij} - a_{ij}) / \hat{a}_{ij}, \in [-1, 1].$$

De acordo com estas definições, percebe-se que o valor do raio da hiperesfera \hat{a}_{ij} determina a inexatidão da variável \tilde{a}_{ij} ; portanto, se $\hat{a}_{ij}=0$ tem-se um modelo determinístico. Para considerar a incerteza presente nos parâmetros da matriz tecnológica \tilde{a}_{ij} , considere a nova restrição (43) em substituição à restrição (41).

$$\sum_{j=1}^m \tilde{a}_{ij} x_j \leq b_i \quad \forall i \quad (43)$$

Soyster (1973) propõe uma abordagem determinística de pior caso para garantir a factibilidade da restrição (43) para toda realização \tilde{a}_{ij} no intervalo K_{ij} . Para isso, considere o seguinte desenvolvimento:

$$\sum_{j=1}^m \tilde{a}_{ij} x_j = \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \hat{a}_{ij} x_j \leq \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| \leq b_i \quad \forall i \quad (44)$$

Com esta formulação [equação (44)], o termo $\sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j|$ determina a “proteção” necessária para garantir a factibilidade de cada restrição i , impondo um espaço de segurança entre $\sum_j a_{ij} x_j$ e b_i .

Seguindo o desenvolvimento apresentado por Soyster (1973), considere a substituição do módulo de x_j por uma variável auxiliar y_j , da seguinte forma: $y_j = |x_j|$, $-y_j \leq x_j \leq y_j$ e $y_j \geq 0$. Com esta nova variável e estas novas restrições é possível reescrever o problema apresentado acima [equações (40), (42) e (44)] como um problema de PL:

$$\max Z = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (45)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} y_j \leq b_i \quad \forall i \quad (46)$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (47)$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \quad (48)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \quad (49)$$

Esta formulação agrega robustez ao resultado encontrado, garantindo a factibilidade do modelo para toda realização \tilde{a}_{ij} no intervalo K_{ij} , entretanto também penaliza de forma excessiva a otimalidade da solução (Bertsimas e Sim, 2003). Para tratar o conservadorismo do modelo de Soyster (1973), outros pesquisadores desenvolveram propostas de otimização robusta que agregam maior flexibilidade a este tipo de estratégia, tais como, Ben-Tal e Nemirovski (1998; 1999; 2000), El-Ghaoui e Lebret (1997), El-Ghaoui *et al.* (1998), Bertsimas e Sim (2003; 2004), Bertsimas e Thiele (2006) e Bertsimas *et al.* (2004). Nesta tese, além da proposta de programação estocástica robusta de Mulvey *et al.* (1995) descrita na seção anterior, analisa-se as propostas apresentadas em Bertsimas e Sim (2003; 2004) e Bertsimas e Thiele (2006), devido a algumas vantagens relativas que são destacadas nas próximas seções.

3.4.5 Modelo de otimização robusta de Bertsimas e Sim

A principal contribuição do modelo de otimização robusta proposto por Bertsimas e Sim (2003) é a possibilidade de exercer um controle sobre o grau de conservadorismo da solução. Este controle é exercido pelo parâmetro Γ_i , apresentado pela

primeira vez na equação (51), que representa o grau de aversão ao risco que o decisor está disposto a correr, similarmente ao parâmetro ω do modelo de programação estocástica robusta (seção 3.4.3).

Para exemplificar o funcionamento da otimização robusta, considere o modelo de PL definido pelas equações (40) a (42). Considere também, que as incertezas do modelo estão presentes nos coeficientes da matriz tecnológica \tilde{a}_{ij} , $j \in J_i$ e com distribuição desconhecida, porém simétrica $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ (desenvolvimento análogo a este pode ser apresentado para a situação em que a incerteza está presente no vetor de custos c_j , conforme Bertsimas e Sim, 2003). Seja J_i o conjunto de parâmetros j que possuem incerteza para cada restrição i , Γ_i o grau de conservadorismo da restrição i , tal que $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$, e S_i um subconjunto de J_i ($S_i \subseteq J_i$), tal que $|S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor$. Desta forma, é possível escrever o seguinte modelo de PNL [equações (50) a (52)]:

$$\max Z = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (50)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{ij} |x_j| \right\} \leq b_i \quad \forall i \quad (51)$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \quad (52)$$

onde a função proteção da i -ésima restrição é dada pela seguinte expressão:

$$\beta_i(x_j, \Gamma_i) = \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} |x_j| + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{ij} |x_j| \right\} \quad (53)$$

Observe na formulação acima que se $\Gamma_i = |J_i|$, então tem-se a formulação de Soyster (1973) e se $\Gamma_i = 0$, tem-se o modelo determinístico. Desta forma, quando se adota valores de Γ_i no intervalo $[0, |J_i|]$, tem-se a flexibilidade de ajustar o conservadorismo da solução, como mencionado anteriormente. É interessante notar que, a função proteção (53) estabelece um colchão de segurança que procura garantir a factibilidade para a i -ésima restrição, independentemente do valor assumido pela variável aleatória que representa a incerteza do problema. Esta garantia de factibilidade cresce à medida que Γ_i se aproxima da cardinalidade do conjunto de parâmetros incertos J_i .

Para uma solução factível x_j conhecida a função de proteção (53) pode ser reescrita como um problema de otimização (Bertsimas e Sim, 2004), como segue:

$$\beta_i(x_j, \Gamma_i) = \max \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{ij} |x_j| z_{ij} \quad (54)$$

s.a.

$$\sum_{j \in J_i} z_{ij} \leq \Gamma_i \quad (55)$$

$$0 \leq z_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in J_i \quad (56)$$

Sendo este novo problema de otimização [equações (54)-(56)] factível e limitado, aplica-se o conceito de dualidade forte e introduzem-se as variáveis duais λ_i [associadas às restrições (55)] e ρ_{ij} [associadas às restrições (56)], para que seja possível reescrever o problema acima [equações (54) a (56)] por meio da seguinte formulação:

$$\min \sum_{j \in J_i} \rho_{ij} + \Gamma_i \lambda_i \quad (57)$$

s.a.

$$\lambda_i + \rho_{ij} \geq \hat{a}_{ij} |x_j| \quad \forall j \in J_i \quad (58)$$

$$\rho_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i \quad (59)$$

$$z_i \geq 0 \quad (60)$$

Para eliminar a função módulo na equação (58), pode-se considerar a substituição do módulo de x_j por uma variável auxiliar y_j , da seguinte forma: $y_j = |x_j|$, $-y_j \leq x_j \leq y_j$ e $y_j \geq 0$. Com esta nova variável e estas novas restrições é possível reescrever o modelo (57)-(60) de forma linear, como segue:

$$\min \sum_{j \in J_i} \rho_{ij} + \Gamma_i \lambda_i \quad (61)$$

s.a.

$$\lambda_i + \rho_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j \quad \forall j \in J_i \quad (62)$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \in J_i \quad (63)$$

$$\rho_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in J_i \quad (64)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (65)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \in J_i \quad (66)$$

Neste ponto, é possível substituir a formulação do modelo dual obtido para a i -ésima função proteção $\beta_i(x_j, \Gamma_i)$ [equações (61) a (66)] na equação (51) do modelo não linear original, desconsiderando a minimização por se tratar de um problema de maximização. Com este procedimento, a formulação obtida conserva a complexidade do modelo original, apenas

com a adição de algumas variáveis e restrições. A seguir, apresenta-se a formulação do modelo de otimização robusta correspondente:

$$\max Z = \sum_{j=1}^m c_j x_j \quad (67)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + \sum_{j=1}^{J_i} \rho_{ij} + \Gamma_i \lambda_i \leq b_i \quad \forall i \quad (68)$$

$$\lambda_i + \rho_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j \quad \forall i, j \in J_i \quad (69)$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \in J_i \quad (70)$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \quad (71)$$

$$\rho_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \quad (72)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \in J_i \quad (73)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad \forall i \quad (74)$$

Uma das vantagens da abordagem proposta por Bertsimas e Sim (2003; 2004) é a possibilidade de inferir, por meio de limitantes, a probabilidade de violação das restrições para os casos em que a variável aleatória ultrapasse o espaço de incerteza considerado. Para calcular o limitante que representa a probabilidade da i -ésima restrição do problema ser violada, considere que x_j^* é a solução do modelo de otimização robusta, $\theta = \Gamma_i/|J_i|$, $n = |J_i|$, $v = (\Gamma_i + n)/2$, e $\mu = v - \lfloor v \rfloor$. A formulação que segue é válida quando a distribuição de probabilidade que representa a variável aleatória é simétrica, limitada e independente (Bertsimas e Sim, 2004).

$$P\left(\sum_{j=1}^m \tilde{a}_{ij} x_j^* > b_i\right) \leq (1 - \mu)C(n, \lfloor v \rfloor) + \sum_{l=\lfloor v \rfloor+1}^n C(n, l) \quad (75)$$

onde:

$$C(n, l) = \begin{cases} \frac{1}{2^n}, \text{ caso } l = 0 \text{ ou } l = n, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{n}{(n-l)l}} \exp\left(n \log\left(\frac{n}{2(n-l)}\right) + l \log\left(\frac{n-l}{l}\right)\right), \text{ c.c.} \end{cases} \quad (76)$$

Outra opção apresentada por Bertsimas e Sim (2004) para o caso em que $\Gamma_i = \theta\sqrt{n}$, obtida por aproximação de De Moivre-Laplace, pode ser escrita da seguinte forma:

$$P\left(\sum_{j=1}^m \tilde{a}_{ij} x_j^* > b_i\right) \approx 1 - \Phi\left(\frac{\Gamma_i - 1}{\sqrt{n}}\right) \quad (77)$$

onde Φ é a função de distribuição acumulada da curva normal.

Tendo apresentado o desenvolvimento do modelo de otimização robusta correspondente e apresentado a probabilidade de violação das restrições do problema de otimização robusta, é possível listar algumas vantagens da utilização do modelo proposto por Bertsimas e Sim (2004).

- a) Agrega maior flexibilidade por meio do controle do conservadorismo adotado na análise;
- b) Resulta em um modelo de otimização linear que pode ser estendido para tratar problemas de PIM sem agregar complexidade computacional em relação ao modelo determinístico original;
- c) Pode ser aplicado em problemas práticos com grande quantidade de variáveis reais;
- d) Possibilita inferir a probabilidade de violação das restrições para os casos em que a variável aleatória ultrapasse o espaço de incerteza considerado.
- e) Não há necessidade de determinar as distribuições de probabilidade que representam as variáveis aleatórias consideradas. Este item foi considerado como ponto positivo da metodologia dado que existe dificuldade na definição das distribuições de probabilidade para a situação estudada. Entretanto, outros autores consideram este item como ponto negativo por não ser possível incorporar as informações de probabilidade quando este dado está disponível (Beyer e Sendhoff, 2007).

Bertsimas e Sim (2004) também apresentam testes de aplicações com a abordagem de otimização robusta em um problema de tamanho real disponível na biblioteca NETLIB. No caso reportado, os autores destacam que a perda de otimalidade é alta para o caso de proteção total ($\Gamma_i = |J_i|$) e que ao relaxar a proteção do modelo (fazendo Γ_i variar em $[0, |J_i|]$) ainda existe uma grande penalização da função objetivo. Resultados com boa robustez da solução só são alcançados com uma alta probabilidade de violação das restrições, ou seja, muito próximo do modelo determinístico ($\Gamma_i = 0$). A consideração feita neste trabalho para explicar esses resultados é que existe um número pequeno de parâmetros que impactam na solução do modelo e esta técnica apresenta melhores resultados quando o número de parâmetros incertos é relativamente grande. Na próxima seção apresenta-se brevemente a abordagem de Bertsimas e Thiele (2006) que demonstra uma extensão da abordagem de Bertsimas e Sim para tratar estas situações.

3.4.6 Modelo de otimização robusta de Bertsimas e Thiele

Bertsimas e Thiele (2006) apresentaram uma extensão da abordagem de Bertsimas e Sim (2003), considerando o controle da incerteza no parâmetro independente (b_i), particularmente quando este parâmetro modela a demanda de um problema de controle de estoque. Nesta abordagem, procura-se controlar o excesso de conservadorismo da otimização robusta em cenários com poucos parâmetros incertos. Também, pretende-se incorporar o crescimento da incerteza ao longo do tempo, propiciando que mais parâmetros sofram variação em períodos mais afastados do momento da realização do planejamento, consideração que é realista para situações reais de planejamento. Na seqüência são apresentadas as principais considerações deste modelo.

Considere o problema clássico de PL apresentado no modelo (40)-(42) (seção 3.4.4). Seja \tilde{b}_i uma variável aleatória para cada restrição i ($i = 1, \dots, n$) que assume uma distribuição desconhecida, porém simétrica com valores no intervalo $[b_i - \hat{b}_i, b_i + \hat{b}_i]$. Esta variável aleatória \tilde{b}_i pode ser calculada por $\tilde{b}_i = b_i + \hat{b}_i \eta_i$, onde $\eta_i = (\tilde{b}_i - b_i)/\hat{b}_i \in [-1, 1]$. Além disso, impõem-se limites para o desvio unitário η_i da variável aleatório \tilde{b}_i , definido como segue: $\eta_i \in \Omega = \{|\eta_i| \leq 1, \sum_{i'=1}^i |\eta_{i'}| \leq \Gamma_i, \forall i\}$, onde i' é um subconjunto dos índices i (considere, por exemplo, i períodos e i' subperíodos).

Considere agora a restrição (78), como sendo uma reformulação da equação (43) com a consideração da incerteza no parâmetro independente \tilde{b}_i e o escalonamento até o índice i , como segue:

$$\sum_{i'=1}^i \sum_{j=1}^m a_{i'j} x_j \leq \sum_{i'=1}^i \tilde{b}_{i'} \quad \forall i \quad (78)$$

Com esta modelagem cumulativa da incerteza, tem-se, para cada período i do horizonte de planejamento, o parâmetro Γ_i que impõe o valor máximo para os desvios acumulados. Segundo Bertsimas e Thiele (2006), estes desvios acumulados conduzem a uma abordagem de “razoável pior caso”, diferentemente da abordagem de “pior caso” de Bertsimas e Sim (2003). A principal consideração para Γ_i é que este parâmetro aumenta no máximo uma unidade por período i , ou seja, o aumento dos limites de incerteza não deve exceder o número de novos parâmetros em cada período.

É importante destacar que, a estratégia de reescrever o modelo por meio de restrições escalonadas, faz com que se tenha um somatório de variáveis aleatórias, tornando possível adotar algum controle sobre a quantidade de parâmetros incertos que podem sofrer alteração para cada restrição i . Desta forma, evita-se que se tenha uma matriz esparsa e,

consequentemente, atingir o modelo de Soyster (1973) quando o valor de Γ_i for igual a 1. Outras considerações sobre este tipo de modelagem são apresentadas nos capítulos 6 e 7.

De acordo com as definições apresentadas nessa seção, é possível reescrever a restrição (78) da seguinte forma:

$$\sum_{i'=1}^i \sum_{j=1}^m a_{i'j} x_j \leq \sum_{i'=1}^i \left(b_{i'} + \max_{\{\eta_{i'} \in \Omega\}} \{\hat{b}_{i'} \eta_{i'}\} \right) \quad \forall i \quad (79)$$

Aplicando a técnica de modelagem de otimização robusta (seção 3.4.5) para a i -ésima restrição, que nesse caso consiste em um problema de maximização do mínimo desvio admissível, tem-se:

$$\max \sum_{i'=1}^i \hat{b}_{i'} \eta_{i'} \quad (80)$$

s.a.

$$\sum_{i'=1}^i \eta_{i'} \leq \Gamma_i \quad (81)$$

$$0 \leq \eta_{i'} \leq 1 \quad \forall i' \leq i \quad (82)$$

Analogamente ao apresentado na seção 3.4.5, aplica-se o conceito de dualidade forte e introduzem-se as variáveis duais λ_i [associadas às restrições (81)] e $\rho_{i'i}$ [associadas às restrições (82)], para que seja possível reescrever o problema acima [equações (80) a (82)] por meio de sua formulação dual, como segue:

$$\min \sum_{i'=1}^i \rho_{i'i} + \Gamma_i \lambda_i \quad (83)$$

s.a.

$$\lambda_i + \rho_{i'i} \geq \hat{b}_i \quad \forall i' \leq i \quad (84)$$

$$\rho_{i'i} \geq 0 \quad \forall i' \leq i \quad (85)$$

$$\lambda_i \geq 0 \quad (86)$$

É possível agora substituir a formulação do modelo dual obtido para a i -ésima restrição das equações (79), desconsiderando a minimização por se tratar de um problema de maximização. Com isto, obtem-se uma formulação robusta que incorpora uma proteção contra incerteza de forma crescente no tempo.

Os conceitos revisados nas seções 3.4.3, 3.4.5 e 3.4.6 deste capítulo são particularmente importantes para o estudo de caso desta tese. Desta forma, pretende-se utilizar a teoria apresentada nesta revisão para agregar valor ao processo de decisão abordado de

planejamento agregado de safra no setor sucroenergético, tornando possível o tratamento das incertezas inerentes ao problema. O próximo capítulo apresenta o desenvolvimento dos modelos determinísticos propostos nesta tese e no capítulo 6 detalha-se a aplicação das técnicas de otimização robusta nestes modelos desenvolvidos.

Para uma melhor compreensão da teoria de otimização robusta, o leitor também pode consultar: Beyer e Sendhoff (2007), que apresenta um amplo *survey* sobre otimização robusta; Bertsimas e Sim (2004), que analisa o *trade-off* entre perda de otimalidade na solução e a garantia de factibilidade da solução para ambientes incertos quando é aplicada a otimização robusta; e, Ben-Tal e Nemirovski (1999), que estuda o problema da infactibilidade de programação linear quando são impostas pequenas perturbações nos dados de entrada. Algumas aplicações de otimização robusta podem ser encontradas em: Quaranta e Zaffanori (2008), Bertsimas e Thiele (2006), Maturana *et al.* (2008) e Natarajan *et al.* (2008).

4 MODELAGEM DETERMINÍSTICA

4.1 Modelo de Planejamento Agregado de Safra em Usinas Cooperadas do setor sucroenergético (PASUC)

Como visto anteriormente, um dos objetivos deste estudo é o desenvolvimento de um modelo de planejamento agregado de safra de um grupo de usinas cooperadas, buscando maximizar a margem de contribuição do sistema e agregar robustez ao plano de safra em um ambiente de incerteza. Desta forma, o modelo desenvolvido deve auxiliar na determinação do mix de produção de toda a cooperativa, na alocação de metas de produção para as usinas e na definição da política de estoque e de comercialização do sistema cooperado. Também deve auxiliar na definição da moagem semanal, dos prestadores de serviço de transporte de cana, dos processos produtivos industriais e da quantidade de energia elétrica exportada de cada usina.

Para atingir este objetivo, propõe-se uma extensão do modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção – SPDL/PU2 (Anexo A), apresentado por Paiva (2006) e Paiva e Morabito (2007; 2008). A motivação para elaborar essa extensão é o fato da USC ser uma usina que faz parte da CRPAAA. Este fato faz com que as decisões de mix de produção e determinação da política de estoque de todas as usinas cooperadas, incluindo a USC, sejam tomadas pela CRPAAA. Desta forma, o modelo SPDL/PU2 representa, principalmente, a realidade de uma usina não cooperada (classe **b**, segundo a classificação da seção 2.3.1), e não de uma usina que faz parte de uma cooperativa (classe **d**). Sendo assim, pode-se utilizar o modelo SPDL/PU2 para simular, por exemplo, a situação hipotética da USC fora da CRPAAA. Entretanto, para considerar com realismo a situação atual da empresa, é necessário estender o modelo em questão.

O modelo proposto nessa tese para tratar o planejamento de safra da USC e da CRPAAA pode ser caracterizado como modelo hierárquico de dois níveis. No primeiro nível (planejamento da CRPAAA para o ano safra) têm-se um modelo de PL, multiproduto, dois estágios, dinâmico, capacitado, com horizonte de planejamento anual e agregação temporal mensal. No segundo nível (planejamento da USC para os meses de safra), tem-se um modelo de PIM monoestágio, multiproduto (ou multiproduto), dinâmico e que combina decisões de dimensionamento e seqüenciamento de lotes, para o atendimento das metas do primeiro nível hierárquico. Além disso, no segundo nível, entende-se que o tempo de *setup* é de segunda ordem em relação ao período de análise e, desta forma, pode ser desconsiderado (*vide*

explicação no próximo parágrafo). Assim, adota-se 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 tempos representativos dado o período de análise adotado. Além disso, 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 a 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, utiliza-se um, e somente um, processo produtivo em cada semana.

Também é importante destacar que existe uma distinção entre o conceito de planejamento hierárquico adotado nesta tese e os clássicos modelos de planejamento hierárquico existentes na literatura de gestão da produção e pesquisa operacional (PO) (Hax e Candea, 1984). Para exemplificar essa distinção, considere os problemas de planejamento, dimensionamento e seqüenciamento da produção de uma fábrica. Os modelos hierárquicos clássicos são usualmente separados em três níveis de decisão, nível estratégico, nível tático e nível operacional.

No nível estratégico (planejamento), as decisões tomadas consideram as variáveis de longo prazo, adotando uma grande agregação dos produtos e flexibilizando as capacidades produtivas. No nível tático (dimensionamento), são definidos os lotes de produção considerando variáveis de médio prazo, em um modelo capacitado que considera uma agregação dos produtos em famílias e desconsidera os tempos e custos de *setup* de produção. No nível operacional (seqüenciamento) é definido o seqüenciamento da produção, em um modelo de curto prazo, capacitado, com considerações de *setups* e sem agregação de

produtos. Para mais detalhes destes modelos, o leitor pode consultar, por exemplo, Hax e Candea (1984).

No modelo proposto nesta tese, a hierarquia existente se estabelece na relação de imposição de metas de produção da cooperativa para as usinas. A idéia é que a cooperativa execute seu planejamento de safra considerando a margem de contribuição existente entre a receita líquida de comercialização dos produtos e os custos de produção de todas as usinas e de estocagem/falta de todo o sistema cooperado (Figura 12). Desta forma, pretende-se definir o mix de produção de cada unidade, a política de estocagem e de comercialização de toda a produção dos açúcares, dos alcoóis e dos melaços. Esta primeira etapa do processo de decisão é convertida em metas de produção de cada produto, para cada uma das usinas em todos os meses de safra, conforme ilustrado na Figura 12. Vale ressaltar que, os custos para entrega dos produtos nos armazéns da CRPAAA estão incorporados no custo de produção de cada usina e que o custo de entrega dos produtos para os clientes, caso exista, é considerado uma despesa de comercialização e, portanto, descontado do valor bruto de venda dos produtos.

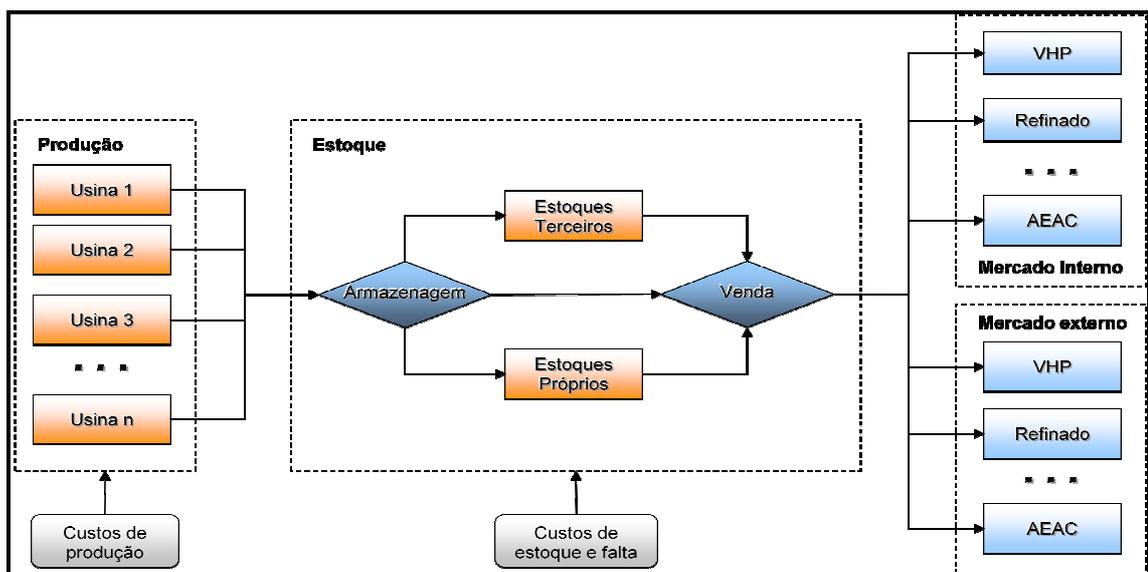


Figura 12. Fluxo de material do primeiro nível de decisão do modelo PASUC

No caso das usinas, analisa-se a capacidade de produção, a disponibilidade de matéria-prima e a capacidade de caixa de forma mais desagregada, procurando atender às metas estabelecidas pela cooperativa com a melhor margem de contribuição possível. Em outras palavras, o modelo proposto possui um primeiro nível (mais estratégico) de planejamento agregado, com horizonte de planejamento de um ano safra, dividido em períodos mensais e uma pequena agregação em famílias de produtos para alguns parâmetros relacionados com os processos produção. É importante salientar que, esta agregação proposta

não se reflete nas metas de produção repassadas para o segundo nível de planejamento. A Figura 13 ilustra o fluxo de decisão do primeiro nível do modelo desta tese.

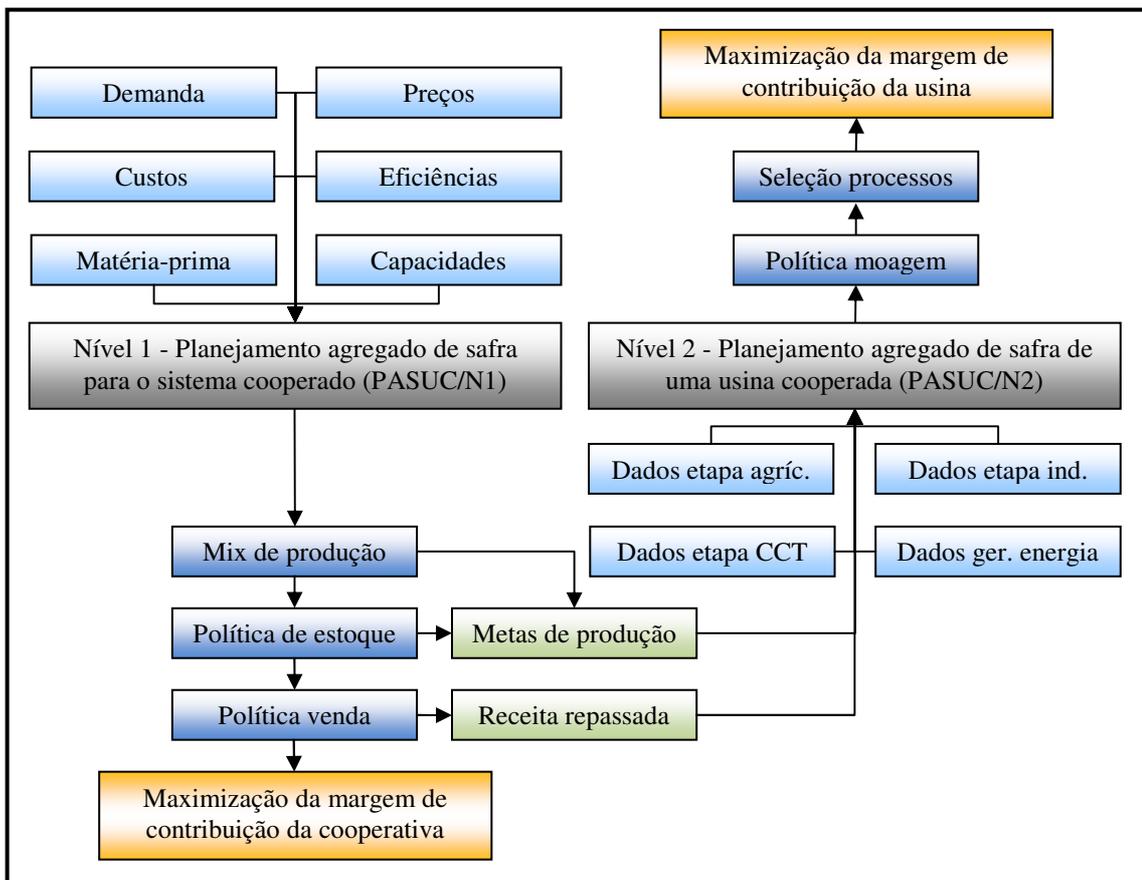


Figura 13. Fluxograma de correlacionamento entre os dois níveis do planejamento hierárquico

No segundo nível (tático) do modelo de planejamento agregado, o horizonte passa a ser o período de safra ou um subperíodo deste, dividido em períodos semanais, e existe uma menor agregação com relação ao nível de análise dos processos produtivos da empresa. Neste nível, o modelo deve selecionar os processos que devem ser utilizados em cada semana de safra e definir o ritmo de moagem considerando questões agronômicas, questões relativas à capacidade de CCT e questões industriais, de forma que a melhor margem de contribuição seja alcançada pela usina. Neste segundo nível de decisão não há agregação de produtos.

Outra consideração que merece destaque é a incorporação da geração e da comercialização de energia elétrica no processo decisório do segundo nível do modelo hierárquico PASUC/N2 (seção 4.3). Fato que se justifica pelos crescentes níveis de investimento em energia limpa, como destacado na seção 2.1, assim como, pela necessidade de uma melhor representação do funcionamento da indústria, onde o balanço de energia e de vapor são pontos decisivos para a boa operação da planta industrial. Este ponto já havia sido

levantado por Paiva (2006) como importante extensão do modelo SPDL/PU2. Por conveniência, o modelo SPDL/PU2 está apresentado no Anexo A.

A modelagem adotada no presente estudo considera o balanço térmico (balanço de vapor), incorporando restrições de consumo de vapor de alta pressão (vapor direto) nas etapas de preparo de cana (navalhas e desfibradores), na moagem (turbinas da moenda), na alimentação de águas de caldeira (turbo bombas), na geração de energia (turbo geradores) e rebaixamento de vapor de alta pressão para vapor de processo. Este vapor de processo também é considerado na modelagem, definindo necessidades de vapor de escape (vapor de baixa pressão) para o aquecimento do caldo, a evaporação, a cristalização, a centrifugação e a secagem do açúcar, além do vapor utilizado na destilação do vinho na produção do álcool. De forma similar ao que está descrito para o balanço térmico, o balanço de energia elétrica incorpora as necessidades de utilização de energia para os bombeamentos de água e material em processo, para motores elétricos de vários usos (por exemplo, centrifugação do açúcar, movimentação de mesas alimentadoras de cana, movimentação de esteiras de bagaço, exaustores), além do consumo de energia elétrica para outros usos (por exemplo, iluminação, refrigeração).

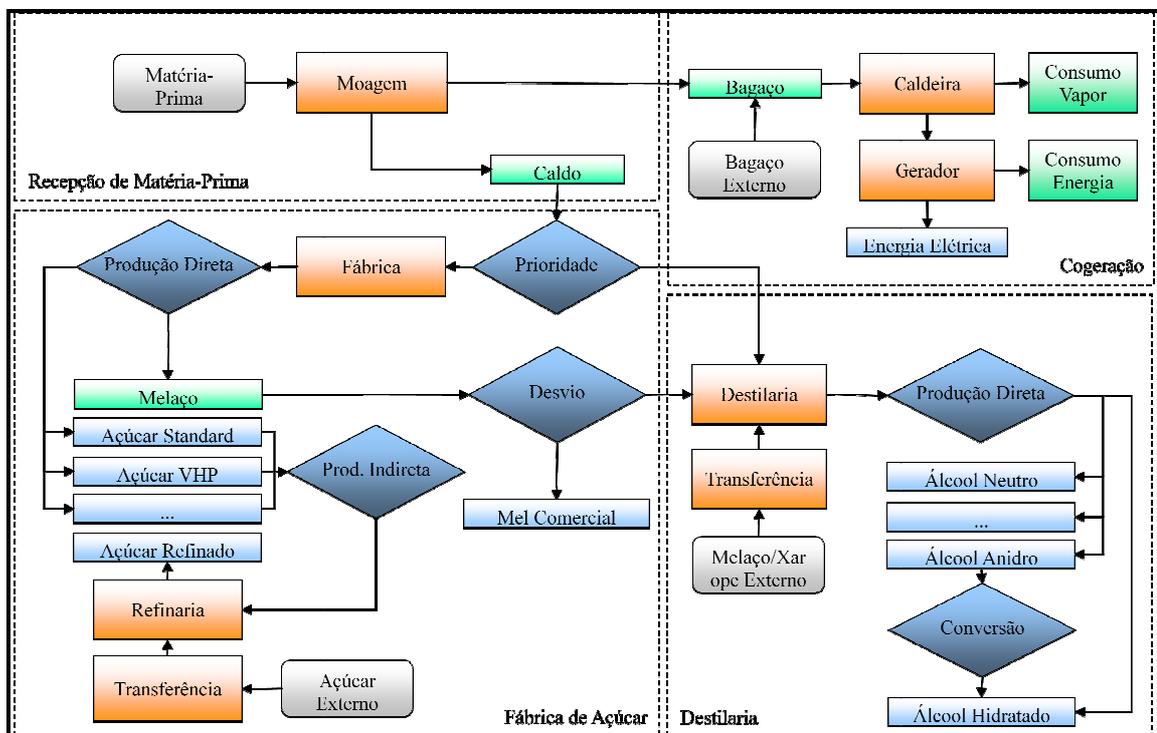


Figura 14. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e energia elétrica

O vapor de processo e a energia elétrica consumida pela fábrica são requeridos em diferentes quantidades para cada configuração de mix de produção (para cada processo de produção selecionado). Por outro lado, o consumo de vapor direto apresenta variação em

função da moagem de cana. Desta forma, a modelagem da interrelação entre a moagem, os processos de produção de açúcar, álcool e melação, com a produção de vapor e a cogeração de energia é parte importante da modelagem para uma melhor representação do funcionamento da indústria. A Figura 14 ilustra de forma simplificada a interrelação entre o processo de produção de açúcar, álcool e energia elétrica de uma unidade produtora. Neste ponto, é importante destacar que o custo variável da energia elétrica é considerado nulo para a modelagem apresentada na seção 4.2, ou seja, todos os custos envolvidos são fixos em função da quantidade de energia cogorada. Desta forma, o consumo de biomassa (bagaço) é única variação significativa para a obtenção da receita marginal com a energia elétrica.

Uma vez delineados os principais itens da análise, a formulação matemática do modelo pode ser desenvolvida e posteriormente validada. Nas próximas seções, apresenta-se toda a estrutura do modelo de Planejamento Agregado de Safra em Usinas Cooperados do setor sucroenergético (PASUC). Iniciando pelo primeiro nível do planejamento hierárquico, que trata do planejamento agregado de safra da cooperativa (PASUC/N1), seção 4.2. Na seqüência, expõe-se o modelo de planejamento de safra da usina incorporando a cogeração de energia (PASUC/N2), seção 4.3 e, por fim, a geração de parâmetros do modelo de planejamento de safra da usina (seção 4.4).

4.2 Nível 1 - Planejamento de safra da cooperativa (PASUC/N1)

Como citado anteriormente, o PASUC/N1 é um modelo de PL, multiproduto, dois estágios, dinâmico, capacitado, com horizonte de planejamento para o ano safra e agregação temporal mensal. Este modelo pretende determinar a quantidade e o mix de produção (PU_{pt}) das usinas, a política de estoque (I_{pet}) e a política de atendimento da demanda (D_{pt}) da CRPAAA. Estas variáveis devem ser determinadas de forma que a margem de contribuição do grupo seja maximizada e as restrições de mercado, previsão de safra, capacidade de transporte das frotas e capacidade de estoque sejam respeitadas.

Para tanto, considera-se os dados de demanda pelos produtos comercializados (DP_{pm} , DM_p), os preços esperados para cada produto (VP_{pt}), os custos de produção de cada produto em cada período (CP_{pt}), custos de estocagem (CE_{pe}) e custos de atraso na entrega (CA). Também são considerados os dados de capacidades de produção e moagem das usinas ($CPmax_{pw}$, $CFmax_{pw}$, $CDmax_{pw}$, $Mmax_u$, $Mmin_u$), capacidade de estocagem ($E_{max_{pe}}$), as eficiências globais de conversão de ATR (Açúcares Redutores Totais) das usinas ($E_{atr_{ut}}$) e a quantidade e qualidade da cana-de-açúcar disponível para processamento em cada usina (C_{u0} , ATR_{ut}). Além dos dados auxiliares para a modelagem do tempo disponível (n_{ut} , φ_{ut}),

determinação do balanço de ATR da fábrica ($\theta_{pa,t}$, $Matr_u$, $Patr_p$) e regulação de estoque (I_{pe0} , EP_p). Os índices, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições do modelo PASUC/N1 são apresentadas a seguir.

Índices do modelo PASUC/N1

- u Usinas: índice utilizado para identificar cada uma das usinas cooperadas ($u = cap, pai, pal, pri, usc, usm, ser, sim, usu, tri$);
- t Períodos: meses do ano safra na região nordeste, iniciando em setembro ($t = set, out, nov, dez, jan, fev, mar, abr, mai, jun, jul, ago$);
- p Produtos: produtos que podem ser produzidos pelas usinas cooperadas, tanto na fábrica de açúcar, quanto na destilaria de álcool ($p = Standard, Superior, Especial, Extra, Refinado, VHP, VHP+, VHPe, Melação, AEHC, AEHCren, AEAC$). 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 pa , pe , pm , mostrados a seguir:
- pa Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar ($ps = Standard, Superior, Especial, Extra, Refinado, VHP, VHP+, VHPe$);
- pe Subconjunto de produtos da destilaria ($pe = AEHC, AEHCren, AEAC$);
- pm Subconjunto de co-produtos da fábrica de açúcar ($pm = Melação$);
- e Depósitos: conjunto de depósitos (tanques e armazéns), tanto próprio quanto terceirizado ($e = tab, jar, MDI, empat, Aterc, usinas, tpetro, Eterc$).

Parâmetros

- n_{ut} Dias disponíveis para moagem em cada usina u e período t (adimensional);
- φ_{ut} Tempo de moagem aproveitado na usina u durante um período t (%);
- $\theta_{pa,t}$ Melação obtido por unidade de açúcar pa produzido na usina u (%);
- $Matr_u$ ATR do mel final na usina u (%);
- $Patr_p$ ATR correspondente ao produto p (t/t ou m³);
- $Eatr_{ut}$ Eficiência global em ATR na usina u e no período t (%);
- ATR_{ut} ATR da cana da usina u no mês t (kg ATR/t de cana)
- $Mmin_u$ Moagem mínima da usina u (t/dia);
- $Mmax_u$ Moagem máxima da usina u (t/dia);
- $Emax_{p,e}$ Capacidade máxima de estoque do produto p no depósito e (t ou m³);
- $CPmax_{pu}$ Capacidade de produção diária do produto p na usina u (t ou m³/dia);
- $CFmax_u$ Capacidade diária total de produção da fábrica de açúcar na usina u (t/dia);
- $CDmax_u$ Capacidade diária total de produção da destilaria de álcool na usina u (m³/dia);

CP_{pu}	Custo de produção do produto p na usina u (\$/t ou m^3);
CE_{pe}	Custo de estocagem do produto p no depósito e (\$/t ou m^3);
CA	Penalização por atraso na entrega da demanda (\$/t ou m^3);
$Dmin_{pt}$	Demanda mínima para o produto p no período t (t ou m^3);
$Dmax_p$	Demanda máxima para o produto p durante todo o ano (t ou m^3);
VP_{pt}	Valor líquido do produto p no período t (\$/t ou m^3);
C_{u0}	Previsão de moagem de cana para toda a safra da usina u (t);
I_{pe0}	Estoque inicial de cada produto p no depósito e (t ou m^3);
EP_p	Estoque de passagem de safra do produto p (t ou m^3);

Variáveis do modelo PASUC/N1

M_{ut}	Variável de quantidade de cana moída na usina u , no período t (t);
I_{pet}^+	Variável de estoque do produto p , no depósito e , no final do período t (t ou m^3);
I_{pt}^-	Variável de atraso na entrega do produto p , no final do período t (t ou m^3);
PU_{put}	Variável de produção do produto p , na usina u , no período t (t ou m^3);
D_{pt}	Variável de atendimento da demanda do produto p , no período t (t ou m^3). Pode ser interpretado como a venda do produto p , no período t ;

Função objetivo do modelo PASUC/N1

$$\max Z = \left(\sum_t \sum_p VP_{pt} D_{pt} \right) - \left(\sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pet}^+ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pt}^- \right) \quad (87)$$

Na expressão (87), apresenta-se a função objetivo do modelo estratégico CRPAAA. Nesta função objetivo pretende-se maximizar a margem de contribuição ao lucro da produção dos produtos p , em cada usina u , em todos os períodos t , considerando também os custos com a política de estoque e o atendimento da demanda. Em seu primeiro termo, tem-se a receita obtida pela venda de cada produto p , em cada período t . No segundo termo faz-se a somatória do custo de produção do produto p (CP_{pu}), com o custo de estocagem de cada produto p , em cada tipo de estoque e (CE_{pe}) e com a penalização por atraso na entrega dos produtos (CA).

Restrições do modelo PASUC/N1

$$\sum_e I_{pet}^+ = \sum_e I_{p,e,t-1}^+ + \sum_u PU_{put} - D_{pt} + I_{pt}^- - I_{p,t-1}^- \quad \forall p, t \quad (88)$$

$$D_{pt} \geq Dmin_{pt} \quad \forall p, t \quad (89)$$

$$Dmax_p \geq \sum_t D_{pt} \quad \forall p \quad (90)$$

$$C_{u0} = \sum_t M_{ut} \quad \forall u \quad (91)$$

$$Mmin_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \leq M_{ut} \leq Mmax_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \quad \forall u, t \quad (92)$$

$$I_{pet}^+ \leq Emax_{pe} \quad \forall p, e, t \quad (93)$$

$$\sum_e I_{pe}^{+T^n} \geq EP_p; I_{p}^{-T^n} = 0 \quad \forall p \quad (94)$$

$$PU_{put} \leq CPmax_{pu} \cdot n_{ut} \quad \forall p, u, t \quad (95)$$

$$\sum_{pa} PU_{pa,u,t} \leq CFmax_u \cdot n_{ut} \quad \forall u, t \quad (96)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \leq CDmax_u \cdot n_{ut} \quad \forall u, t \quad (97)$$

$$\frac{M_{ut} \cdot ATR_{ut} \cdot Eatr_{ut}}{1000} = \sum_p PU_{put} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (98)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \cdot Patr_{pe} + \sum_{pm} PU_{pm,u,t} \cdot Matr_u \geq \sum_{pa} PU_{pa,u,t} \cdot \theta_{pa,u} \cdot Matr_u \quad \forall u, t \quad (99)$$

$$M_{ut} \geq 0; I_{pet}^+ \geq 0; I_{pt}^- \geq 0; PU_{put} \geq 0; D_{pt} \geq 0 \quad \forall p, e, u, t \quad (100)$$

A equação (88) representa o balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t , considerando a possibilidade de atraso na entrega de cada produto. O atraso é modelado com a variável I_{pt}^- e significa que a cooperativa pode manter estoque negativo do produto p , no período t , para atender este pedido com produção de períodos posteriores. Esta restrição foi modelada de forma a permitir uma demanda dinâmica (Johnson e Montgomery, 1974). Ou seja, o atendimento da demanda (D_{pt}) é uma variável canalizada que indica a quantidade do produto p que será vendido no período t . Desta forma, é possível diferenciar o atendimento da demanda já contratada, ou seja, atendimento da demanda que já está comprometida com os clientes da CRPAAA ($Dmin_{pt}$), e a demanda que será destinada ao mercado *spot* ($D_{pt} - Dmin_{pt}$), além de manter o mesmo preço dos produtos VP_{pt} para os dois casos.

A inequação (89) é a restrição que determina o atendimento da demanda mínima do produto p , no período t . Na restrição (90) a venda do produto p para toda a safra é limitada ao valor de demanda máxima ($Dmax_{pt}$). Este valor de demanda máxima pode ser interpretado como a quantidade máxima que os decisores da CRPAAA identificam como possível de ser absorvida pelo mercado sem causar redução de preços. Caso exista uma concentração grande de oferta para um determinado produto e mercado, principalmente o mercado interno, a consideração de linearidade entre atendimento da demanda e preço dos produtos torna-se questionável e, portanto, o resultado do modelo deve ser considerado com cautela.

A equação (91) é a restrição de utilização de toda a cana disponível na safra, para cada usina u . Ou seja, a usina não pode deixar cana de uma safra para a outra (cana “bisada”). A inequação (92) é a restrição de moagem em cada usina u , para cada período t . O valor de moagem máxima diária ($Mmax_u$) se deve à capacidade da moenda de casa usina u e à regulagem, estabelecida no início da safra, de abertura e velocidade de rotação dos rolos da moenda. O valor de moagem mínima diária ($Mmin_u$) 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_{ut} é o percentual de tempo aproveitado de cada usina u , durante cada período t . Este parâmetro representa o percentual de tempo que a usina fica em funcionamento, dado o tempo total disponível no período. O parâmetro n_{ut} se refere ao número de dias de moagem, desconsiderando as paradas programadas no período de análise t . Desta forma, tem-se uma separação entre as paradas programadas (n_{ut}) e as paradas acidentais (φ_{ut}).

A inequação (93) é a restrição de capacidade máxima ($Emax_{pe}$) de estoque para cada produto p , em cada depósito e , nos períodos t . As inequações (94) regulam o estoque e o atraso de cada produto p , no último período $t=T$ (utilizado simplesmente a notação “ T ” para representar o último período) do horizonte de planejamento. Estas restrições são importantes para controlar a quantidade “estratégica” de produtos que deve ser deixada em estoque para atender contratos de início da próxima safra, ou explorar expectativas de oscilação no preço dos produtos.

As restrições (95), (96) e (97) modelam, respectivamente, a capacidade de produção de cada produto p , de todos os produtos da fábrica de açúcar e de todos os produtos da destilaria de etanol, para cada usina u , em cada período t . Estas restrições são importantes para evitar o estabelecimento de metas de produção inviáveis para as usinas no PASUC/N2 (seção 4.3).

A restrição (98) representa o balanceamento de Açúcares Totais Recuperáveis (ATR) para cada usina u , em cada período t . Esta restrição controla o balanço do ATR, ou seja, estabelece que todo o ATR disponível na cana-de-açúcar (parte esquerda da equação) é igual ao ATR disponível nos produtos finais (parte direita da equação), para uma dada eficiência global em ATR ($Eatr_{ut}$). É interessante destacar que os valores de eficiência global em ATR podem ser maiores que 100%. Isto significa que a usina em questão está com uma recuperação maior que a usina padrão utilizada para a determinação dos índices de eficiência em ATR (CONSECANA-AL, 2008a)

A inequação (99) delimita a utilização do melaço produzido como co-produto da fábrica de açúcar, na destilaria anexa da própria usina u , no período t , ou para venda no mesmo período t . Esta restrição é importante para garantir a destinação do mel residual da produção de açúcar, para a venda ($PU_{pm,u,t}$) ou para a produção de álcool ($PU_{pe,u,t}$). Por fim, em (100) estão descritas as restrições de domínio das variáveis de decisão do modelo.

Neste modelo, tem-se P produtos, U usinas, E depósitos e T períodos. No total são $T(2U+PE+2P+PU)$ variáveis e $T(2P+8U+PE+PU)+2P+U+1$ restrições. Por exemplo, considerando os dados do problema do estudo de caso do capítulo 5 com $P=12$, $U=10$, $E=8$, $T=12$, o modelo estratégico PASUC/N1 resulta num modelo de programação linear com 3121 variáveis e 3875 restrições.

4.3 Nível 2 - Planejamento tático de safra de uma usina cooperada incorporando cogeração de energia (PASUC/N2)

O modelo matemático PASUC/N2 é um modelo de PIM, monoestágio, multiprocesso (ou multiproduto), dinâmico, que combina decisões de dimensionamento e seqüenciamento de lotes de processos, para o atendimento das metas do primeiro nível hierárquico de planejamento de safra (PASUC/N1). Neste modelo, pretende-se determinar qual a moagem semanal por tipo de fonte de suprimento m (M'_{mt}), por tipo serviço de transporte f (M''_{ft}) e por cada processo k (M'''_{kt}), de forma que a meta de produção do modelo PASUC/N1 seja viabilizada com o mínimo de atraso possível, ao mesmo tempo em que se determina a quantidade de energia elétrica exportada no período t (EE_t). O objetivo deste conjunto de decisões táticas é obter um plano de safra que proporcione a máxima margem de contribuição da usina, respeitando as restrições de previsão de safra, capacidade de transporte das frotas, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e necessidade de energia térmica e elétrica nos processos industriais.

A seguir são apresentados os índices, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições do modelo PASUC/N2 (alguns deles são reapresentados para facilitar a leitura do modelo). Nesta seção, destacam-se os cálculos da cogeração de energia para facilitar o entendimento dessa modelagem.

Índices do modelo PASUC/N2

- k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool ($k = proc1, proc2, \dots, proc252$);
- t Períodos: períodos de safra que indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar ($t = sem1, sem2, \dots, sem25$);

- p* Produtos fabricados: produtos que podem ser produzidos pela empresa, tanto na fábrica de açúcar quanto na destilaria de álcool ($p = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VHP+, VHPe, Melação, AEHC, AEAC$). 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 pa, pe, pm , mostrados a seguir:
- pa Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar ($pa = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VHP+, VHPe$);
- pe Subconjunto de produtos da destilaria ($pe = AEHC, AEAC$);
- pm Subconjunto de resíduos da usina ($pm = Melação$);
- m* Matérias-primas: determinado de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana provêm ($Mprop, Mforn$). Para algumas restrições, adota-se o subconjunto das matérias-primas próprias, como segue:
- mp Subconjunto de canas que são administradas pela própria usina ($Mprop$);
- f* Frota: determinado de acordo com o tipo de solução de CCT (Corte, Carregamento e Transporte) empregada. Entretanto, nesta tese, adota-se uma postura simplificada de análise, diferenciando apenas o tipo de prestador de serviço de transporte de cana que está sendo utilizado ($Fprop, Fterc$);

Parâmetros do modelo PASUC/N2

- $ConvA_{pa}^{CRPAAA}$ Conversão de açúcares pa em cristal *Standard* (adimensional);
- $ConvE_{pe}^{CRPAAA}$ Conversão dos alcoóis pe em AEAC (adimensional);
- $Matr_{USC}$ ATR do mel final na USC (%);
- n_t Dias disponíveis para moagem em cada período t (adimensional);
- φ_t Tempo de moagem aproveitado durante um período t (%);
- $Patr_p$ ATR correspondente ao produto p (t/t ou m³);
- ATR_t ATR da cana no período t (kg ATR/t de cana)
- $Mmin$ Moagem mínima da usina (t/dia);
- $Mmax$ Moagem máxima da usina (t/dia);
- $Fmax_f$ Capacidade máxima de transporte de cana pelos caminhões da frota f (t/dia);
- $CPmax_p$ Capacidade de produção diária do produto p (t ou m³/dia);
- $CFmax$ Capacidade diária total de produção da fábrica de açúcar (t/dia);
- $CDmax$ Capacidade diária total de produção da destilaria de álcool (m³/dia);
- α_t Percentual máximo de cana de fornecedores por período t (%);
- β_{ft} Disponibilidade para transporte dos caminhões da frota f , no período t (%);

CF_{ft}	Custo de corte, carregamento e transporte pela frota f , no período t (\$/t);
CA	Penalização por atraso na entrega da demanda (\$/t ou m^3);
$Gfixo$	Gasto fixo médio em um período t (\$);
GK_{kt}	Gastos variáveis na indústria por processo k , no período t (\$);
GM_{mt}	Gastos variáveis por tipo de matéria-prima m , no período t (\$);
GF_{ft}	Gastos variáveis por tipo de frota f , no período t (\$);
$Giro_0$	Saldo de caixa inicial da empresa (\$);
RCa_p	Repasse CRPAAA - adiantamento da cooperativa pela produção do produto p , no período t (\$/t ou m^3);
RCb	Repasse CRPAAA - adiantamento da cooperativa pelo ATR equivalente produzido (\$/kg de ATR);
RCc_t	Repasse CRPAAA - adiantamento extra obtido no período t (\$/sem)
C_0	Previsão de moagem de cana para toda a safra (t);
$Disp_t$	Parâmetro limitante para o total de cana própria disponível no período t (t);
G	Número suficientemente grande (adimensional);

Além destes parâmetros, utiliza-se também os dados provenientes do método de geração de parâmetros do modelo PASUC/N2 (seções 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3), são eles: $RecA$ (Receita açúcares CRPAAA), $RecE$ (Receita alcoóis CRPAAA), $RecM$ (Receita melão CRPAAA), $ProdA$ (Produção equivalente açúcares CRPAAA), $ProdeE$ (Produção equivalente alcoóis CRPAAA), $ProdM$ (Produção equivalente melão CRPAAA), $Meta_{pt}$ (Meta de produção), A_{pkt} (Matriz de rendimentos industriais), CK_{kt} (Matriz de custos industriais) e CM_{mt} (Matriz de custos agrícolas).

A seguir são apresentados os parâmetros utilizados para a modelagem da cogeração de energia neste modelo.

Ib_0	Estoque inicial de bagaço (t);
$Fibra_{mt}$	Fibra da cana tipo m , no período t (%);
Ub_t	Umidade do bagaço após a moenda, no período t (%);
Eb	Percentual mínimo de estoque do bagaço produzido (%);
EPb	Estoque de bagaço para passagem de safra (t);
RC	Rendimento médio das caldeiras (t vapor/t bagaço);
RCF	Rendimento médio da casa de força (MWh/t vapor);
$CFVAP$	Consumo fixo de vapor na moagem (t de vapor/t de cana);
$CVAP_p$	Consumo variável de vapor servido em cada produto p (t vapor/t ou m^3);
CFE	Consumo fixo de energia na moagem (MWh/t de cana);

- CVE_p Consumo variável de energia em cada produto p e processo k (MWh/t ou m3);
 VAP_{max} Produção diária máxima de vapor (t/dia);
 EG_{max} Geração diária máxima de energia (MWh/dia);
 VE Valor da energia vendida (\$/MWh)

Variáveis do modelo PASUC/N2

- X_{kt} Variável de seleção de processos. Decisão de utilizar ($X_{kt} = 1$) ou não utilizar ($X_{kt} = 0$) o processo k , no período t (adimensional);
 M_t Variável de quantidade de cana moída no período t (t);
 M'_{mt} Variável de quantidade de cana colhida em cada fornecedor m , no período t (t);
 M''_{ft} Variável de quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte f , no período t (t);
 M'''_{kt} Variável de quantidade de cana moída pelo processo k , no período t (t);
 C_{mt} Variável de quantidade de cana disponível para ser colhida em cada tipo de matéria-prima m , no período t (t);
 S_t Variável de quantidade de capital disponível para giro financeiro no período t (\$);
 I_{pt}^- Variável de atraso no atendimento da demanda do produto p , no período t (t ou m³);

A seguir são apresentadas as variáveis relacionadas com os cálculos da cogeração de energia neste modelo.

- Ib_t Variável de estoque de bagaço para geração de energia no período t (t);
 Mb_t Variável de quantidade de bagaço consumido para geração de vapor no período t (t);
 VAP_t Variável de quantidade de vapor produzido no período t (t);
 EG_t Variável de quantidade de energia produzida no período t (MWh);
 EE_t Variável de quantidade de energia exportada no período t (MWh);

Função objetivo do modelo PASUC/N2

$$\max Z = \sum_t \left(\sum_k \left(\sum_{pa} \frac{A_{pa,k,t} M'''_{kt} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA + \sum_{pe} \frac{A_{pe,k,t} M'''_{kt} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{ProdE} RecE + \sum_{pm} \frac{A_{pm,k,t} M'''_{kt} Matr_{USC}}{ProdM} RecM \right) + EE_t VE \right) - \left(\sum_m CM_{mt} M'_{mt} + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} + CA \sum_p I_{pt}^- \right) \quad (101)$$

Na expressão (101) apresenta-se a função objetivo do modelo PASUC/N2. Nela pretende-se 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 em todos os períodos t , considerando a remuneração decorrente da participação percentual do resultado obtido pela CRPAAA e incluindo a receita de energia exportada.

No primeiro termo da função objetivo, tem-se o cálculo da receita da USC. Para calcular esta receita, são utilizados os parâmetros de receita total da CRPAAA para cada família de produto ($RecA$, $RecE$ e $RecM$), e os parâmetros de produção equivalente dos açúcares pa ($Proda$, dado em cristal *Standard* equivalente), dos alcoóis pe ($Prode$, dado em álcool anidro *AEAC* equivalente), e dos melaços pm ($ProdM$, dado em ATR no melaço) de todas as usinas u cooperadas, em toda a safra (seção 4.4.1). Com estes dados, e a produção da USC convertida para os padrões de açúcar, álcool e melaço equivalente, é possível calcular a receita repassada pela CRPAAA para a USC decorrente do percentual de participação dessa usina no total da produção equivalente da cooperativa.

Ainda no primeiro termo da função objetivo, considera-se a receita proveniente da cogeração de energia (EE_t) e, no segundo termo, faz-se a somatória dos custos de obtenção da matéria-prima m (CM_{mt}), do transporte da matéria-prima f (CF_{ft}), da utilização de cada processo k (CK_{kt}) e da penalização por atraso (CA) no atendimento da meta da CRPAAA.

Restrições do modelo PASUC/N2

$$\sum_{t=1}^{t'} \sum_k A_{pkt} \cdot M_{kt}''' + I_{pt}^- \geq \sum_{t=1}^{t'} Meta_{pt} \quad \forall p, t' \quad (102)$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t \quad \forall t \quad (103)$$

$$C_{mt} = C_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt} \quad \forall m, t \quad (104)$$

$$\sum_m C_{m0} = \sum_t \sum_m M'_{mt} \quad (105)$$

$$\sum_{mp} C_{mp,t} \leq Disp_t \quad \forall t \quad (106)$$

$$\sum_{mf} M'_{mf,t} \leq \alpha_t \cdot M_t \quad \forall t \quad (107)$$

$$Mmin \cdot n_t \cdot \varphi_t \leq M_t \leq Mmax \cdot n_t \cdot \varphi_t \quad \forall t \quad (108)$$

$$S_t = S_{t-1} + \left(\sum_p \sum_k \left(\begin{matrix} RCa_p \\ + Patr_p Rcb \end{matrix} \right) A_{pkt} M_{kt}''' \right) - \left(\begin{matrix} \sum_m GM_{mt} M'_{mt} + \sum_f GF_{ft} M''_{ft} \\ + \sum_k GK_{kt} M'''_{kt} + Gfixo \end{matrix} \right) \quad \forall t \quad (109)$$

$$M''_{ft} \leq Fmax_f \cdot n_t \cdot \beta_{ft} \quad \forall f, t \quad (110)$$

$$\sum_k A_{pkt} \cdot M'''_{kt} \leq CPmax_p \cdot n_t \quad \forall p, t \quad (111)$$

$$\sum_{pa} \sum_k A_{pa,k,t} \cdot M'''_{kt} \leq CFMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (112)$$

$$\sum_{pe} \sum_k A_{pe,k,t} \cdot M'''_{kt} \leq CDMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (113)$$

$$\sum_k X_{kt} = 1 \quad \forall t \quad (114)$$

$$M'''_{kt} \leq G \cdot X_{kt} \quad \forall k, t \quad (115)$$

A seguir são apresentadas as restrições relacionadas com os cálculos da cogeração de energia neste modelo .

$$Ib_t = Ib_{t-1} + \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1-UB_t} \right) - Mb_t \quad \forall t \quad (116)$$

$$Ib_t \geq \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1-UB_t} \right) \cdot EB \quad \forall t \quad (117)$$

$$Ib_{T'} \geq EPb \quad (118)$$

$$Mb_t \cdot RC = VAP_t \quad \forall t \quad (119)$$

$$VAP_t \geq \sum_k M'''_{kt} \cdot CFVAP + \frac{EG_t}{RCF} \geq \sum_k \sum_p CVAP_p \cdot A_{pkt} \cdot M'''_{kt} \quad \forall t \quad (120)$$

$$EG_t - \left(\sum_k CFE \cdot M'''_{kt} + \sum_k \sum_p CVE_p \cdot A_{pkt} \cdot M'''_{kt} \right) = EE_t \quad \forall t \quad (121)$$

$$VAP_t \leq VAPMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (122)$$

$$EG_t \leq EGMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (123)$$

$$X_{kt} \in \{0,1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; C_{mt} \geq 0; I_{pt}^- \geq 0; S_t \geq 0; Ib_t \geq 0; Mb_t \geq 0; VAP_t \geq 0; EG_t \geq 0; EE_t \geq 0 \quad \forall k, m, f, p, t \quad (124)$$

A restrição (102) representa o atendimento da meta de produção acumulada de todos os produtos p , até o período t' . Nesta restrição, considera-se o atraso no atendimento das metas repassadas pela CRPAAA por meio da variável I_{pt}^- . A utilização desta variável é penalizada na função objetivo com a parcela de custo de atraso (CA). A quantidade de p produzida em cada período t é determinada pela somatória da produção dos processos k selecionados ($\sum_{t=1}^{t'} \sum_k A_{pkt} M'''_{kt}$).

A equação (103) é a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana colhida (M'_{mt}), a quantidade de cana transportada (M''_{ft}), a quantidade de cana por processo (M'''_{kt}) e a quantidade de cana moída (M_t), em todos os períodos t da safra. Esta restrição estabelece que o modelo PASUC/N2 é monoestágio. Ou seja, apesar do processo de produção

do setor sucroenergético (seção 2.2) ser definido em três etapas distintas (agrícola, CCT e industrial), estas devem ocorrer simultaneamente e sem modificar o estoque intermediário existente entre elas.

A equação (104) é a restrição de disponibilidade de cana do tipo m no início de cada período de análise t (quantidade de cana no campo). Esta restrição determina que a quantidade de cana colhida de cada tipo m , em todos os períodos t (M'_{mt}), deve ser menor ou igual à disponibilidade de cana tipo m , no início do mesmo período t (C_{mt}). A equação (105) é a restrição de utilização de toda a cana disponível para colheita de cada tipo de cana m . Da mesma forma que no modelo PASUC/N1, a usina não pode deixar cana de uma safra para a outra (cana “bisada”). Percebe-se também, por meio das restrições (104) e (105), que a variável de quantidade de cana disponível para moagem (C_{mt}) possui comportamento complementar ao valor acumulado da quantidade de cana moída por semana (M'_{mt}), sendo a soma destes dois valores igual à previsão de safra para cada tipo de cana m em qualquer período t .

A inequação (106) é a restrição de controle de quantidade de cana própria disponível em um período t . Esta restrição é utilizada para controlar a quantidade de cana colhida até um período t . Este controle pode ser solicitado pelos decisores da empresa por questões agrônômicas (por exemplo, necessidade de abertura de área para plantio), comerciais, societárias, entre outras questões externas ao planejamento tático.

A inequação (107) é a restrição de percentual de cana de fornecedor em toda a cana processada no período t . Esta restrição determina um limite máximo para a moagem de cana não administrada pela usina. 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 t em questão.

A inequação (108) é a restrição de moagem em cada período 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 de cada usina u , durante cada período t . Este parâmetro representa o percentual de tempo que a usina fica em funcionamento, dado o tempo total disponível para moagem no período. O parâmetro n_{ut} se refere ao número de dias de moagem, desconsiderando as paradas

programadas no período de análise t . Desta forma, tem-se uma separação entre as paradas programadas (n_{ut}) e as paradas acidentais (φ_t).

A equação (109), representa o balanceamento do saldo financeiro em cada período t . Esta restrição representa a entrada de capital proveniente de adiantamentos repassados pela CRPAAA para a USC (Rca_p , RCb , RCc_t), e a saída de capital necessário para financiar as operações de safra (GM_{mt} , GF_{ft} , GK_{kt}). 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 o saldo de caixa por período t , possibilitando um controle mais efetivo da previsão de caixa. O repasse total da receita e do prêmio de qualidade dos produtos é feito no final do período de safra.

A inequação (110) é a restrição de capacidade de transporte da frota f , em cada período t . Este valor é estabelecido por meio da multiplicação da capacidade diária máxima de transporte da frota f ($Fmax_f$), pelo valor percentual de disponibilidade desta mesma frota (β_{ft}) e pelo número de dias disponíveis para moagem em cada período de análise t . O parâmetro β_{ft} pode ser utilizado, por exemplo, para indicar uma diminuição da disponibilidade da frota própria devido a problemas mecânicos nos caminhões no decorrer da safra.

As restrições (111), (112) e (113) modelam, respectivamente, a capacidade de produção de cada produto p , de todos os produtos da fábrica de açúcar e de todos os produtos da destilaria de etanol em cada período t . Estas restrições controlam a capacidade de produção dos produtos, fazendo com que o modelo não exceda a capacidade da fábrica ou da destilaria.

A equação (114) é a restrição de utilização de apenas um processo por período t . Esta restrição é também chamada de restrição *tudo ou nada*. Isto significa 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.

A restrição (115) determina, em todos os períodos t , que a quantidade de cana por processo (M'''_{kt}) seja nula sempre que o processo k equivalente não esteja sendo utilizado ($X_{kt}=0$). É uma restrição auxiliar para que não seja necessário utilizar a variável X_{kt} na função objetivo. Utilizando esta restrição, evita-se 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 G é um número suficientemente grande. Quando X_{kt} for zero, o valor de M'''_{kt} também será nulo, pois, M'''_{kt} é um número não negativo. Caso contrário, M'''_{kt} poderá assumir qualquer valor entre zero e G .

A partir deste ponto são descritas as restrições sugeridas para a etapa de cogeração de energia do modelo PASUC/N2. Neste trabalho, pretende-se enfatizar a correlação existente entre as decisões de mix de produção e quantidade de energia disponível para comercialização, ou seja, pretende-se abordar o *trade-off* existente entre produção de açúcar, álcool e energia. Esta questão vem ganhando força no setor à medida que cresce a importância da energia elétrica no faturamento das usinas. No caso das usinas que não comercializam energia, esta análise é importante para auxiliar na definição de planos de safra que propiciem um balanço térmico mais estável, garantindo uma quantidade de combustível (bagaço) suficiente para o funcionamento da fábrica.

A equação (116) representa o balanceamento de estoque de bagaço em cada período t . Analisando o balanço de massa da operação unitária de moagem, é interessante notar que tem-se a entrada de cana (fibra + caldo) e de água de embebição. Na saída, tem-se o caldo misto e o bagaço umedecido (fibra + umidade composta pelo caldo residual). Desta forma, para quantificar o bagaço proveniente da moagem deve-se considerar a fibra da cana m ($Fibra_m$), a cana moída m (M'_{mt}) e a umidade residual do bagaço (UB_t) no período t , como mostrado na equação (116). A retirada de bagaço do estoque é modelada pela variável Mb_t .

A inequação (117) é a restrição de estoque de segurança de bagaço em um período t . Esta restrição é importante para evitar períodos de falta deste combustível. A inequação (118) regula o estoque de passagem de bagaço, ou seja, estoque mínimo de bagaço no último período de safra. O motivo deste estoque de passagem é similar ao apresentado para a restrição (117). Neste caso, pretende-se garantir uma quantidade mínima de combustível (EPb) para ser utilizado nos testes da indústria antes do início da safra e também para evitar a falta de bagaço nas primeiras semanas de moagem, período onde a fibra da cana é mais baixa.

A equação (119) modela a produção de vapor de acordo com a quantidade de bagaço consumido em cada período t . Nesta simples equação, considera-se que as caldeiras da usina possuem uma média de eficiência de geração de vapor (RC), dada em t de vapor produzido por t de bagaço utilizado. Este parâmetro é calculado basicamente pela relação entre a entalpia do vapor produzido e o poder calorífico inferior do bagaço. Considerando-se as perdas de calor sensível dos gases de combustão, as perdas pelos não queimados sólidos, as perdas por radiação e convecção externa e as perdas por combustão deficiente do carbono. Além disso, são consideradas as condições operacionais de temperatura da água de alimentação da caldeira, temperatura e quantidade de ar na entrada da câmara de combustão e temperatura dos gases na saída do exaustor da caldeira (Hugot, 1977).

As equações (120) apresentam o balanço de vapor de alta e baixa pressão de toda a planta industrial no período t . Nestas equações, são usados os parâmetros de rendimento médio da casa de força (RCF), consumo de vapor na moagem ($CFVAP$) e consumo de vapor para produzir o produto p ($CVAP_p$). Os dois primeiros parâmetros são obtidos com a determinação do salto entálpico das turbinas da casa de força ou da moagem. Neste caso, os dados necessários para calcular esta eficiência de transformação de energia térmica em energia mecânica são as temperaturas e pressões de vapor na entrada e na saída de cada máquina (Hugot, 1977). No Anexo G, encontra-se disponível uma tabela para exemplificar o cálculo da eficiência de uma turbina. Para o cálculo do $CVAP_p$ é necessário considerar o consumo dos processos de produção por meio das características dos equipamentos da planta industrial, do tipo de manobra adotada em cada processo, das características da matéria-prima e das características do material em processo (ou seja, as condições operacionais da indústria).

A primeira parte das equações (120) apresenta a relação entre o vapor produzido pelas caldeiras (VAP_t) e a soma do consumo de vapor de alta pressão (vapor direto) na moagem e na casa de força. Na segunda parte das equações, tem-se que o vapor servido (relação aproximada de 1 kg de vapor servido para 1 kg de vapor direto) proveniente da moagem, da casa de força e do rebaixamento de vapor, deve ser igual ao consumo de vapor servido (vapor de processo, ou vapor de baixa pressão) para produzir os produtos p , nos processos k . Estas restrições foram modeladas como inequações para contemplar as situações de desbalanceamento do vapor de alta pressão e do vapor de baixa pressão. Este desbalanceamento é ajustado na prática por meio de válvulas adiabáticas rebaixadoras de vapor de alta pressão e, por outro lado, pela simples sobra de vapor de baixa pressão.

Considerando as observações listadas nos parágrafos anteriores, é possível perceber a interrelação entre a produção de vapor, a moagem, a produção de energia e a produção de cada produto p . Como exemplo da utilização desta metodologia de cálculo, considere o balanço de vapor e energia apresentado no Anexo F desta tese.

A equação (121) modela a quantidade de energia excedente que pode ser comercializada em cada período t . Para obter a energia disponível para comercialização (EE_t), descontou-se da energia total produzida (EG_t) a quantidade que será consumida na produção de cada produto (CVE_p) e no funcionamento normal da fábrica (CFE).

As inequações (122) e (123) são, respectivamente, restrições de capacidade de produção de vapor e energia elétrica, em cada período t . Da mesma forma que as restrições de capacidade de moagem (108), nestas equações têm-se uma separação entre as paradas

programadas (n_{ut}) e as paradas acidentais (φ_t). Por fim, em (124) estão descritas as restrições de domínio das variáveis de decisão do modelo PASUC/N2.

Neste modelo, tem-se K processos, M tipos de fornecimento de cana, F frotas de transporte de cana, P produtos e T períodos. No total tem-se, $T(2K+2M+F+P+7)+1$ variáveis, onde KT são binárias, e $T(2P+2M+F+K+20)+2$ restrições. Por exemplo, considerando os dados do problema do estudo de caso com $K=252$, $M=2$, $F=2$, $P=10$, $T=25$, o modelo PASUC/N2 resulta em 13176 variáveis, sendo 6300 binárias, e 7452 restrições.

4.4 Geração de parâmetros do modelo PASUC/N2

4.4.1 Parâmetros calculados com dados de saída do modelo PASUC/N1

Conforme mencionado anteriormente, a motivação para elaborar este modelo de planejamento hierárquico em dois níveis é o fato de usinas cooperadas (por exemplo, a USC) terem seu planejamento de safra influenciado pelas decisões de mix de produção, política de estoque e política de vendas, que são tomadas pela cooperativa (por exemplo, CRPAAA). Este fato faz com que seja necessário modelar o planejamento de safra das duas empresas e também a interrelação entre estas duas esferas de decisão. Considerando a modelagem proposta na seção 4.2, entende-se que a hierarquia existente se estabelece na relação de imposição de metas de produção da cooperativa para as usinas cooperadas e na definição dos parâmetros de remuneração das empresas.

Desta forma, alguns parâmetros do modelo PASUC/N2 (segundo nível) são calculados com base nos resultados do modelo PASUC/N1 (primeiro nível). A idéia é que a cooperativa execute seu planejamento de safra considerando todas as usinas do sistema cooperado e, com isso, defina o mix de produção de cada usina, a política de estocagem e de comercialização de toda a produção dos açúcares, dos alcoóis e dos melaços. Esta primeira etapa do processo de decisão é convertida em metas de produção de cada produto, para cada uma das usinas em todos os meses de safra. As usinas, por sua vez, analisam sua capacidade de produção, sua disponibilidade de matéria-prima e sua capacidade de caixa de forma mais desagregada, para procurar atender às metas estabelecidas pela cooperativa da melhor forma possível.

A seguir, são apresentados os cálculos dos parâmetros utilizados no modelo PASUC/N2, que são obtidos por meio dos resultados do modelo PASUC/N1. Na seqüência, apresenta-se uma descrição da utilidade desses cálculos para o modelo PASUC/N2. Os

índices u, t, p (pa, pe, pm), e , utilizados aqui são os mesmos do modelo PASUC/N1, conforme descrito na seção 4.2.

Notação e parâmetros dos cálculos de saída do modelo PASUC/N1

$ConvA_{pa}^{CRPAAA}$ Conversão de açúcares pa em cristal *Standard* (adimensional);

$ConvE_{pe}^{CRPAAA}$ Conversão dos alcoóis pe em AEAC (adimensional);

$Matr_u$ ATR do mel final na usina u (%);

VP_{pt} Valor líquido do produto p no período t (\$/t ou m³);

PU_{put}^* Valor ótimo encontrado pelo modelo PASUC/N1 para a variável de produção do produto p , na usina u , no período t (t ou m³);

D_{pt}^* Valor ótimo encontrado pelo modelo PASUC/N1 para a variável de atendimento da demanda do produto p , no período t (t ou m³);

$RecA$ Receita da CRPAAA decorrente da comercialização dos açúcares pa (\$);

$RecE$ Receita da CRPAAA decorrente da comercialização dos alcoóis pe (\$);

$RecM$ Receita da CRPAAA decorrente da comercialização do melaço pm (\$);

$ProdA$ Produção total dos açúcares pa pelas usinas da CRPAAA (t de açúcar cristal *Standard* equivalente);

$ProdE$ Produção total dos alcoóis pe pelas usinas da CRPAAA (m³ de álcool anidro AEAC equivalente);

$ProdM$ Produção total dos melaços pm pelas usinas da CRPAAA (t de ATR melaço);

$Meta_{pt}$ Metas da USC para produção de cada produto p em cada período t , no modelo PASUC/N2.

Cálculos de saída do modelo PASUC/N1

$$RecA = \sum_t \sum_{pa} VP_{pa,t} \cdot D_{pa,t}^* \quad (125)$$

$$RecE = \sum_t \sum_{pe} VP_{pe,t} \cdot D_{pe,t}^* \quad (126)$$

$$RecM = \sum_t \sum_{pm} VP_{pm,t} \cdot D_{pm,t}^* \quad (127)$$

$$ProdA = \sum_t \sum_u \sum_{pa} PU_{pa,u,t}^* \cdot ConvA_{pa}^{CRPAAA} \quad (128)$$

$$ProdE = \sum_t \sum_u \sum_{pe} PU_{pe,u,t}^* \cdot ConvE_{pe}^{CRPAAA} \quad (129)$$

$$ProdM = \sum_t \sum_u \sum_{pm} PU_{pm,u,t}^* \cdot Matr_u \quad (130)$$

$$Meta_{p^{sem2}} = PU_{p, "USC", "set"}^* \quad (131)$$

As equações (125), (126) e (127) fornecem, respectivamente, as receitas da CRPAAA decorrentes da comercialização dos açúcares pa , dos alcoóis pe , e dos melaços pm , em toda a safra. Esta agregação em família de produtos tem como objetivo agrupar a receita de cada família de forma independente.

As equações (128), (129) e (130) fornecem, respectivamente, as produções dos açúcares pa (totalizada em cristal *Standard* equivalente), dos alcoóis pe (totalizada em álcool anidro *AEAC* equivalente), e dos melaços pm (totalizada em ATR no melaço) de todas as usinas u cooperadas, em toda a safra. Estas equações agregam a produção de cada produto p , convertendo em uma base de referência única para cada família. Isto propicia a comparação entre a produção das usinas por meio da mesma base de mensuração.

Os parâmetros de conversão dos açúcares e dos alcoóis ($ConvA_{pa}^{CRPAAA}$ e $ConvE_{pe}^{CRPAAA}$ respectivamente), são determinados levando-se em consideração a diferença de rendimento industrial e de custo para a produção de cada tipo de produto p . Desta forma, procura-se evitar que o mix de produção das usinas ofereça diferencial competitivo dentro da CRPAAA. No caso do parâmetro de conversão dos melaços, adota-se a ATR no melaço ($Matr_u$) para uniformizar a análise. Neste caso, não existe uma análise do rendimento industrial e do custo produção. Na seção 4.3, ao apresentar a função objetivo do modelo PASUC/N2, estas questões são discutidas novamente.

Na equação (131) adotou-se um exemplo para apresentar a correlação entre a produção mensal ótima de cada produto p , por cada usina u , no período t (PU_{put}), com as metas de produção acumulada de cada produto p até uma determinada semana t ($Meta_{pt}$). Neste exemplo [equação (131)], apresenta-se a correlação da produção definida para a USC no mês de setembro (PASUC/N1), com a meta de produção acumulada para a semana 3 (PASUC/N2). A Tabela 16 (página 112) apresenta toda a correlação entre os períodos do modelo PASUC/N1 e do modelo PASUC/N2.

4.4.2 Parâmetros da matriz de rendimentos industriais

O cálculo dos rendimentos industriais em empresas do setor sucroenergético 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 do sistema tratado ser 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.

Nesta seção, trata-se do cálculo do rendimento industrial para a produção dos açúcares, alcoóis e melaços, utilizando a literatura de tecnologia açucareira e alcooleira (Hugot, 1977; Castro *et al.*, 2002; Fernandes, 2003; Medeiros, 2005) e as recomendações do sistema CONSECANA (CONSECANA-AL, 2008a) como base para definir a formulação da matriz de rendimentos industriais (A_{pkt}). Esta matriz de parâmetros determina a quantidade de cada produto p (açúcares, alcoóis e melaço), obtida pela utilização de cada processo k , em cada período t . É importante notar que estes cálculos não consideram a energia elétrica por se tratar especificamente do balanço de massa dos processos industriais. Conforme discutido na seção 4.3 (modelo PASUC/N2), a cogeração de energia é incorporada por meio de cálculos que utilizam os processos industriais como parâmetros de consumo de energia térmica (vapor) e elétrica.

Antes de apresentar os cálculos da matriz A_{pkt} , é importante detalhar o conceito de *processo de produção*. Considere a Figura 15, onde encontram-se representadas 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*); além das macroperdas envolvidas na produção de açúcar e álcool (*perdas na água de lavagem, no bagaço, na torta, na fermentação, na vinhaça e perdas indeterminadas*) e o local onde estas perdas são geradas. Entretanto, o mais importante na Figura 15 é a indicação do local onde as mudanças de processo podem acontecer (*TS 1, TS 2, TS 3, TS 4, TM, SJM, 1-SJM*), fazendo com que os diversos tipos de açúcares, méis e alcoóis sejam produzidos por uma combinação de processos envolvendo estes e outros parâmetros. Desta forma, pode-se dizer que um *processo* é uma configuração específica da fábrica que incorpora os desvios de material, as eficiências de cada operação industrial e os produtos que estão sendo produzidos. Vale ressaltar que, a Figura 15 é uma representação genérica do processo de produção das usinas e, portanto, deve ser considerada como um exemplo da metodologia de geração de processos. Questões específicas como, por exemplo, a forma de separação do caldo na moenda (caldo primário, caldo embebido ou caldo misto), a utilização de limpeza de cana a seco, a retirada de mel rico do processo de fabricação de açúcar ou a existência de um sistema de tratamento de caldo específico para a destilaria, devem ser considerados caso a caso, mas não invalidam a metodologia proposta. No decorrer desta seção, são apresentados outros comentários sobre os ajustes necessários para a utilização deste tipo de modelo.

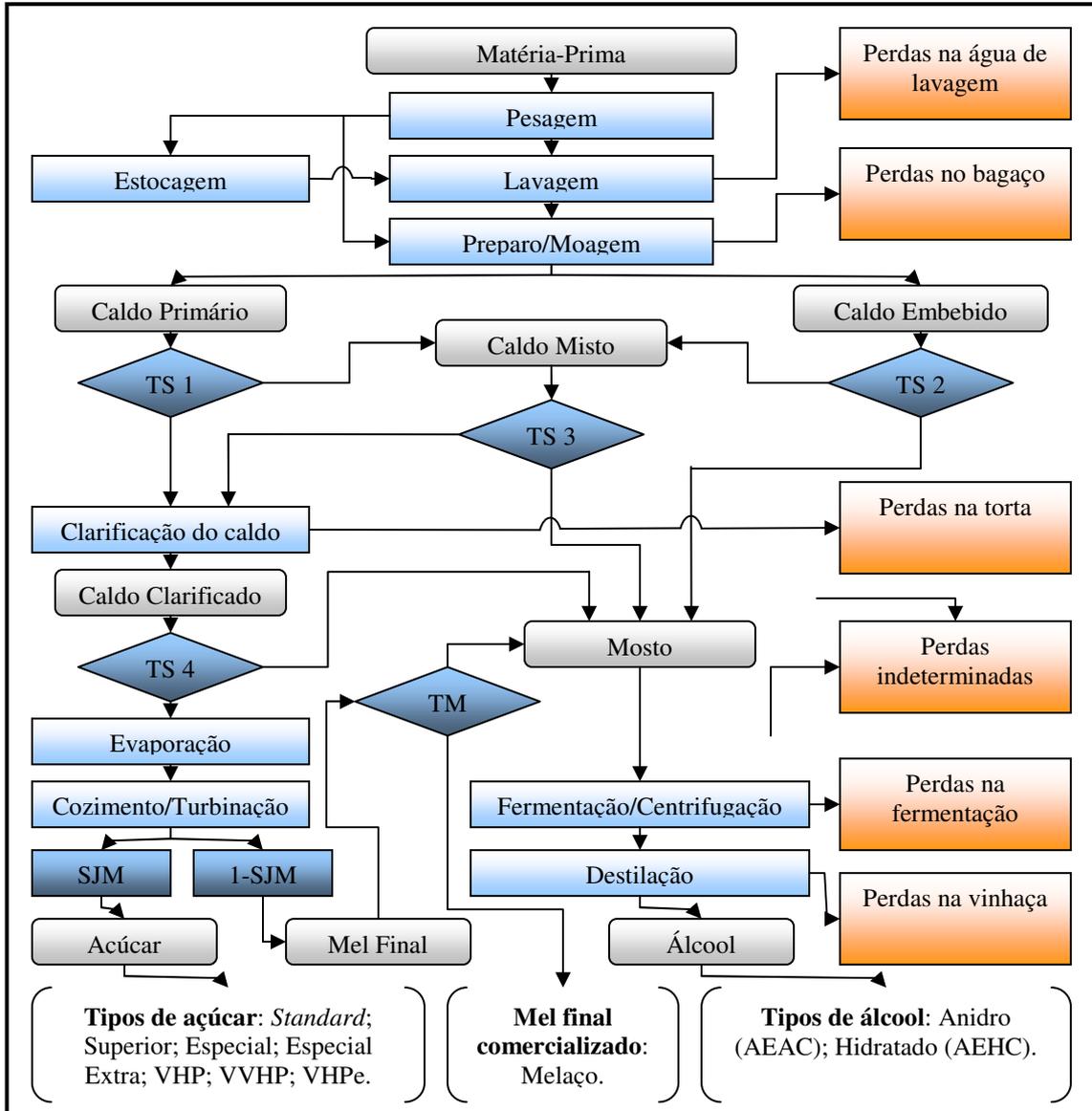


Figura 15. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço

Após a obtenção da matriz de rendimentos, é possível determinar a produção teórica dos vários produtos (incluindo a energia elétrica) e estabelecer o cálculo de custos, receitas, eficiências, margem de contribuição e, finalmente, efetuar o planejamento de safra. A seguir, apresentam-se os parâmetros necessários para o cálculo de A_{pkt} . Os índices k , t , p (pa , pe , pm), utilizados aqui são os mesmos do modelo PASUC/N2, conforme descrito na seção 4.3.

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

- BMF Brix do mel final adotado pela fábrica (°brix);
- P_{zaM} 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). Incluindo a destinação do caldo primário ($TS 1$), caldo embebido ($TS 2$), caldo misto ($TS 3$), caldo clarificado ($TS 4$) apresentados na Figura 15;
- Pol_k Polarização dos açúcares produzidos em cada processo k ($^{\circ}Z$);
- $Umid_k$ Umidade dos açúcares produzidos em cada processo k (%);
- $MAP_{pa,k}$ Percentual dos açúcares pa produzidos em cada processo k (%);
- R_{pe} Rendimento estequiométrico dos alcoóis pe (l/100 kg ART);
- $MEP_{pe,k}$ Percentual dos alcoóis pe produzidos em cada processo k (%);
- $Elbti_t$ 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 (%);

Os parâmetros Pol_k , $Umid_k$ e $MAP_{pa,k}$ são utilizados sempre em conjunto para determinar as características do tipo de açúcar pa produzido em cada processo k . Os parâmetros R_{pe} e $MEP_{pe,k}$, também são utilizados em conjunto para representar as combinações possíveis da produção dos alcoóis pe 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 $MAP_{pa,k}$ determinam sete tipos de açúcares diferentes (*Standard* – 99,3 e 0,1; *Superior* – 99,5 e 0,1; *Especial* – 99,7 e 0,1; *Extra* – 99,8 e 0,1; *VHP* – 99,3 e 0,15; *VHP+* – 99,6 e 0,15; e *VHPe* – 99,3 e 0,15) e que R_{pe} e $MEP_{pe,k}$ determinam três combinações possíveis para o rendimento teórico da produção dos alcoóis (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 tese (seção 5.1).

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 tese, entende-se que os parâmetros apresentados são suficientes para a análise desejada.

Cálculos dos elementos da matriz de rendimentos (A_{pkt})

$$PzaJ_t = PzaC_t - 1 \quad \forall t \quad (132)$$

$$PzaS_k = \frac{Pol_k}{1 - \frac{Umid_k}{100}} \quad \forall k \quad (133)$$

$$SJM_{kt} = \frac{PzaS_k (PzaJ_t - PzaM)}{PzaJ_t (PzaS_k - PzaM)} \quad \forall k, t \quad (134)$$

$$SMF = \frac{BMF \cdot PzaM}{100} \quad \forall k \quad (135)$$

$$RD_{pe,t} = \frac{R_{pe} \cdot Efd_t}{100} \quad \forall pe, t \quad (136)$$

$$RA_{pa,k,t} = pc_t \cdot 10 \left(\frac{Elbti_t}{100} \right) SJM_{kt} \cdot TS_k \cdot MAP_{pa,k} \quad \forall pa, k, t \quad (137)$$

$$RM_{px,k,t} = \frac{pc_t \cdot Elbti_t (1 - SJM_{kt}) TS_k \cdot 100 (1 - TM_k)}{10 \cdot SMF_k} \quad \forall px, k, t \quad (138)$$

$$RE_{pe,k,t} = \left(\left(\frac{Elbti_t}{10} \right) \left(\frac{RD_{pe,t}}{100} \right) \left(\frac{pc_t (1 - SJM_{kt})}{0,95} \right) \right) TS_k TM_k \left(+ AR_t \right) MEP_{pe,k} \quad \forall pe, k, t \quad (139)$$

$$A_{pkt} = \frac{RA_{pa,k,t} + RM_{px,k,t} + RE_{pe,k,t}}{1000} \quad \forall p, k, t \quad (140)$$

A equação (132) (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 primário (caldo extraído do primeiro terno da moenda e que não recebe embebição) é separado do caldo dos demais ternos (denominado caldo embebido). 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 primário 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 tese opta por não diferenciar os caldos e, portanto, a equação (132) pode ser utilizada (Figura 15).

A equação (133) (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 equação (134) (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 15). 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, considera-se que a pureza do xarope é igual à pureza do caldo misto ($PzaJ_t$), como visto na equação (132).

A equação (135) (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 melaço foi definida como $PzaM$.

A equação (136) (Fernandes, 2003; CONSECANAL, 2008a) determina a recuperação teórica da destilaria ($RD_{pa,t}$) para os alcoóis 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 alcoóis 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.

A equação (137) (adaptada de Fernandes, 2003) determina o rendimento industrial ($RA_{pa,k,t}$) obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t . Os parâmetros pc_t , $Elbti$, TS_k , $MAP_{pa,k}$ são dados de entrada do modelo e o parâmetro SJM_{kt} é a recuperação de açúcares, calculado pela equação (138). A partir dos valores obtidos nesta equação, tem-se 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.

A equação (138) (adaptada de Fernandes, 2003) determina o rendimento industrial ($RM_{px,k,t}$) obtido na produção do melaço 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 (134) e o valor de SMF , sacarose no melaço, é calculado pela equação (135). Esta equação é complementar à equação (139), para os casos em que $TM_k=0$. A partir dos valores obtidos, tem-se a quantidade de melaço px (valores em kg) que será produzida por qualquer processo k em qualquer período t , propiciando a geração de parâmetros de produção do melaço.

A equação (139) (adaptada de Fernandes, 2003) determina o rendimento industrial ($RE_{pe,k,t}$) obtido na produção do álcool pe , pelo processo k , no período t . Os parâmetros pc_t , $Elbti_t$, AR_t , $MEP_{pe,k}$, TS_k , TM_k são dados de entrada do modelo, SJM_{kt} é calculado pela equação (134) e $RD_{pe,k,t}$ é calculado pela equação (136). A partir dos valores obtidos nesta equação, obtém-se a quantidade de álcool pe (valores em litros) que será produzida por qualquer processo k em qualquer período t , propiciando a geração de parâmetros de produção dos alcoóis. O valor 0,95 que aparece na equação (139) representa a conversão da sacarose em açúcares redutores (AR), por meio da hidrólise da molécula de sacarose em glicose e frutose.

A equação (140) 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 nos equações (137), (138), (139) e convertidos para uma unidade apropriada (t ou m³, para o caso dos açúcares ou dos alcoóis, respectivamente).

Durante o estudo de caso desenvolvido nesta tese, 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.

4.4.3 Parâmetros de custo industrial e custo agrícola

Para finalizar a apresentação da geração de parâmetros do modelo PASUC/N2, são descritos os cálculos preliminares adotados para determinar os custos industriais (CK_{kt}) e os custos agrícolas (CM_{mt}). Para o custo industrial, a intenção é adotar um valor de custo unitário por kg de ART (Açúcares Totais Recuperáveis) produzido e determinar o custo industrial total a partir da multiplicação deste custo unitário pela quantidade de ART (Açúcares Redutores Totais) 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. No caso do custo agrícola adotou-se o ATR, como parâmetro de custo unitário. Desta forma, utiliza-se a formulação do CONSECANA tanto para o cálculo do custo da cana de fornecedores (M_{form}) quanto para o cálculo do custo da cana própria (M_{prop}).

Cabe aqui salientar a correlação entre os valores do ATR e do ART. O ART é um parâmetro técnico utilizado para representar todos os açúcares redutores, ou açúcares invertidos, existentes em um produto, por exemplo a cana-de-açúcar, o açúcar e o melaço. No caso do álcool, o ART é o equivalente estequiométrico da quantidade de açúcares redutores necessários para produzir o referido álcool. Ou seja, o ART é a representação técnica da quantidade total de açúcares existente em um produto.

Em contrapartida, o ATR é um parâmetro adotado no sistema de pagamento de cana, que representa, teoricamente, a quantidade de ART recuperada no processo de fabricação de açúcar ou álcool. Isto significa que para cada quantidade de ATR que entra na usina como matéria-prima, existe a expectativa de se recuperar a mesma quantidade em ART de produtos finais. Sendo assim, o ATR é o resultado da diferença entre o ART da cana e as perdas teóricas de ART no processo de fabricação.

Tendo estabelecido esta correlação, é possível justificar a utilização destes parâmetros para tratar os custos unitários da etapa industrial e da etapa agrícola em uma mesma base de referência. A seguir, são apresentados os cálculos desenvolvidos para obter o custo industrial e agrícola e, também, alguns parâmetros que ainda não foram listados na geração dos parâmetros do modelo PASUC/N2. O índice m é o mesmo utilizado no modelo PASUC/N2, conforme descrito na seção 4.3. Esta formulação está fortemente embasada nos trabalhos de Hugot (1977) e Fernandes (2003).

Parâmetros do cálculo do custo industrial (CK_{kt}) e do custo agrícola (CM_{mt})

c_{proc} Custo de produção de cada kg ART em cada processo da USC (\$/kg ART);

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

$Fator_{pa}$ Fator de conversão dos alcoóis em etanol absoluto (Adimensionais);

δ_m Acréscimo dado sobre o valor da tonelada de cana tipo m (\$/t cana);

ATR_t ATR da cana no período t (Kg/t cana);

$vATR_t$ Valor do ATR no período de fornecimento (\$/Kg);

Cálculos para obtenção do custo industrial (CK_{kt}) e do custo agrícola (CM_{mt})

$$ConvA_{pa,k,t} = RA_{pa,k,t} \left(\frac{pol_k}{100} \right) \left(1 - \frac{Umid_k}{100} \right) MAP_{k,pa} \quad \forall pa, k, t \quad (141)$$

$$ConvM_{pm,k,t} = \frac{RM_{pm,k,t} \left(\frac{SMF}{100} \right)}{0,95} + RM_{pm,k,t} \frac{ARm}{100} \quad \forall pm,k,t \quad (142)$$

$$ConvE_{pe,k,t} = RE_{pe,k,t} \cdot Fator_{pe} \cdot MEP_{k,pe} \quad \forall pe,k,t \quad (143)$$

$$ARTproc_{kt} = \sum_p \left(\frac{ConvA_{pkt}}{0,95} + ConvM_{pkt} + \frac{ConvE_{pkt}}{0,6475} \right) \quad \forall k,t \quad (144)$$

$$CK_{kt} = ARTproc_{kt} Cproc \quad \forall k,t \quad (145)$$

$$CM_{mt} = ATR_{mt} \cdot \nu ATR_{mt} + \delta_{mt} \quad \forall t \quad (146)$$

A equação (141) determina o parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente ($ConvA_{pa,k,t}$), 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 $MAP_{k,pa}$ são dados de entrada do modelo para cada açúcar pa produzido pelo processo k . O parâmetro $RA_{pa,k,t}$ é o rendimento industrial dos açúcares, calculado pela equação (137).

A equação (142) 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 (138) e o parâmetro SMF é o valor da quantidade de sacarose existente no melaço, calculada pela equação (135). O valor 0,95, que aparece no denominador do primeiro termo da soma, é o valor que converte a sacarose em AR.

A equação (143) determina o parâmetro de conversão de alcoóis pa em etanol absoluto ($ConvE_{pe,k,t}$), para cada processo k e durante todos os períodos t . Este parâmetro representa a conversão de todos os alcoóis produzidos em etanol absoluto (1 de Etanol). Os parâmetros $Fator_{pe}$ e $MEP_{k,pe}$ são dados de entrada do modelo para cada álcool pe produzido pelos processos k . O parâmetro $RE_{pe,k,t}$ é o rendimento industrial dos alcoóis, calculado pela equação (139).

Tendo os três valores de conversão, calcula-se ($ConvA_{pkt}$, $ConvM_{pkt}$ e $ConvE_{pkt}$), o valor total do ART produzido ($ARTproc_{kt}$) em cada processo k e durante todos os períodos t é calculado pela equação (144) (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.

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} (\$/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 (145) mostra este cálculo final na geração dos parâmetros de custos industriais.

A equação (146) apresenta o valor da cana m , para cada período t , calculada com base no sistema CONSECANA (\$/t) (CONSECANA-AL, 2008a). Com esta abordagem considera-se o custo da cana com base em seu ATR, para qualquer tipo de fonte de fornecimento m (*própria* – $Mprop$, *fornecedor* – $Mforn$).

A implementação e solução computacional do modelo PASUC [equações (87)-(124)], juntamente com toda a geração de parâmetros apresentada nesta seção, foi desenvolvida por meio da linguagem de modelagem GAMS utilizando o *solver* CPLEX (Brooke *et al.*, 1997). No capítulo 5 são apresentados os resultados computacionais deste modelo.

5 RESULTADOS DOS MODELOS DETERMINÍSTICOS

Neste capítulo são apresentados os dados da safra 2007/2008 da USC e da CRPAAA e os resultados obtidos com a utilização do modelo determinístico PASUC do capítulo 4. Os capítulos 6 e 7 apresentam, respectivamente, os modelos de otimização robusta e os resultados obtidos com a aplicação destes modelos de otimização sob incerteza.

5.1 Coleta de dados dos modelos determinísticos

5.1.1 Dados utilizados no modelo de planejamento da CRPAAA (PASUC/N1)

Os dados utilizados para o primeiro nível do modelo hierárquico foram obtidos por meio de relatórios internos da CRPAAA, como os informativos semanais de movimentação de estoque, os boletins semanais de entrada de açúcar, álcool e melão na CRPAAA, além dos boletins semanais de produção de açúcar, álcool e melão do sindicato da indústria do açúcar e álcool do estado de Alagoas (Sindaçúcar-AL, 2008f, 2008g) e dos boletins gerais de produção e conversão em ART do Sindaçúcar-AL (Sindaçúcar-AL, 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e). Todos esses dados se referem ao período de moagem da safra 2007/2008, setembro de 2007 a abril de 2008. A seguir, são listados os valores utilizados no cenário do primeiro planejamento de safra 2007/2008, executado em agosto de 2007.

Tabela 4. Previsão de dias disponíveis para moagem

Usinas	n_{ut}							
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
CAP	0	24,5	29	29,5	28	29	9	0
PAI	12,5	30	29,5	30	29	0	0	0
PAL	13,5	30	29	29,5	29	28	28	0
PRI	6,5	30	29	29,5	29	14	0	0
USC	11,5	29,5	29	29,5	29	28	7,5	0
USM	16	30	29	29,5	29	20	0	0
SER	17,5	30	29,5	29,5	29,5	20,5	0	0
SIN	12,5	29,5	29	30	29	23	0	0
USU	5,5	30	29,5	30	29,5	28,5	6	0
TRI	5,5	30	29	29,5	29	28	12	0

O primeiro dado necessário para obter os parâmetros do modelo PASUC/N1 é o período de funcionamento das usinas. Para obter esses dados foi elaborado um calendário de funcionamento das empresas (Anexo C). Tendo esses dados, foi possível definir o número de dias disponíveis para moagem (n_{ut}), apresentados na Tabela 4.

Na seqüência da coleta de dados, foi obtida a moagem de cana das usinas nas últimas safras, a produção de açúcar, álcool e melão, e a previsão de moagem para a safra

2007/2008 (Anexo D). Com esses dados foi possível estimar o limite mínimo ($Mmin_u$) e máximo ($Mmax_u$) de moagem, a capacidade de produção da fábrica de açúcar ($CFmax_u$), a capacidade de produção da destilaria ($CDmax_u$) de cada usina e a previsão de moagem de cana (C_{u0}), conforme apresentado na Tabela 5.

Para obter os dados de capacidade de produção diária de cada produto ($CPmax_{pu}$), foi feita uma correlação entre o potencial total da empresa e os resultados obtidos na moagem, na produção de açúcar, álcool e de melão durante a safra 2007/2008 (Anexo D), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 5. Previsão de moagem e capacidades de moagem, fabricação e destilação

Usinas	C_{u0} (t)	$Mmin_u$ (t)	$Mmax_u$ (t)	$CFmax_u$ (t)	$CDmax_u$ (m ³)
CAP	640.000	3.000	3.800	522	52
PAI	630.000	4.100	5.100	500	157
PAL	660.000	3.000	3.800	0	355
PRI	1.400.000	8.700	10.800	1061	391
USC	1.150.000	6.500	8.000	750	210
USM	880.000	5.000	6.200	574	199
SER	1.000.000	5.700	7.400	728	174
SIN	1.300.000	7.300	9.000	980	300
USU	870.000	4.900	6.000	675	132
TRI	1.530.000	8.100	10.000	1050	304

Tabela 6. Capacidade máxima de produção das usinas por família de produtos ($CPmax_{pu}$)

Usinas	Cristal	Extra	Refinado	VHP	Anidro	Hidratado	Melão
	t				m ³		t
CAP	0	0	0	522	51	52	ilimitada
PAI	494	489	0	500	153	157	ilimitada
PAL	0	0	0	0	0	355	ilimitada
PRI	0	0	0	1061	167	391	ilimitada
USC	700	700	0	750	120	210	ilimitada
USM	0	0	0	574	193	199	ilimitada
SER	0	0	0	728	100	174	ilimitada
SIM	900	687	0	980	222	300	ilimitada
USU	0	0	0	675	112	132	ilimitada
TRI	1029	1014	668	1050	296	304	ilimitada
Total	3123	2890	668	6840	1414	2275	ilimitada

Tabela 7. Agrupamento em família de produtos

Famílias de produtos	Produtos que compõem a família
Cristal	<i>Standard, Superior, Especial</i>
Extra	<i>Extra</i>
Refinado	<i>Refinado</i>
VHP	<i>VHP, VHP+, VHPe</i>
Anidro	<i>AEAC</i>
Hidratado	<i>AEHC</i>
Melão	<i>Melão</i>

É importante notar que na Tabela 6 foi adotado um agrupamento em família de produtos. Este agrupamento está detalhado na Tabela 7. No caso de parâmetros como tempo aproveitado de moagem (φ_{ut}), percentual de melação obtido por unidade de açúcar ($\theta_{pa,t}$) e ATR do mel final na usina u ($Matr_u$), foi considerado um valor constante para todos os períodos e usinas (Tabela 8). A Tabela 9 apresenta os parâmetros estequiométricos de conversão de unidade de produto final para ATR equivalente.

Tabela 8. Parâmetros considerados constantes para todos os períodos e usinas

Usinas	φ_{ut}	$\theta_{pa,t}$			$Matr_u$
		Cristal + Extra	Refinado	VHP	
Todas	95,833%	51,368%	51,568%	50,351%	57,38%

Tabela 9. Conversão p/ t ATR ou ART produtos finais (CONSECANA-AL, 2008a)

Famílias	Conversão (t ou m3)	Conversão (sacos ou l)
VHP	1,0442	52,210
Cristal + Extra (pol 99,5)	1,0473	52,365
Refinado (pol 99,8)	1,0505	52,525
Anidro	1,8169	1816,9
Hidratado	1,7409	1740,9
Melaço	0,55	0,55

Para a determinação dos valores utilizados para a eficiência global em ATR nas usinas ($Eatr_{ut}$) e para o ATR da cana (ATR_{ut}), utilizaram-se os dados disponibilizados pelos relatórios do Sindaçúcar-AL, para a safra 2007/2008 (Sindaçúcar-AL, 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e, 2008f, 2008g). Na Tabela 10 e Tabela 11 são apresentados os parâmetros utilizados no planejamento. É interessante notar que grande parte dos parâmetros apresentados na Tabela 10 apresenta valores acima de 100%, isto ocorre normalmente com a utilização da eficiência global em ATR ($Eatr_{ut}$) e significa que a empresa está apresentando uma recuperação maior que a usina padrão utilizada para a determinação dos índices de eficiência em ATR (CONSECANA-AL, 2008a).

Tabela 10. Dados de eficiência global em ATR nas usinas

Usinas	$Eatr_{ut}$							
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
CAP		90,00%	103,00%	103,00%	103,00%	101,00%	110,00%	
PAI	90,00%	104,00%	104,00%	104,00%	104,00%	110,00%		
PAL	70,00%	105,00%	105,00%	105,00%	105,00%	103,00%	110,00%	
PRI	90,00%	103,00%	103,00%	103,00%	103,00%	103,00%	110,00%	
USC	80,00%	98,00%	100,00%	101,00%	101,00%	100,00%	110,00%	
USM	80,00%	104,00%	104,00%	104,00%	105,00%	104,00%	110,00%	
SER	80,00%	97,00%	102,00%	104,00%	104,00%	101,00%	110,00%	
SIN	90,00%	97,00%	100,00%	100,00%	101,00%	101,00%	110,00%	
USU	80,00%	99,00%	102,00%	102,00%	103,00%	102,00%	110,00%	
TRI	80,00%	101,00%	101,00%	102,00%	102,00%	101,00%	110,00%	

Tabela 11. Dados de ATR da cana (kg/t de cana)

Usinas	ATR_{ut}							
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
CAP		128	131	143	137	131	120	
PAI	135	136	142	149	152	142		
PAL	123	125	133	138	131	131	126	
PRI	108	136	143	145	147	148	130	
USC	118	126	141	142	137	136	130	
USM	129	134	141	149	142	139	128	
SER	120	132	141	145	147	147		
SIN	141	144	152	160	156	147	143	
USU	137	140	144	151	149	149	130	
TRI	128	134	142	151	149	135	121	

Tabela 12. Capacidade máxima de estoque por família de produto ($E_{max_{pe}}$)

Depósito	Cristal	Extra	Refinado	VHP	Anidro	Hidratado	Melaço
	t				m ³		t
Tab	100000	100000	100000				
Jar	5000	5000	5000				
MD01				100000			
Empat				100000			
Aterc	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado			
Usinas					500000	900000	50000
TPetro					30000	30000	20000
Eterc					ilimitado	ilimitado	ilimitado

Tabela 13. Estoque inicial por local de estoque e e produto p (I_{pe0})

Depósito	Standard	Especial	Refinado	VHP	AEAC	AEHC	Melaço
	t				m ³		t
Tab	2000	1000	500				
Jar							
MD01							
Empat				1000			
Aterc							
Usinas					5000	5000	
TPetro							
Eterc							

Os dados de estoque inicial de cada produto (I_{pe0}), capacidade máxima de estocagem em cada depósito ($E_{max_{p,e}}$), estoque de passagem de safra para cada produto (EP_p), valor líquido de venda dos produtos em cada período (VP_{pt}), demanda mínima mensal ($Dmin_{pt}$), e demanda máxima de cada produto na safra ($Dmax_p$), foram obtidos por meio do informativo de movimentação de estoque da CRPAAA e pela orientação dos decisores da CRPAAA sobre as políticas de estoque e comercialização praticadas pela empresa. Este relatório de movimentação de estoque demonstra toda a movimentação de produtos e apresenta os valores de venda de cada produto separadamente. Na Tabela 12 são apresentados os valores da capacidade de estoque, e na Tabela 13 são apresentados os valores de estoque

inicial. Os valores de estoque de passagem foram considerados nulos para todos os produtos $EP_p = 0$ e os valores da demanda mínima mensal ($Dmin_{pt}$), demanda máxima de cada produto na safra ($Dmax_p$) e valor líquido de venda dos produtos em cada período (VP_{pt}) são apresentados no Anexo E.

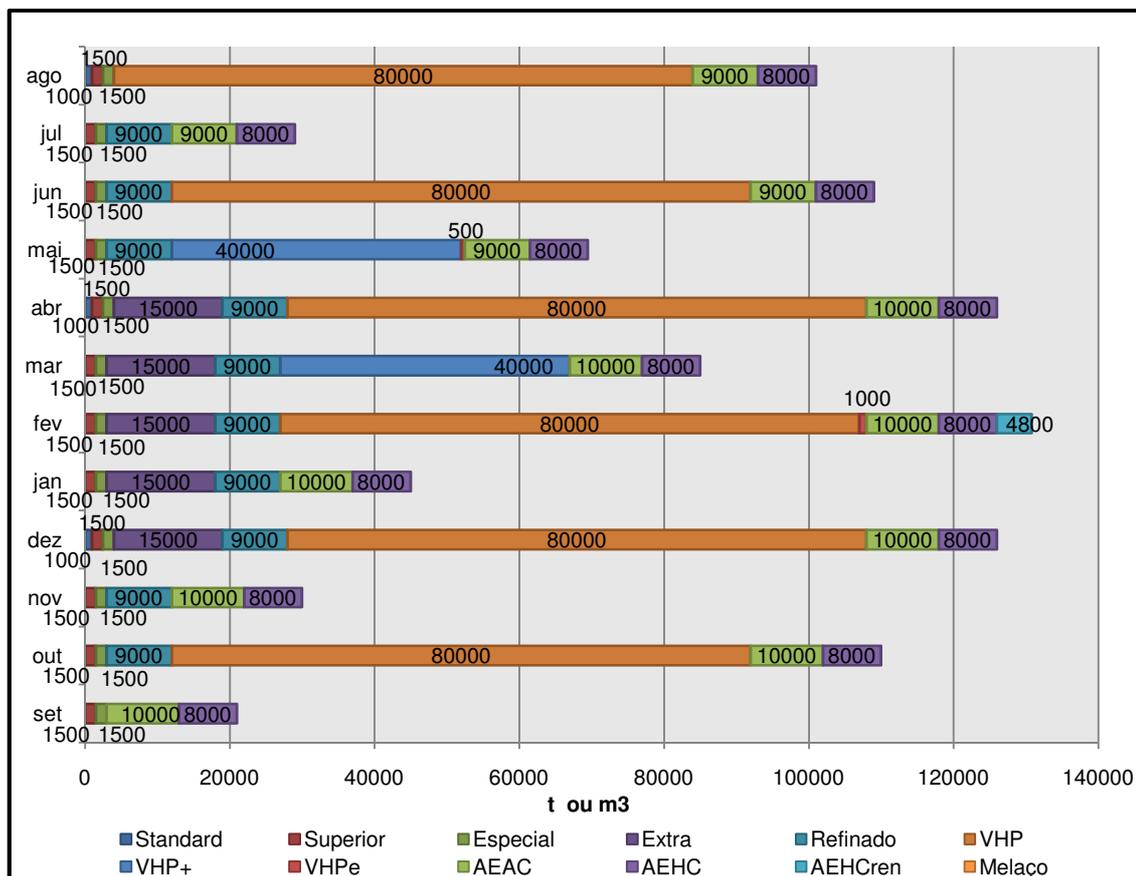


Figura 16. Demanda mínima a ser atendida (Anexo E)

A Figura 16 representa os dados utilizados para a demanda mínima a ser atendida. Os dados de custo de produção de cada produto por usina (CP_{pu}), custo de estocagem (CE_{pe}) e penalização por atraso na entrega da demanda ou *demurage* (CA) foram obtidos por meio de orientação dos decisores da CRPAAA. No caso dos custos de produção, foi adotada uma análise comparativa com base no custo calculado para uma usina típica, com moagem de 800.000 toneladas de cana por safra, e os dados de custo obtidos na USC. É importante destacar que não existe até então um sistema de custo unificado para todas as usinas, fator que limita atualmente o planejamento da CRPAAA. Na Tabela 14, são apresentados os custos de produção utilizados e na Tabela 15 apresentam-se os custos de estocagem. Para o caso da penalização por atraso foi arbitrado um valor de 1000 \$/t ou m³ em atraso por mês, com base na penalização empregada nos casos de *demurage*.

Tabela 14. Custo de produção de cada produto por usina (\$/t ou m³)

Produtos	CAP	PAI	PAL	PRI	USC	USM	SER	SIM	USU	TRI
Standard		506			503			503		506
Superior		508			505			505		508
Especial		510			506			507		510
Extra		512			509			509		512
Refinado										550
VHP	500	490		490	485	485	490	485	470	490
VHP+	510	495		495	493	495	495	490	475	495
VHPe		506			509			503	515	508
AEAC	900	850		820	850	840	840	850		820
AEHC	850	800	790	770	800	790	800	800		770
AEHCren							840			
Melaço	128	130		130	130	130	130	130	130	130

Tabela 15. Custo de estocagem por produto por depósito (\$/t ou m³)

Produtos	Tab	Jar	MD1	Empat	Aterc	Usinas	Tpetro	Eterc
Standard	1	1,5			5			
Superior	1	1,5			5			
Especial	1	1,5			5			
Extra	1	1,5			5			
Refinado	1	1,5			5			
VHP			0,7	0,5	5			
VHP+			0,7	0,5	5			
VHPe	1	1,5			5			
AEAC						1,5	2,5	5
AEHC						1,5	2,5	5
AEHCren						1,5	2,5	5
Melaço						2	2,5	5

5.1.2 Dados utilizados no modelo de planejamento da USC (PASUC/N2)

Os dados utilizados para o segundo nível do modelo hierárquico foram obtidos por meio de relatórios internos da USC, como o boletim diário de fabricação da USC, o relatório de pagamento e consumo de energia da USC, o relatório de transporte de cana e produção por equipamento, os relatórios do CONSECANA-AL de formação de preço do ATR (CONSECANA-AL, 2008b), além de dados e medições executados *in loco* pelo autor para calcular o balanço global de energia e vapor da USC. Todos esses dados referem-se à safra 2007/2008, iniciando em setembro de 2007 e estendendo até abril de 2008. A seguir, são listados os dados coletados e utilizados no primeiro planejamento, executado em agosto de 2007.

Os primeiros dados do modelo PASUC/N2 são obtidos por meio dos dados de saída do primeiro nível hierárquico (PASUC/N1) (seção 4.4.1); são eles: a receita da CRPAAA decorrente da comercialização dos açúcares (*RecA*), receita da CRPAAA decorrente da comercialização dos alcoóis (*RecE*), receita da CRPAAA decorrente da

comercialização do melão ($RecM$), produções dos açúcares por todas as cooperadas ($Proda$), produção dos alcoóis por todas as cooperadas ($ProdE$), produção de melão por todas as cooperadas ($ProdM$) e a meta de produção de cada produto ($Meta_{pt}$).

Na Tabela 16 apresenta-se a correlação entre os períodos do modelo PASUC/N1 e os períodos do modelo PASUC/N2 para o estabelecimento da meta de produção de cada produto no tempo ($Meta_{pt}$). Nesta tabela, indica-se, por exemplo, que a produção esperada (PU_{ut}) no modelo PASUC/N1 para outubro, estabelece uma meta acumulada para a semana 7 ($Meta_{pt}$) no modelo PASUC/N2, conforme seção 4.4.1.

Tabela 16. Relação entre períodos do modelo hierárquico e do modelo tático

$Meta_{pt}$	PU_{ut}							
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Sem1								
Sem2	X							
Sem3								
Sem4								
Sem5								
Sem6								
Sem7		X						
Sem8								
Sem9								
Sem10								
Sem11			X					
Sem12								
Sem13								
Sem14								
Sem15				X				
Sem16								
Sem17								
Sem18								
Sem19								
Sem20					X			
Sem21								
Sem22								
Sem23								
Sem24						X		
Sem25							X	

Assim como foi descrito na sessão 5.1.1, o número de dias disponíveis para moagem (n_t), a moagem mínima ($Mmin$), a moagem máxima ($Mmax$), a capacidade de produção diária de cada produto ($CPmax_p$), a capacidade diária total da fábrica de açúcar ($CFmax$), a capacidade diária total da destilaria ($CDmax$), a previsão de moagem de cana (C_0), a penalização por atraso no atendimento da meta repassada pela CRPAAA (CA) e o ATR correspondentes aos produtos finais ($Patr_p$), são obtidos da mesma forma que os parâmetros

correspondentes do modelo estratégico, conforme Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 9, respectivamente. No caso da penalização por atraso CA foi arbitrado um valor de 1000 \$/t ou m^3 em atraso por semana, com base na *demurage* (seção 5.1.1).

Além dos dados que são compartilhados pelos dois níveis do planejamento hierárquico, é necessário redefinir os processos da matriz de rendimentos A_{pkt} . Para tanto, foram coletados os dados utilizados para os parâmetros TM_k , TS_k , Pol_k , $Umid_k$, R_{pe} , $MAP_{k,pa}$, $MEP_{k,pe}$, BMF e $PzaM$, conforme definido no Anexo B. Além dos dados apresentados no Anexo B, também foram coletados os dados da Tabela 17 que são utilizados para o cálculo da matriz de rendimento.

Tabela 17. Dados para a determinação da matriz de rendimentos (A_{pkt})

Semanas	pc_t (%)	$PzaC_t$ (%)	AR_t (%)	$Elbt_t$ (%)	Efd_t (%)
Sem1	12	79,20	0,80	82,40	0
Sem2	12,2	83,60	0,80	82,60	83,76
Sem3	12,4	86,24	0,80	83,10	83,76
Sem4	12,6	86,24	0,80	83,40	84,60
Sem5	12,8	86,24	0,80	83,40	86,29
Sem6	13	88,00	0,80	83,90	87,98
Sem7	13,2	88,00	0,80	83,90	87,98
Sem8	13,4	89,76	0,80	84,00	87,98
Sem9	13,6	89,76	0,80	84,50	87,98
Sem10	13,8	89,76	0,80	84,60	87,98
Sem11	14	89,76	0,80	84,60	87,98
Sem12	14,2	90,64	0,80	84,90	87,98
Sem13	14,4	89,76	0,80	84,80	87,98
Sem14	14,6	89,76	0,80	84,80	87,98
Sem15	14,6	89,76	0,80	84,80	87,98
Sem16	14,6	89,76	0,80	84,80	87,98
Sem17	14,6	89,76	0,80	84,10	87,98
Sem18	14,6	88,00	0,80	83,50	87,98
Sem19	14,6	88,00	0,80	83,00	87,98
Sem20	14,3	88,00	0,90	82,40	87,98
Sem21	14,1	88,00	0,90	82,00	87,98
Sem22	13,8	88,00	0,90	81,50	87,98
Sem23	13,5	88,00	0,90	81,00	87,98
Sem24	13,2	88,00	0,90	81,00	86,29
Sem25	12,9	105,60	0,90	81,00	93,06

Para o cálculo da matriz de custos industriais (CK_{kt}), foram utilizados os parâmetros AR_m , $cproc$, $Fator_{pe}$, listados na Tabela 18. Para o cálculo da matriz de custos agrícolas (CM_{mt}), foram utilizados os parâmetros de acréscimo do valor da tonelada de cana (δ_m), ATR da cana por período (ATR_t) e valor do ATR da cana por período ($vATR_t$), listados na Tabela 18 e na Tabela 19. Na Tabela 18, também obtém-se os valores de custo de corte,

carregamento e transporte pela frota (CF_{ft}) e capacidade máxima de transporte das frotas ($Fmax_f$).

Os dados apresentados na Tabela 18 e na Tabela 19 foram definidos com base nos controles de custo da USC, nos relatórios de controles laboratoriais da empresa, nos relatórios de pagamento de cana para fornecedores e conforme recomendação dos decisores da USC .

Tabela 18. Dados auxiliares para o cálculo dos custos industriais, agrícolas e CCT

Parâmetros		Valores
ARm (%)		18
$cproc$ (\$/kg de ART)		0,03388
$Fator_{pe}$	AEHC	0,95415
	AEAC	0,99577
δ_m (\$/t)	Cana própria ($Mprop$)	0
	Cana fornecida ($Mforn$)	7
CF_{ft} (\$/t)	Frota própria ($Fprop$)	9,93
	Frota terceirizada ($Fterc$)	10,94
$Fmax_f$ (t/dia)	Frota própria ($Fprop$)	7000
	Frota terceirizada ($Fterc$)	3000

Tabela 19. Dados de entrada com variação em t

Semanas	ATR_t (kg/t)	$vATR_t$ (\$/kg)	α_t (%)	β_t (%)	$Disp_t$ (t)	φ_t (%)
Sem1	120,0	0,2932	0	90	850000	95,833
Sem2	128,0	0,2932	0	90	850000	95,833
Sem3	132,0	0,2852	0	90	850000	95,833
Sem4	135,0	0,2852	0	90	850000	95,833
Sem5	135,0	0,2852	60	90	850000	95,833
Sem6	136,0	0,2852	60	90	850000	95,833
Sem7	136,0	0,2459	60	90	850000	95,833
Sem8	137,0	0,2459	60	90	850000	95,833
Sem9	137,0	0,2459	60	90	850000	95,833
Sem10	138,0	0,2459	60	90	850000	95,833
Sem11	138,0	0,2381	60	90	850000	95,833
Sem12	138,0	0,2381	60	90	850000	95,833
Sem13	141,0	0,2381	60	90	850000	95,833
Sem14	143,0	0,2381	60	90	850000	95,833
Sem15	143,0	0,2381	60	90	850000	95,833
Sem16	143,0	0,2708	60	90	850000	95,833
Sem17	143,0	0,2708	60	90	850000	95,833
Sem18	142,0	0,2708	60	85	850000	95,833
Sem19	139,0	0,2708	60	85	850000	95,833
Sem20	137,0	0,2546	60	85	850000	95,833
Sem21	135,0	0,2546	60	85	850000	95,833
Sem22	135,0	0,2546	20	85	850000	95,833
Sem23	133,0	0,2546	20	85	850000	95,833
Sem24	133,0	0,258	20	85	850000	95,833
Sem25	133,0	0,258	20	85	850000	95,833

Na Tabela 19 também são apresentados os dados de tempo de moagem aproveitado (φ_t), percentual máximo de cana de fornecedores por período (α_t), disponibilidade das frotas próprias de transporte de cana (β_t) e limitante de cana própria disponível ($Disp_t$). A Tabela 20 apresenta os dados utilizados nesta tese para o planejamento de safra considerado. Nesta tabela, o grupo de parâmetros que representam as estimativas de gastos semanais no modelo são apresentados. Estes dados foram definidos de acordo com o orçamento e a previsão de fluxo de caixa da USC.

Os dados da Tabela 21 referem-se ao balanço de geração de energia elétrica, etapa do modelo que calcula a quantidade de energia elétrica que pode ser destinada para comercialização. Os primeiros parâmetros necessários para execução desse cálculo são a fibra da cana ($Fibra_{mt}$) e a umidade do bagaço após a moenda (Ub_t), ambos com valores percentuais e apresentados na Tabela 21. Estes dados foram obtidos do boletim de análises industriais da USC.

Tabela 20. Gastos e receitas semanais para o funcionamento da USC

Parâmetros		Valores
G_{fixo} (\$)		228.000
GK_{kt} (\$/tc)		4,58
$Giro_0$ (\$)		5.000.000
GM_{mt} (\$/tc)	Cana própria (Mprop)	18,94
	Cana fornecida (Mforn)	26
GF_{ft} (\$/tc)	Frota própria (Fprop)	9,93
	Frota terceirizada (Fterc)	10,94
RCa_p (\$/t ou m ³)	Cristal + Extra	294,00
	VHP	281,80
	Anidro	457,00
	Hidratado	438,00
	Melaço	0,00
RCb (\$/kg de ATR)		0,038
RCc_t (\$)		0,00

Para o cálculo da geração de energia elétrica excedente, foram coletados *in loco* os dados apresentados na Tabela 22, tais como: estoque inicial de bagaço (Ib_0); percentual mínimo de segurança para o estoque de bagaço (Eb); estoque de bagaço para passagem de safra (EPb); rendimento médio das caldeiras (RC); rendimento médio da casa de força (RCF); consumo fixo de vapor direto na moagem ($CFVAP$); consumo variável de vapor servido em cada produto ($CVAP_p$); consumo fixo de energia na moagem (CFE); consumo variável de energia em cada produto (CVE_p); capacidade de produção diária de vapor ($VAPmax$); capacidade de geração de energia diária e o valor da energia elétrica comercializada (VE).

Tabela 21. Dados de entrada para cálculo do balanço de energia

Semanas	Fibra _{mt} (%)		Ub _i (%)
	M _{prop}	M _{terc}	
Sem1	12,60	12,60	51
Sem2	12,80	12,80	51
Sem3	13,00	13,00	51
Sem4	13,20	13,20	51
Sem5	13,40	13,40	51
Sem6	13,60	13,60	51
Sem7	13,80	13,80	51
Sem8	14,00	14,00	51
Sem9	14,20	14,20	51
Sem10	14,40	14,40	51
Sem11	14,60	14,60	51
Sem12	14,80	14,80	51
Sem13	15,00	15,00	51
Sem14	15,20	15,20	51
Sem15	15,40	15,40	51
Sem16	15,60	15,60	51
Sem17	15,80	15,80	51
Sem18	16,00	16,00	51
Sem19	16,00	16,00	51
Sem20	16,00	16,00	51
Sem21	16,00	16,00	51
Sem22	16,00	16,00	51
Sem23	16,00	16,00	51
Sem24	12,60	12,60	51
Sem25	12,80	12,80	51

Tabela 22. Dados da cogeração de energia elétrica da USC

Parâmetros	Valores	
Ib ₀ (t)	1500	
EPb (t)	3000	
Eb (%)	5%	
RC (t vapor/t bagaço)	2,1	
RCF (MWh/t vapor)	0,0763	
CFVAP (t de vapor/t de cana)	0,2294	
CVAP _p (t vapor/t ou m ³)	Cristal + Extra	0,0105
	VHP	0,0094
	VHPE	0,0100
	Anidro	1,122
	Hidratado	1,000
	Melaço	0
CFE (MWh/t de cana)	0,014	
CVE _p (MWh/t ou m ³)	Cristal + Extra	0,018
	VHP	0,015
	Anidro	0,095
	Hidratado	0,090
	Melaço	0
VAPmax (t/dia)	4920	
EGmax (MWh/dia);	240	
VE (\$/MWh)	145	

Para melhor entendimento de como foram obtidos os dados apresentados na Tabela 22, disponibiliza-se no Anexo F uma planilha de balanço de energia, que foi utilizada para determinar os rendimentos da casa de força (Figura 40), e uma planilha de cálculo de rendimento de turbinas a vapor (Figura 41). Estas planilhas, juntamente com os dados coletados em campo, possibilitaram a determinação do consumo de vapor das moendas, do consumo de vapor por cada produto produzido, das capacidades de produção de vapor e de geração de energia, entre outros parâmetros determinantes para o cálculo do excedente de energia elétrica da USC.

5.2 Resultados computacionais do modelo PASUC

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo PASUC, apresentado no item 4.1, juntamente com os dados apresentados nas seções anteriores (5.1.1 e 5.1.2). Para validação desses dados, utiliza-se o acompanhamento dos resultados reais da CRPAAA e da USC e o relatório de projeção de safra da CRPAAA (orçamento de safra), tanto para os parâmetros utilizados como dados de entrada, quanto para as variáveis de decisão do modelo. A seção 5.2.1 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos pelo modelo proposto e os resultados projetados pelo planejamento da USC.

Todos os resultados computacionais apresentados neste capítulo (e nesta tese) foram obtidos utilizando a linguagem de modelagem GAMS, versão 22.7, com *solver* CPLEX 11 em um computador Pentium 4, 3,2GHz, 2GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP, service pack 2.

5.2.1 Comparação entre resultados do modelo PASUC e dados da safra 2007/08

Resultados do modelo PASUC/N1

Para iniciar a apresentação dos resultados obtidos pelo modelo PASUC, é importante considerar a Tabela 23 e a Tabela 24, que apresentam, respectivamente, os resultados de produção da CRPAAA de acordo com o primeiro nível do modelo PASUC e os resultados de atendimento da demanda.

Na Tabela 23 é possível comparar a produção total de todas as usinas cooperadas na safra 2007/2008 com o resultado obtido pelo modelo PASUC para este mesmo dado. Nesta tabela, também é apresentada a variação existente entre a alocação de produção do modelo PASUC e a produção real da safra 2007/2008 da CRPAAA, sendo possível verificar que existem diferenças no mix de produção sugerido pelo modelo PASUC/N1 e no

mix de produção realmente praticado. Neste ponto, é interessante destacar que a meta de produção total encontrada pelo modelo PASUC (coluna [a]) está sendo comparada nesta tabela com a produção real da CRPAAA na safra 2007/2008 (coluna [b]). Esta comparação deve ser considerada ilustrativa, visto que a diferença reportada para os dois resultados pode ser decorrente de alterações normais no direcionamento do mix de produção ao longo da safra, além de alterações nos parâmetros utilizados no processo de planejamento da CRPAAA. Estas modificações não foram incorporadas no modelo PASUC/N1, pois os dados utilizado referem-se ao planejamento e a projeção da produção executados em agosto de 2007, portanto, antes do término da safra que ocorreu em abril de 2008.

Tabela 23. Resultado da produção mensal da CRPAAA (t ou m³) – PASUC/N1

Produtos	Produção mensal por produto (PU_{put})							Prod. PASUC total [a]	Prod. CRPAAA total [b]	Desvio [(a-b)/b]
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar			
<i>Standard</i>					1000			1000	1670	-40%
Superior	2023	977	6580		5964	2456		18000	20510	-12%
Especial	500	1500	1500	19545	20300	9155		52500	47447	11%
Extra		10995	9075	19801	37552	2577		80000	76003	5%
Refinado	1391	19083	19372	19706	19372	17554		96478	90593	6%
VHP	10487	68513	72219	117480	90301	91680	28320	479000	530110	-10%
VHP+	4466	24725	50809					80000	80000	0%
VHPe					1500			1500	1500	0%
Melaço			565	1451	1164	764	778	4722	7901	-40%
AEHC	16216	53784	16111	21707	19902	13507	8773	150000	145168	3%
AEAC	5000	10000	40707	41957	41112	29622	6603	175000	175599	0%
AEHren				2183	2183	434		4800	4800	0%

Nesta tese não foi executada uma comparação entre os resultados das variáveis de decisão encontradas pelo modelo PASUC/N1 e os mesmos resultados reportados no planejamento da CRPAAA (exceção para a comparação da margem de contribuição apresentada na Tabela 27) por não terem sido disponibilizados os parâmetros adotados no planejamento desta organização. Entretanto, esta comparação é feita para o caso específico do segundo nível de decisão do modelo e o planejamento da USC. Além disso, adota-se uma abordagem alternativa para que seja possível comparar o resultado da margem de contribuição do modelo PASUC e do planejamento executado pela CRPAAA (resultado da função objetivo do modelo). Este comparativo é apresentado na Tabela 27, utilizando o artifício de transformar a solução sugerida pelo planejamento da CRPAAA em uma das possíveis soluções do modelo PASUC/N1.

O resultado obtido para a variável de atendimento da demanda (D_{pt}) é apresentado na Tabela 24, onde é interessante destacar a coluna de saldo de demanda, ou seja,

quantidade que ainda é possível destinar para venda. Nesta coluna percebe-se que os açúcares Especial, Extra e os alcoóis AEAC e AEHC estão com saldo nulo. Isto significa que o modelo PASUC direcionou o máximo do mix de produção das usinas para esses produtos, ficando limitado pela restrição de demanda máxima [equação (90)]. Esta constatação indica que estes são os produtos que propiciam a maior margem de contribuição para o cenário analisado.

Tabela 24. Tabela de atendimento da demanda por produto (t ou m³) – PASUC-N1

Produtos	Demanda mínima ($D_{min_{pt}}$)	Demanda máxima (D_{max_p}) [c]	Demanda atendida ($\sum_t D_{pt}$) [d]	Saldo demanda [c-d]	Atraso ($I_{p^m T^m}$)	Estoque inicial ($\sum_e I_{pe0}$)
<i>Standard</i>	3.000	53.500	3.000	50.500	0	2000
Superior	18.000	53.500	18.000	35.500	0	0
Especial	18.000	53.500	53.500	0	0	1000
Extra	75.000	80.000	80.000	0	0	0
Refinado	90.000	100.000	97.151	2.849	0	500
VHP	480.000	10.000.000	480.000	9.520.000	0	1000
VHP+	80.000	1.000.000	80.000	920.000	0	0
VHPe	1.500	20.000	1.500	18.500	0	0
Melaço	0	10.000	4.720	5.279	0	0
AEHC	96.000	155.000	155.000	0	0	5000
AEAC	116.000	180.000	180.000	0	0	5000
AEHren	4.800	5.000	4.800	200	0	0

Como discutido na seção 4.4.1, os resultados obtidos no primeiro nível do modelo PASUC são utilizados como dados de entrada para o segundo nível do modelo proposto nesta tese. A Tabela 25, apresenta o resultado obtido para esta meta de produção e também mostra um comparativo entre a meta acumulada para toda a safra e a produção real da USC na safra 2007/2008.

Tabela 25. Resultado obtido para a meta de produção da USC (t ou m³) – PASUC-N1

Produtos	Meta de produção mensal da USC ($Meta_{pt}$)							Meta PASUC total [e]	Prod. USC Real [f]	[(e-f)/f]
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar			
<i>Standard</i>								0		-
Superior								0		-
Especial		1500	1500	19545	20300	9155		52000	39868	30%
Extra								0	14317	-100%
Refinado								0		-
VHP	2450	9897	17037	875		11845	5625	47729	40725	17%
VHP+								0		-
VHPe								0		-
Melaço								0		-
AEHC	2415	6195		2655	1827	9	410	13511	12268	10%
AEAC			3480	3540	3480	3360	900	14760	16752	-12%
AEHren								0		-

Outro resultado que pode ser obtido com o modelo PASUC/N1 é a moagem de cada usina u em cada período t . Entretanto, este resultado é considerado apenas para fins ilustrativos, visto que a efetiva decisão de ritmo de moagem é tomada no segundo nível de análise (PASUC/N2). Apesar deste fato, é possível destacar nas últimas colunas da Tabela 26 o comparativo entre a moagem total sugerida pelo modelo e a previsão de safra utilizada como dado de entrada. Estes dados estão sendo apresentados para destacar que na modelagem adotada nesta tese existe a imposição de moagem total da cana disponível, conforme mencionado na seção 4.2 [equação (91)]. Desta forma, não é possível deixar a cana no campo ou utilizar essa matéria-prima para outros fins como, por exemplo, a venda a terceiros.

Tabela 26. Resultado moagem das usinas cooperadas (mil t) – PASUC-N1

Usinas	Moagem mensal das usinas da CRPAAA (M_{ui})							Moagem total PASUC	Previ. safra
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar		
CAP		92,64	104,61	113,08	111,16	107,33	111,16	640,00	640,00
PAI	50,83	146,62	144,18	146,62	141,73			630,00	630,00
PAL	38,81	98,61	105,60	107,42	105,60	101,96	101,96	660,00	660,00
PRI	54,19	295,28	300,14	305,32	300,14	144,90		1.400,00	1.400,00
USC	71,63	183,76	205,94	226,16	222,33	182,65	57,50	1.150,00	1.150,00
USM	76,66	164,60	172,30	175,27	172,30	118,83		880,00	880,00
SER	95,59	163,87	179,34	209,20	206,60	145,37		1.000,00	1.000,00
SIN	88,19	254,43	250,12	258,74	250,12	198,37		1.300,00	1.300,00
SUM	25,82	140,87	162,80	172,49	169,62	163,87	34,50	870,00	870,00
TRI	42,69	265,43	277,91	282,70	277,91	268,33	115,00	1.530,00	1.530,00

Para finalizar a discussão dos resultados do modelo PASUC/N1, apresenta-se um comparativo entre a receita e a margem de contribuição obtidas pelo planejamento de safra da CRPAAA e pelo modelo. Conforme discutido anteriormente, os resultados apresentados para este comparativo (Tabela 27) foram obtidos com a fixação das variáveis do modelo PASUC/N1 de acordo com a solução sugerida pelo planejamento da CRPAAA. Desta forma, pretende-se comparar os dois resultados por meio dos mesmos critérios, parâmetros e restrições.

Tabela 27. Comparativo entre a margem de contribuição do modelo PASUC-N1

Resultados	Unidade	PASUC/N1 [b]	Plan CRPAAA Safra 2007/08 [c]	Desvio relativo [(b-c)/c]
Receita CRPAAA	\$	717.811.700	711.267.027	0,92%
Margem CRPAAA	\$	97.794.883	91.613.024	6,75%

Analisando a Tabela 27, é possível perceber que o modelo PASUC/N1 foi capaz de obter um resultado com margem de contribuição 6,75% superior ao resultado do planejamento da CRPAAA, levando a um potencial acréscimo de 6.181.859 unidades monetárias durante uma safra. No caso do comparativo de receita obtida nos dois

planejamentos, o modelo PASUC/N1 teve um resultado 0,92% superior, conforme apresentado a seguir.

Resultados do modelo PASUC/N2

Continuando com a análise dos resultados do modelo determinístico, são apresentados os dados obtidos para o segundo nível do planejamento hierárquico no caso da USC. O primeiro resultado analisado para o modelo PASUC/N2 encontra-se ilustrado na Figura 17, que apresenta o gráfico comparativo entre a moagem planejada pela USC, a moagem real da safra 2007/2008 e a moagem obtida no modelo PASUC/N2. Nesta figura percebe-se que no início da safra (semanas 1 a 7) o modelo PASUC/N2 apresentou dados de moagem próximos aos números do planejamento da USC e da safra 2007/2008, com valores que giram em torno de 40.000 e 50.000 toneladas por semana. Depois desse período (semanas 8 a 15) os valores do modelo PASUC/N2 foram superiores aos dois planos de moagem, sugerindo uma intensificação da moagem neste período e um decréscimo progressivo da moagem semanal nos períodos seguintes (semanas 16 a 25).

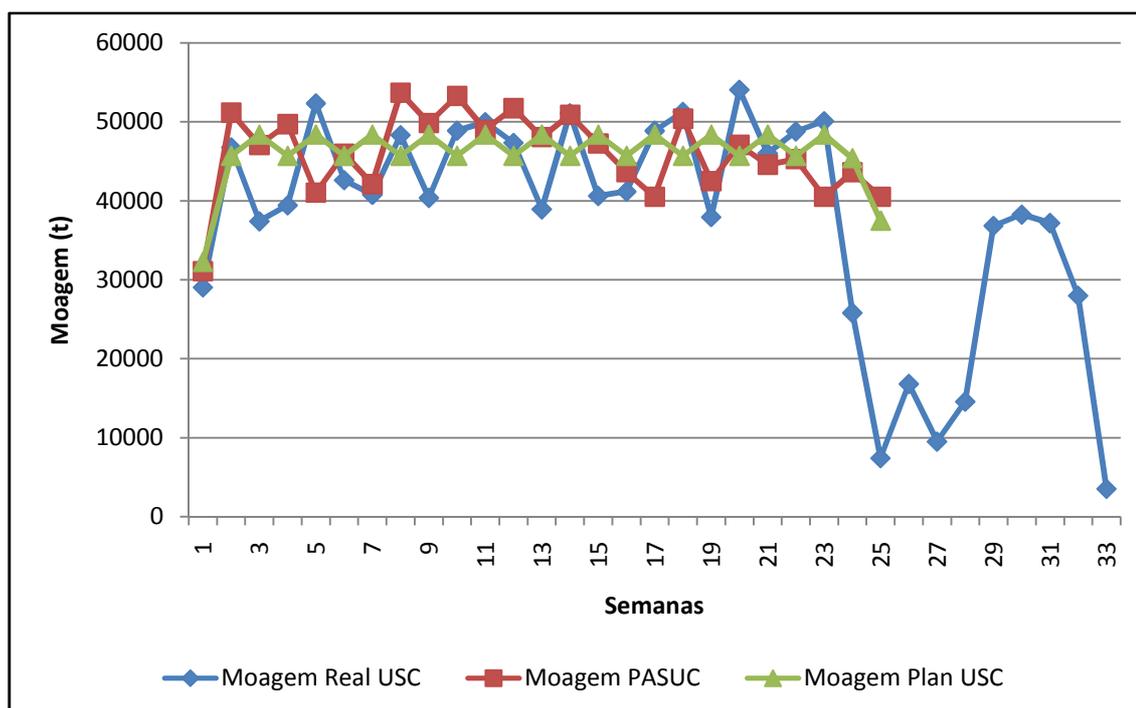


Figura 17. Comparativo moagem modelo PASUC/N2, moagem planejada pela USC e moagem real

Este comparativo de moagem não permite uma análise conclusiva sobre a tática de moagem imposta pelo modelo PASUC/N2. Estes resultados auxiliam apenas na validação do modelo, dado que a capacidade de moagem foi respeitada e os valores obtidos possuem a mesma ordem de grandeza dos valores obtidos pela USC na safra 2007/2008, com exceção de ocorrências atípicas e paradas prolongadas que ocorreram nas últimas semanas de

safra (semanas 24 a 33). Os últimos períodos de moagem real não haviam sido previstos no planejamento inicial da USC e também foram desconsiderados no planejamento elaborado pelo modelo PASUC/N2.

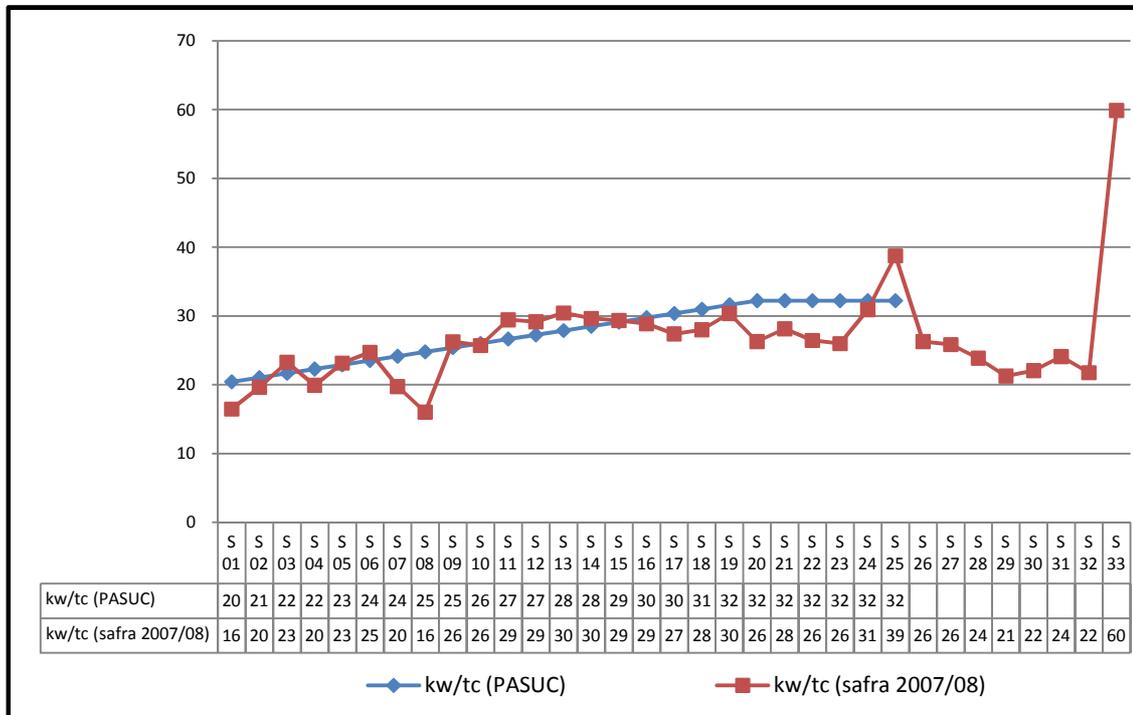


Figura 18. Comparativo de geração de energia por tonelada de cana – PASUC/N2

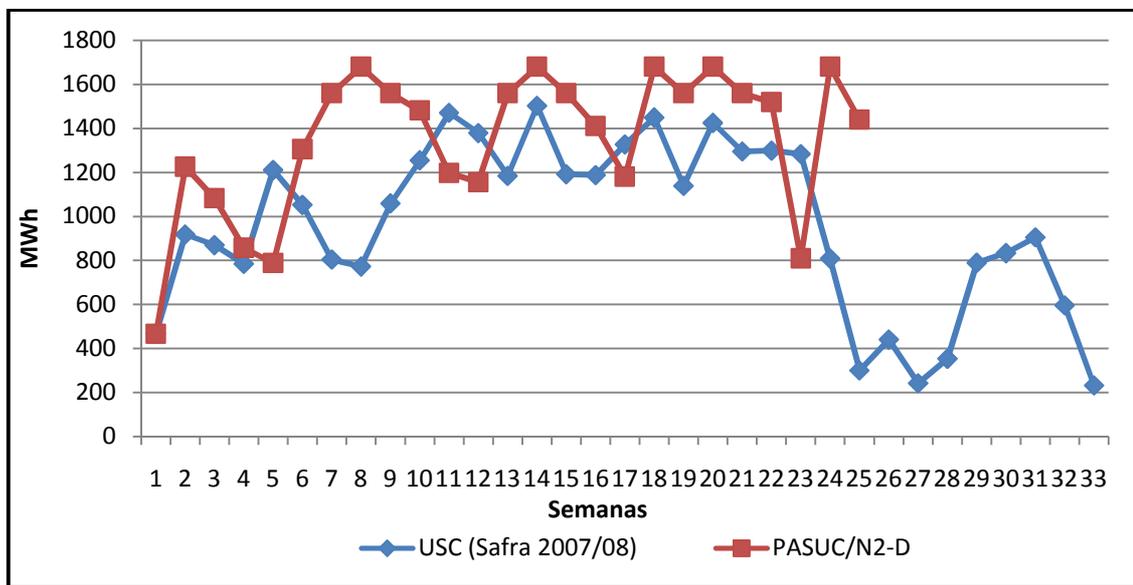


Figura 19. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2 e a dados da safra 2007/2008

Outro dado interessante para avaliar a consistência dos resultados obtidos por meio do modelo PASUC é o comparativo planejado/realizado dos valores de energia elétrica média gerada por tonelada de cana processada. Este dado ajuda a avaliar se a modelagem da geração de energia elétrica está funcionando adequadamente. A Figura 18 apresenta este

comparativo, sendo possível perceber uma boa correlação até a semana 25 e um pico na semana 33 que representa um período com geração de energia e pouca moagem de cana. Os resultados obtidos para a geração de energia em termos nominais são apresentados na Figura 19.

Nestes dois gráficos, é possível verificar a evolução da capacidade de geração de energia da USC com o passar das semanas de safra. Na Figura 19 percebe-se uma geração ao redor de 1.000.000 MWh/semana para as primeiras semanas de safra (semana 2 a semana 9), onde a geração de energia por tonelada de cana é da ordem de 22 kWh/tc (Figura 18). Estes números crescem substancialmente nos períodos seguintes da safra, chegando a valores como 1.600.000 Mwh/semana e 31 kWh/tc, devido aos valores crescentes da fibra da cana e também à continuidade da geração de energia com uma moagem menor.

Na Figura 20 são apresentados os valores da produção semanal da USC segundo o modelo PASUC/N2. Nesta figura, é possível perceber as mudanças de mix de produção durante as semanas de safra, assim como verificar a ordem de grandeza percentual de cada produto em relação à produção total. Para uma análise da variável de seleção de processos por período (X_{kt}), o leitor pode consultar os dados do Anexo H desta tese.

Outra possibilidade de análise proporcionada pelo modelo PASUC é a obtenção de uma projeção de saldo financeiro durante o período de análise. A Figura 21 apresenta a projeção obtida para os dados do planejamento da safra 2007/08 da USC. Como mencionado anteriormente (seção 4.3), esta variável é obtida pela relação da receita semanal obtida pela USC por meio de repasses da CRPAAA e as despesas fixas e variáveis para cada semana de moagem. Analisando esta figura, é possível inferir que, neste cenário, o repasse semanal da cooperativa não está sendo suficiente para cobrir as despesas correntes da USC. Desta forma, percebe-se um decréscimo do saldo inicial até um valor ligeiramente negativo nas últimas semanas de safra. Este resultado pode ser utilizado pela USC para direcionar negociações com bancos para a obtenção de linhas de crédito de capital de giro, sendo possível verificar o impacto da restrição de caixa nas decisões da empresa. Além disso, também é possível utilizar os resultados da Figura 21 para negociar com a CRPAAA um melhor repasse financeiro (RCa_p , RCb , RCc_t) para evitar a ocorrência de saldos negativos em algum momento da safra.

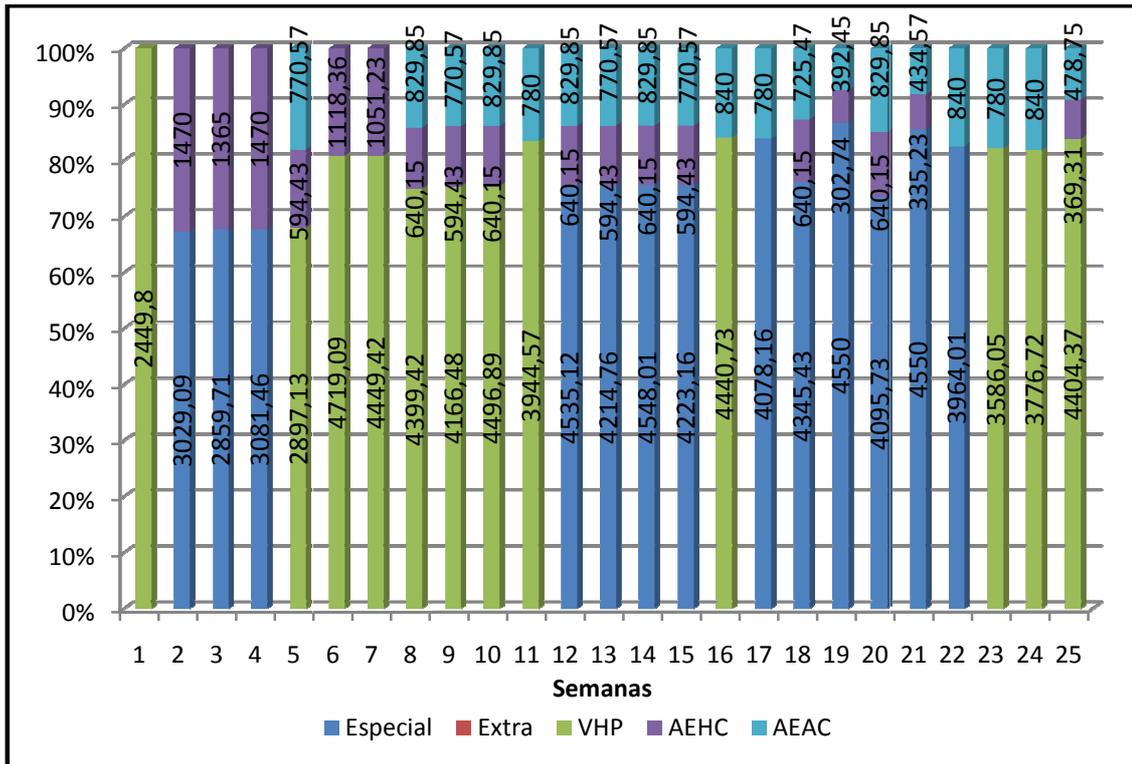


Figura 20. Produção semanal do modelo PASUC/N2 (t ou m³)

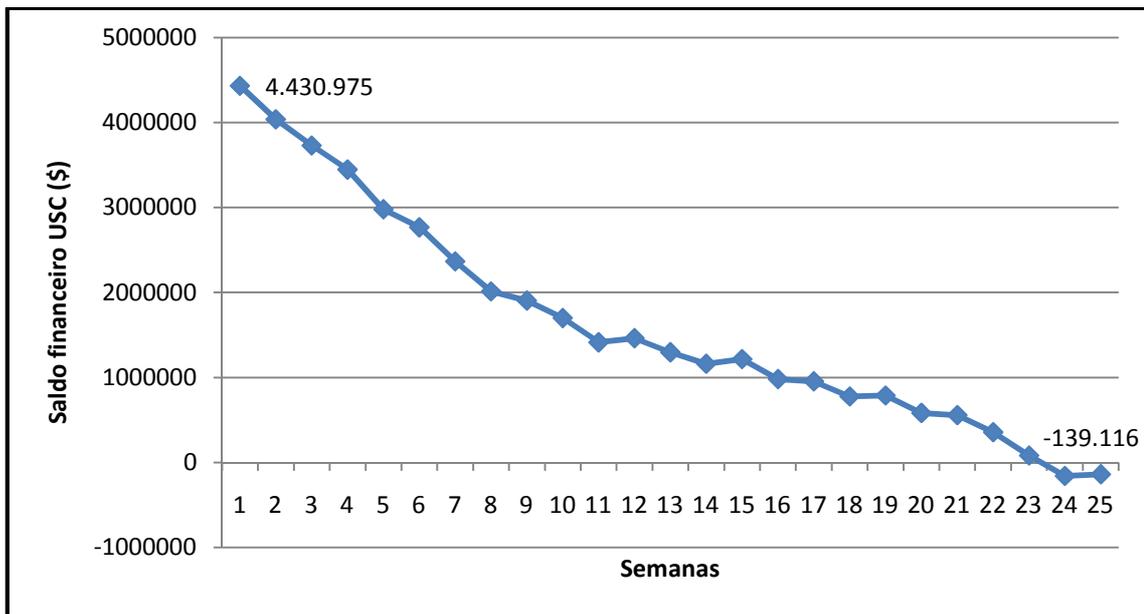


Figura 21. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2

Para finalizar a análise dos resultados do modelo PASUC/N2, apresenta-se alguns itens que sintetizam os valores da produção, receita e margem de contribuição, tanto para o modelo proposto quanto para o planejamento da USC. Neste comparativo, adotou-se o mesmo critério mencionado para o modelo PASUC/N1, ou seja, as variáveis do modelo PASUC/N2 foram fixadas de acordo com a solução adotada no planejamento do USC. O principal resultado desta comparação (Tabela 28) é o valor da margem de contribuição total

da USC (função objetivo do modelo PASUC/N2). Analisando este dado, percebe-se que o modelo PASUC foi capaz de encontrar um resultado com margem de contribuição 4,98% superior ao resultado planejado pela USC, levando a um potencial acréscimo de 864.092 unidades monetárias durante uma safra. Este comparativo também adota a metodologia apresentada para a margem de contribuição do modelo PASUC/N1 (primeira parte desta seção), onde os resultados do planejamento da USC para a safra 2007/08 foram obtidos com a transformação da solução sugerida pelo planejamento da empresa em uma das possíveis soluções do modelo PASUC/N2.

Outro ponto importante para esta análise, é perceber a possibilidade de atraso no atendimento das metas repassadas pela cooperativa (I_{pt}^-) para o cenário apresentado neste estudo, conforme dados apresentados no Anexo G e conforme a relação entre as colunas [a] e [b] da Tabela 28.

Tabela 28. Comparação dos resultados globais – PASUC/N2

Resultados		Unidade	Meta USC PASUC/N1 [a]	PASUC/N2 [b]	Plan USC Safra 2007/08 [c]	Desvio relativo [(b-c)/c]
Produção total	<i>Standard</i>	t				
	Superior	t				
	Especial	t	52.000	52.075	45.000	15,72%
	Extra	t				
	VHP	t	47.729	47.730	71.600	-33,34%
	VHP+	t				
	VHPe	t				
	AEAC	m ³	13.511	14.123	13.000	5,38%
	AEHC	m ³	14.760	13.700	9.250	52,68%
	Melaço	t				
Energia Exp.	MWh	-	14.074	13.339	5,51%	
Receita USC		\$		78.301.976	77.210.533	1,41%
Margem USC		\$		18.228.645	17.364.553	4,98%

Uma lista completa com os resultados obtidos no primeiro nível (PASUC/N1) e no segundo nível (PASUC/N2) do modelo de planejamento agregado de safra de usinas cooperadas pode ser encontrada nos Anexo G e Anexo H, respectivamente.

5.2.2 Tempos computacionais de solução (PASUC/N1 e PASUC/N2)

Os testes reportados neste capítulo consideram um total de 3121 variáveis e 3875 restrições para o caso do modelo de PL do primeiro nível hierárquico (PASUC/N1). No modelo de PIM do segundo nível de decisão (PASUC/N2), tem-se um total de 13176 variáveis, sendo 6300 binárias, e 7452 restrições. O tempo computacional para obtenção dos resultados do modelo PASUC/N1 ficou abaixo de 1 segundo, enquanto o tempo

computacional para encontrar o ótimo global (*gap* 0%) do modelo PASUC/N2 foi de 12333 segundos (cerca de 3 horas 25 minutos). Todos os valores reportados se referem a soluções comprovadamente ótimas e o tempo computacional obtido pode ser considerado aceitável para apoiar as decisões práticas inerentes ao planejamento da produção das organizações estudadas.

5.3 Considerações sobre a utilização do modelo PASUC

Após a apresentação dos resultados obtidos com a utilização do modelo PASUC, pode-se afirmar que, um modelo deste tipo tem potencial para auxiliar de forma importante no planejamento agregado da produção em usinas cooperadas, proporcionando agilidade, facilidade, confiabilidade e propiciando uma melhoria dos resultados de todo o sistema produtivo. Dentre as vantagens da utilização prática do modelo PASUC, pode-se destacar os seguintes pontos:

- I. Proporcionar integração entre os níveis de planejamento da cooperativa e da usina, propiciando uma otimização completa do sistema;
- II. Transformar em rotina as considerações e os fatores relevantes no processo de tomada de decisão, inibindo julgamentos subjetivos ou incompletos;
- III. Facilitar a geração de cenários, possibilitando uma rápida reavaliação para as premissas adotadas;
- IV. Liberar os decisores para atuar melhor em problemas incomuns dentro do dia-a-dia da empresa;
- V. Propiciar uma visão mais clara sobre o planejamento e o processo produtivo modelado.

Também fica claro que este modelo abre uma nova perspectiva para a relação existente entre a cooperativa e as usinas cooperadas, tornando possível para as usinas um rápido questionamento das decisões de alocação de metas de produção estabelecida pela cooperativa e fazendo com que o acompanhamento, a reavaliação e a cobrança do plano de safra estabelecido possam ser efetuados com maior velocidade por parte da cooperativa. Além disso, sinergias podem ser atingidas com a adoção de uma estratégia de safra que incorpora de forma integrada as questões de produção, logística e comercialização dos produtos.

Na prática, é interessante utilizar o modelo PASUC/N1 para efetuar uma análise em planejamento rolante, com periodicidade semanal ou quinzenal, rodando novamente o modelo após as atualizações de dados de entrada decorrentes de acontecimentos dos períodos anteriores. Os resultados obtidos com o modelo PASUC/N1 seriam repassados

às usinas para que fossem atualizados os modelos PASUC/N2 de cada unidade e para que o plano de safra fosse reestudado. Este processo iterativo continuaria até que o plano de safra convergisse para uma solução factível e de boa qualidade para ambas as partes.

Nos próximos capítulos, discute-se a incorporação das técnicas de otimização robusta ao modelo PASUC, com o objetivo de agregar maior poder de análise em situações onde existe incerteza nos parâmetros utilizados no modelo.

6 MODELAGEM SOB INCERTEZA

6.1 Análise da incerteza nos parâmetros do modelo PASUC

Conforme já comentado anteriormente, o setor sucroenergético é uma agroindústria produtora de *commodities* e que possui uma grande quantidade de incertezas que impactam no processo de planejamento de safra, por exemplo, incertezas agroindustriais, incertezas meteorológicas, incertezas mercadológicas e incertezas operacionais. A seguir, são expostos alguns gráficos com a comparação entre os principais parâmetros utilizados no modelo PASUC e os resultados reais obtidos na safra 2007/2008 da CRPAAA e da USC. Os dados utilizados para elaborar o planejamento de produção da CRPAAA e da USC não foram incorporados nesta análise. Para os gráficos apresentados nessa seção, foram selecionados apenas os parâmetros que possuem maior grau de incerteza e que possuem potencial para ser objeto de análise com o modelo de otimização robusta (seção 6.3 e 6.2).

Para o primeiro nível do planejamento hierárquico (PASUC/N1), foram considerados os seguintes parâmetros para análise: Figura 22 - valor líquido de venda dos produtos (VP_{pt}), Figura 23 - eficiência global em ATR ($Eatr_{ut}$) e Figura 24 - ATR da cana (ATR_{ut}). Nesta análise, os parâmetros ATR_{ut} e $Eatr_{ut}$ referem-se a todas as usinas u que fazem parte da CRPAAA, entretanto, para facilitar o entendimento dos gráficos, apresenta-se apenas os dados que se referem à USC. O comparativo realizado para as outras usinas é análogo. No caso do valor líquido de venda (VP_{pt}), o parâmetro refere-se a todos os produtos p em todos os períodos t . Neste caso, foi escolhido o açúcar *Extra* para ilustrar esse comparativo. No segundo nível do planejamento hierárquico (PASUC/N2), foram considerados os seguintes parâmetros para análise: Figura 25 - tempo aproveitado de moagem (φ_t), Figura 26 - fibra da cana ($Fibra_{mt}$). Todos os parâmetros mencionados neste parágrafo são apresentados e discutidos abaixo.

Incerteza no valor líquido de venda dos produtos (VP_{pt})

A incerteza no preço líquido do produto p no período t (VP_{pt}) é uma incerteza mercadológica que aparece na função objetivo do modelo PASUC/N1. A existência da incerteza neste parâmetro se deve ao fato de estar se tratando com *commodities*, ou seja, produtos com referência padronizada e negociados em bolsa de valores. Desta forma, os preços dos açúcares e dos alcoóis estão sujeitos às variações do mercado de derivativos, tornando de fundamental importância a análise da incerteza. Sendo assim, na seção 6.3.1 o modelo de otimização robusta sugerido para tratar este tipo de incerteza é apresentado.

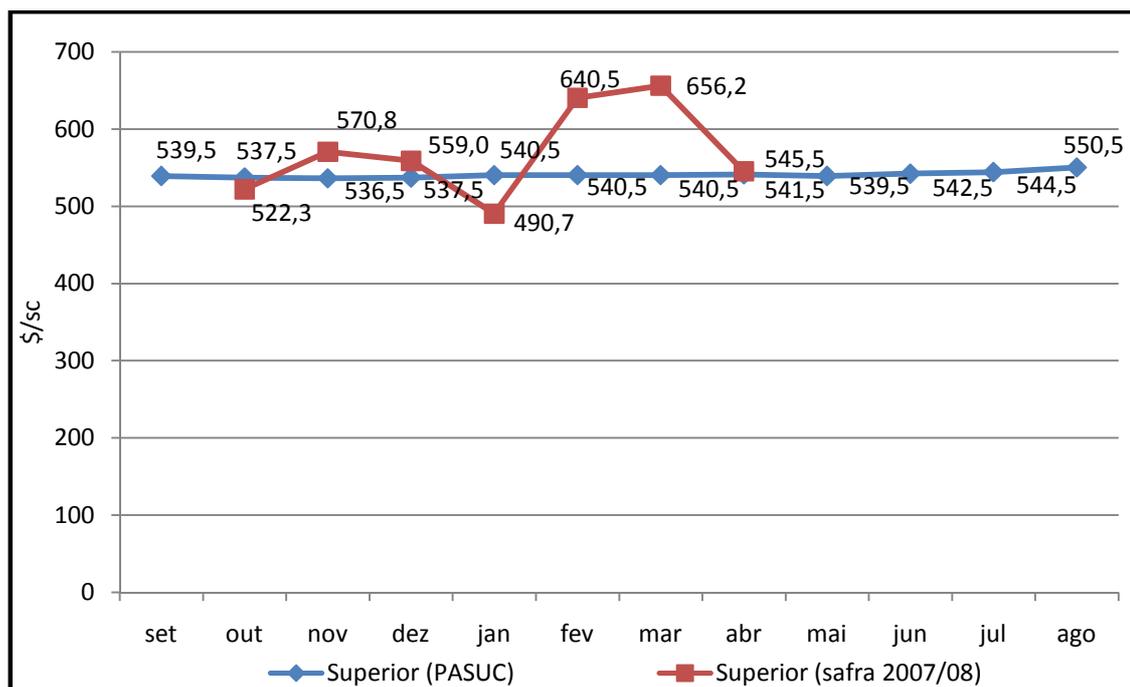


Figura 22. Comparativo dos valores líquidos do açúcar cristal superior utilizados no modelo PASUC e valores reais ($VP^{Superior}_t$).

A Figura 22 apresenta o comparativo do valor líquido dos produtos ($VP^{Superior}_t$) utilizados no modelo PASUC e valores reais obtidos pela CRPAAA para todos os meses do ano safra 2007/2008. Neste caso, considera-se como normal o fato desta variação ocorrer e também o fato desta variação ser maior para os meses mais distantes do horizonte de planejamento.

Incerteza na eficiência global de ATR ($Eatr_{ut}$) e no rendimento industrial (A_{pkt})

O segundo parâmetro considerado como incerto é a eficiência de conversão de ATR de cada usina ($Eatr_{ut}$), parâmetro que compõe a matriz tecnológica em restrições do modelo PASUC/N1. As características incertas deste parâmetro são inerentes ao processo produtivo de uma usina de açúcar e álcool, tais como, qualidade da matéria-prima processada no período, condições operacionais dos equipamentos industriais, eficiência e eficácia dos operadores e dos insumos utilizados.

De forma semelhante à incerteza na eficiência de conversão de ATR de cada usina, discutida no parágrafo acima, tem-se a incerteza na matriz tecnológica (A_{pkt}). Este parâmetro possui uma função equivalente ao parâmetro $Eatr_{ut}$, porém, neste caso, analisam-se de forma desagregada os processos produtivos de uma usina específica do modelo PASUC/N2. Sendo assim, é possível afirmar que a incerteza presente nestes dois parâmetros possui a mesma característica, ou seja, qualidade da matéria-prima processada no período, condições operacionais dos equipamentos industriais, eficiência e eficácia dos operadores e dos insumos utilizados.

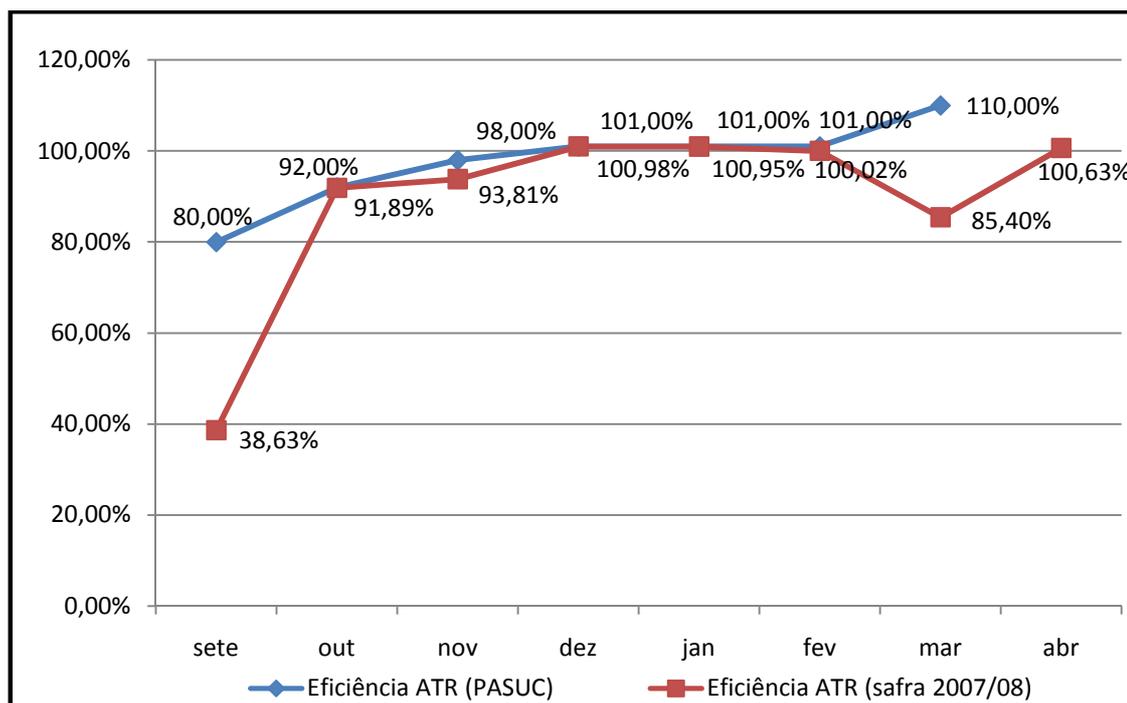


Figura 23. Comparativo da eficiência global em ATR utilizada no modelo PASUC e valores reais ($E_{atr}^{USC^t}$)

Na Figura 23, percebe-se uma boa correlação entre os parâmetros de eficiência global de ATR utilizados no modelo e os dados reais, no que se refere aos meses de outubro, dezembro, janeiro e fevereiro. Nestes meses, a estimativa utilizada na modelagem apresentou uma divergência inferior a 1% quando comparado com os dados reais da safra 2007/2008 da USC. Entretanto, quando os dados dos meses de setembro e março são analisados percebe-se uma diferença grande nos dados utilizados. No caso do mês de abril, o planejamento inicial da empresa não considerava a possibilidade de existir moagem nesse mês e, portanto, essa possibilidade também foi desconsiderada no modelo PASUC/N1. Analisando as diferenças encontradas no comparativo da Figura 23, juntamente com os decisores da USC, percebe-se que o atraso do início da safra, causado pelo excesso de chuva no mês de setembro, influenciou muito nos índices de eficiência global e pode ter sido o motivo para as grandes diferenças apresentadas nesse mês. No caso do mês de novembro, os decisores destacaram a ocorrência incomum de queimadas no canavial, fazendo com que a empresa apresentasse problemas para com o abastecimento de cana. No caso do mês de março e abril, o prolongamento exagerado da safra devido a problemas com quebras da empresa e chuvas no mês de março fez com que os índices apresentados fossem abaixo do esperado inicialmente pelos decisores.

Incerteza no parâmetro de ATR da cana (ATR_{ut})

As explicações reportadas no parágrafo anterior, para o comparativo da eficiência global em ATR ($Eatr_{ut}$) (Figura 23), também podem ser aplicadas no caso dos meses de novembro, abril e maio. A ocorrência incomum de queimadas no canavial do mês de novembro fez com que o tempo de queima da cana colhida fosse muito elevado, causando a deterioração dos açúcares da cana e reduzindo o ATR. No caso dos meses de março e abril a redução da qualidade da matéria-prima pode ser considerada normal, dado o inesperado prolongamento da safra e a ocorrência de um grande número de paradas nesses meses. O mês de outubro também apresentou um ATR abaixo das expectativas iniciais dos decisores. Neste caso, as condições agronômicas não foram apropriadas para o amadurecimento da cana. Na Figura 24, é possível perceber as diferenças mencionadas no comparativo do ATR da cana (ATR_{ut}) para os meses de outubro, novembro, março e abril.

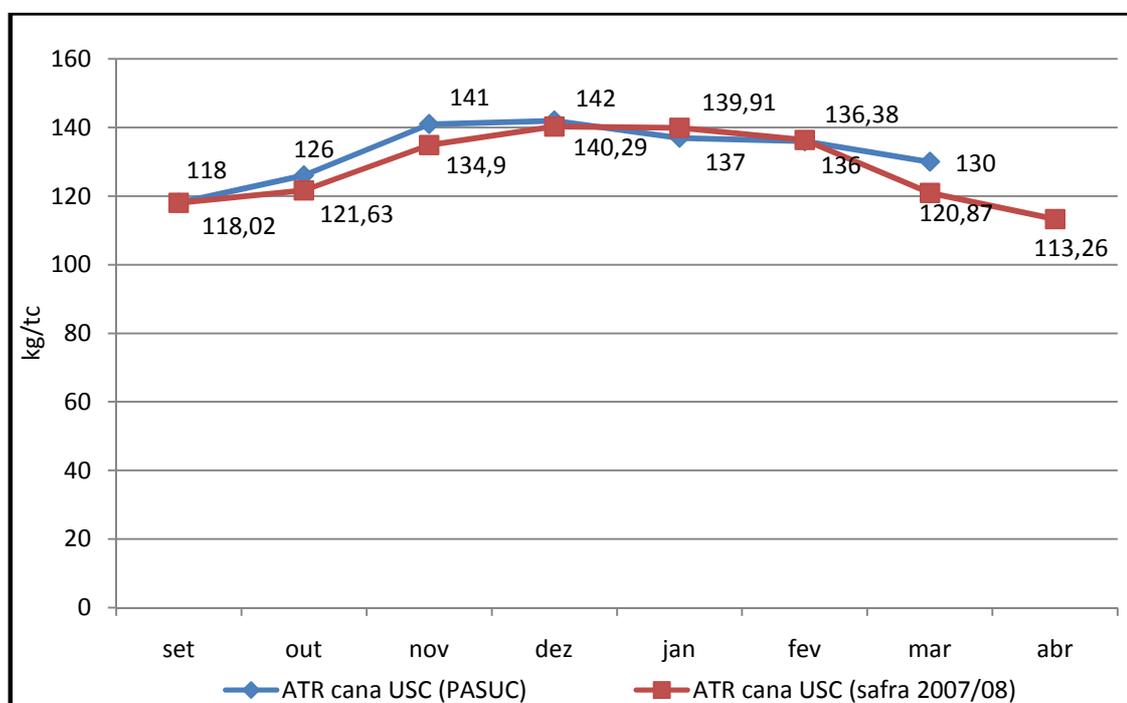


Figura 24. Comparativo do ATR da cana utilizado no modelo PASUC e valores reais (ATR_{USC})

Incerteza no tempo aproveitado de moagem (φ_t)

O quarto parâmetro considerado como incerto é o tempo aproveitado de moagem (φ_t), parâmetro que compõe o vetor independente das restrições do modelo PASUC/N2. Neste caso, a incerteza é proveniente das condições meteorológicas e da ocorrência de paradas acidentais durante a safra.

Por meio da análise dos dados de tempo aproveitado de moagem (φ_t) (Figura 25), percebem-se dois momentos distintos da safra 2007/2008. Um primeiro momento (semana 1 até semana 23), em que a empresa operou normalmente (dados de tempo aproveitado variando entre 75% e 100%) e um segundo momento (semana 24 até semana 33),

em que o tempo aproveitado obtido pela USC apresentou valores atípicos para os padrões de trabalho da empresa. Neste caso, considera-se compreensível que os parâmetros utilizados para estimar φ_t apresentem variação ao longo do tempo, dado o grande número de incertezas na determinação desse parâmetro.

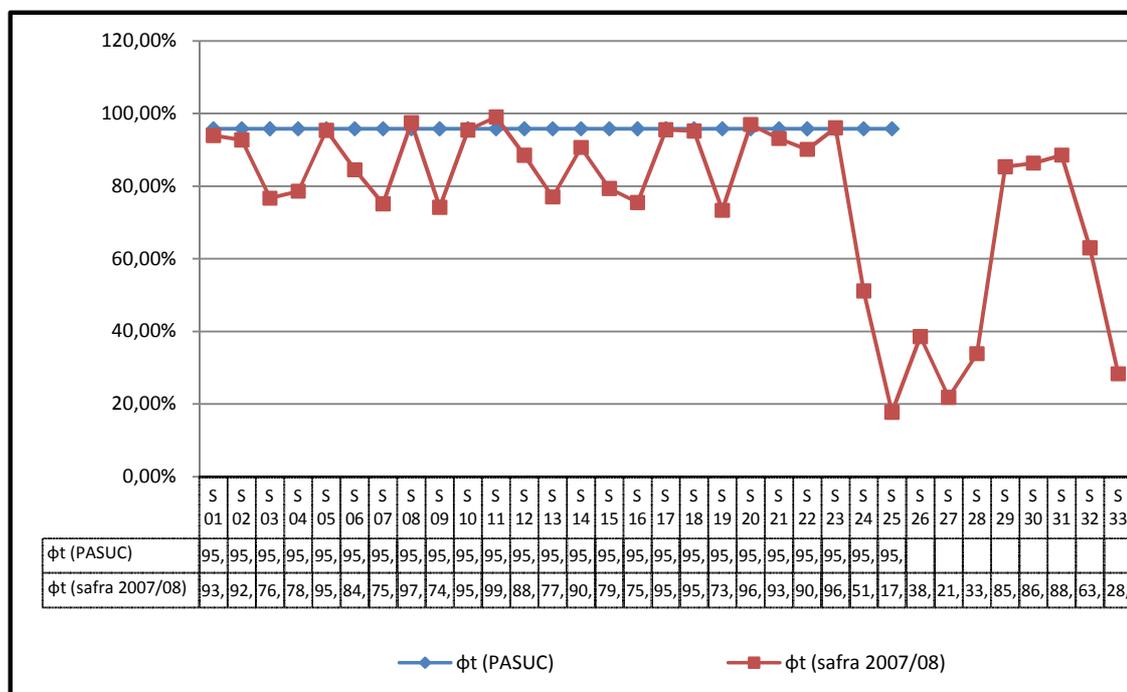


Figura 25. Comparativo do tempo aproveitado utilizado no modelo PASUC e valores reais (φ_t)

Incerteza no parâmetro de fibra da cana ($Fibra_{mt}$)

O último parâmetro reportado neste trabalho é a fibra da cana ($Fibra_{mt}$). Este parâmetro foi considerado para esta análise para capturar a incerteza referente à quantidade de matéria-prima disponível para cogeração de energia da planta. Neste caso, percebe-se que a estimativa utilizada apresenta um comportamento próximo ao estimado pelos decisores, com variação inferior a 0,5% na grande maioria das semanas de safra (Figura 26).

A análise executada nesta seção pretende embasar a escolha dos parâmetros considerados para a aplicação da otimização robusta. Tendo como base os dados comparativos apresentados acima, juntamente com os comentários e sugestões dos decisores da CRPAAA e da USC, considera-se nesta tese os parâmetros: eficiência global em ATR (incerteza operacional e agroindustrial no modelo PASUC/N1), valor líquido de venda dos produtos (incerteza mercadológica no modelo PASUC/N1), tempo aproveitado de moagem (incerteza operacional e meteorológica no modelo PASUC/N2) e matriz de eficiência industrial (incerteza operacional e agroindustrial no modelo PASUC/N2). O parâmetro de ATR (ATR_{ut}) da cana foi desconsiderado devido à possibilidade de incorporar esta incerteza durante a análise da eficiência global em ATR ($Eatr_{ut}$). A afirmação da frase anterior também

é verdadeira para os respectivos parâmetros do segundo nível de análise (ATR_t e A_{pkt}). O parâmetro de fibra da cana ($Fibra_{mt}$) também foi desconsiderado devido ao baixo impacto relativo desta incerteza para a análise desejada.

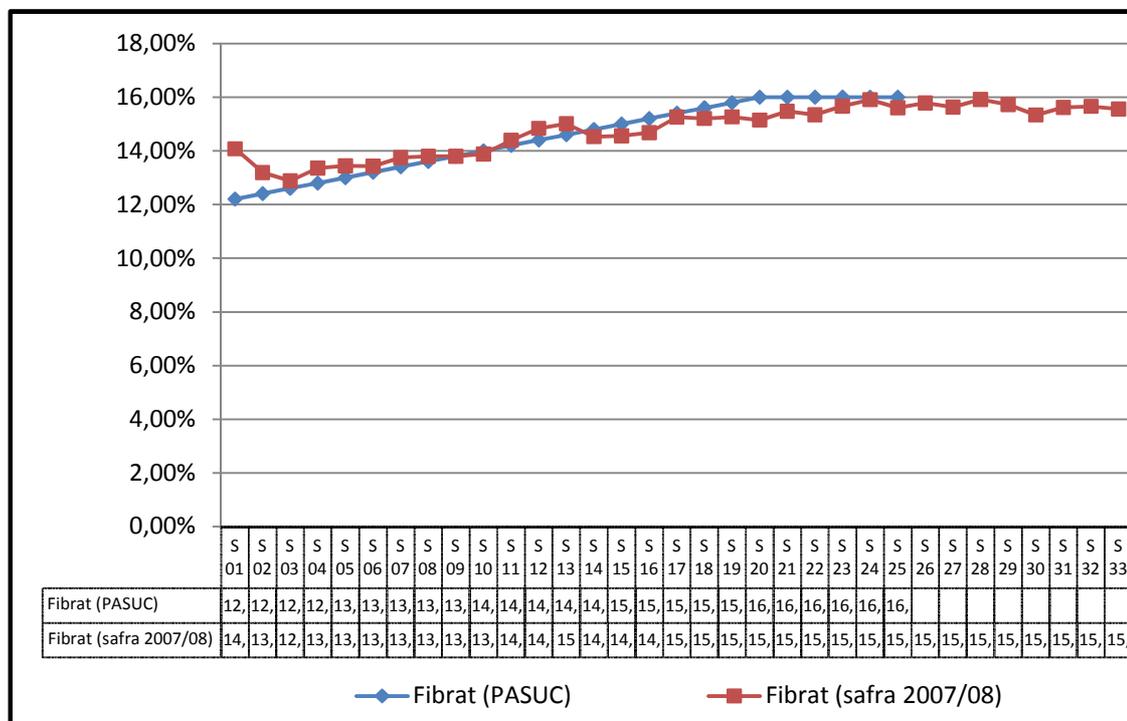


Figura 26. Comparativo da fibra da cana utilizada no modelo PASUC e valores reais ($Fibra_{mt}$)

Além dos parâmetros mencionados nesta seção, os custos encontrados na função objetivo do modelo PASUC/N1 [custo de produção por usina (CP_{pu}) e custo de estocagem (CE_{pe})] e do modelo PASUC/N2 [custo industrial (CK_{kt}), custo agrícola (CM_{mt}) e custo de CCT (CF_{ft})] também podem ser considerados incertos. Entretanto, estes parâmetros não foram contemplados na modelagem de otimização robusta desta tese dada a dificuldade encontrada para uniformizar a metodologia de contabilização dos custos em cada usina que faz parte do sistema cooperado em estudo [caso do custo de produção por usina (CP_{pu}), modelo PASUC/N1] e devido a dependência existente entre os custos de alguns processos industriais (CK_{kt}) [modelo PASUC/N2]. Esta análise pode ser incorporada em pesquisas futuras.

A seguir, são apresentadas as extensões do modelo determinístico PASUC para algumas das incertezas listadas acima ao serem aplicadas as abordagens de otimização sob incerteza apresentadas no capítulo 3, particularmente a abordagem de “programação estocástica robusta” proposta por Mulvey *et al.* (1995) (apresentada na seção 3.4.3) e a abordagem de “otimização robusta” proposta por Bertsimas e Sim (2003; 2004) (apresentada na seção 3.4.5) e por Bertsimas e Thiele (2006) (apresentada na seção 3.4.6). A partir da

próxima seção, adota-se uma terminologia que diferencia as abordagens citadas acima, conforme segue: “programação estocástica robusta”, “otimização robusta Bertsimas-Sim” e “otimização robusta Bertsimas-Thiele”. O capítulo 7 apresenta os resultados obtidos com a utilização dos modelos discutidos no decorrer deste capítulo.

6.2 Modelagem de programação estocástica robusta

6.2.1 Incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-M-VP)

Nesta seção, discute-se a incorporação da técnica de programação estocástica robusta (seção 3.4.3) ao modelo PASUC/N1 (seção 4.2), considerando o valor do produto p , no período t (VP_{pt}) como um parâmetro incerto. Este modelo é identificado nesta tese pela abreviação PASUC/N1-M-VP, onde a letra M identifica a utilização da técnica de programação estocástica robusta inicialmente proposta por Mulvey *et al.* (1995) e as letras VP representam a incorporação da incerteza no parâmetro VP_{pt} .

O ponto fundamental para o desenvolvimento de um modelo de programação estocástica robusta é a definição dos cenários tratados e a determinação das variáveis de primeiro e segundo estágio. Para o caso do modelo PASUC/N1-M-VP propõe-se a substituição do parâmetro VP_{pt} por um novo parâmetro VP_{pts} que representa o valor do produto p , no período t , para cada cenário s e possibilita a incorporação da incerteza nos preços dos produtos por meio dos cenários considerados. Outra modificação proposta é a transformação das variáveis de atendimento da demanda do produto p , no período t (D_{pt}), estoque do produto p , no depósito e , no final do período t (I_{pet}^+) e atraso na entrega do produto p , no final do período t (I_{pt}^-) em variáveis de segundo estágio (D_{pts} , I_{pets}^+ e I_{pts}^-) que representam, respectivamente, a demanda, o estoque e o atraso em cada cenário s . As variáveis de primeiro estágio do modelo PASUC/N1-M-VP são as mesmas variáveis de produção do produto p , na usina u , no período t (PU_{put}) e moagem da usina u , no período t (M_{ut}), apresentadas para o modelo PASUC/N1. Desta forma, pode-se dizer que as variáveis de primeiro estágio estão representando a etapa produtiva do modelo e as variáveis de segundo estágio correspondem às decisões de comercialização dos produtos acabados e ajustes de estoque e falta.

Além das modificações apresentadas acima é necessário incorporar ao modelo PASUC/N1-M-VP um novo conjunto de parâmetros e variáveis que são listados a seguir.

Novas variáveis incorporadas ao modelo PASUC/N1-M-VP

- θ_s^+ Variável auxiliar que representa o desvio positivo entre o valor do critério de otimalidade de cada cenário s ;
- θ_s^- Variável auxiliar que representa o desvio negativo entre o valor do critério de otimalidade de cada cenário s ;
- z_{pts}^+ Variável auxiliar que representa a infactibilidade positiva para cada produto p , período t e cenário s ;
- z_{pts}^- Variável auxiliar que representa a infactibilidade negativa para cada produto p , período t e cenário s ;

Novos parâmetros incorporados ao modelo PASUC/N1-M-VP

- λ Fator penalização do desvio da função objetivo em cada cenário s ;
- ω Fator de ajuste do *trade-off* entre otimalidade e robustez do modelo;
- p_s Vetor de probabilidade de ocorrência do cenário s ;

Com a utilização destes novos parâmetros e variáveis é possível apresentar a formulação algébrica do modelo PASUC/N1-M-VP. Para isso, considere inicialmente a equação (23) (seção 3.4.3), onde a forma básica da função objetivo de um modelo de programação estocástica robusta é demonstrada, e considere os critérios de otimalidade (σ) e de penalidade por infactibilidade (ρ) definidos a seguir:

$$\sigma = \sum_s p_s \left(\left(\sum_t \sum_p VP_{pts} D_{pts} \right) - \left(\begin{array}{l} \sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} \\ + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pets}^+ \\ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pts}^- \end{array} \right) \right) + \lambda \sum_s p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) \quad (147)$$

$$\rho = \sum_s \sum_t \sum_p p_s (z_{pts}^+ + z_{pts}^-) \quad (148)$$

Considere também a variável ζ_s como sendo a função objetivo do modelo determinístico original para cada cenário s [equação (87)], como segue:

$$\zeta_s = \left(\sum_t \sum_p VP_{pts} D_{pts} \right) - \left(\begin{array}{l} \sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pets}^+ \\ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pts}^- \end{array} \right) \quad \forall s \quad (149)$$

Para finalizar, note que na formulação apresentada na revisão bibliográfica do modelo de programação estocástica robusta da seção 3.4.3 [equações (31)-(37)] a função objetivo é de minimização e, conseqüentemente, os termos das penalizações λ e ω são

positivos. No caso do modelo proposto nesta seção, tem-se uma função objetivo de maximização e, conseqüentemente, os termos das penalizações devem ser negativos.

A seguir, apresenta-se a formulação do modelo PASUC/N1-M-VP, onde a discussão desta seção pode ser verificada. Comparando com o modelo determinístico PASUC/N1, as modificações mais importantes no equacionamento que segue podem ser observadas na função objetivo (150), nas restrições (151) e (152) e na definição das variáveis de domínio de primeiro estágio (164), de segundo estágio (165) e das variáveis auxiliares do modelo de programação estocástica robusta (166).

Modelo PASUC/N1-M-VP

$$\max \xi = \sum_s p_s \zeta_s - \lambda \sum_s p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) - \omega \sum_s \sum_t \sum_p p_s (z_{pts}^+ + z_{pts}^-) \quad (150)$$

Restrições do modelo PASUC/N1-M-VP

$$\zeta_s - \sum_{s'=1}^S p_{s'} \zeta_{s'} = \theta_s^+ - \theta_s^- \quad \forall s \quad (151)$$

$$\sum_e I_{pets}^+ = \sum_e I_{p,e,t-1,s}^+ + \sum_u PU_{put} - D_{pts} + I_{pts}^- - I_{p,t-1,s}^- + z_{pts}^+ - z_{pts}^- \quad \forall p, t, s \quad (152)$$

$$D_{pts} \geq Dmin_{pt} \quad \forall p, t, s \quad (153)$$

$$Dmax_p \geq \sum_t D_{pts} \quad \forall p, s \quad (154)$$

$$C_{u0} = \sum_t M_{ut} \quad \forall u \quad (155)$$

$$Mmin_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \leq M_{ut} \leq Mmax_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \quad \forall u, t \quad (156)$$

$$I_{pets}^+ \leq Emax_{pe} \quad \forall p, e, t, s \quad (157)$$

$$\sum_e I_{p,e,T^u,s}^+ \geq EP_p; I_{p,T^u,s}^- = 0 \quad \forall p, s \quad (158)$$

$$PU_{put} \leq CPmax_{pu} \cdot n_{ut} \quad \forall p, u, t \quad (159)$$

$$\sum_{pa} PU_{pa,u,t} \leq CFmax_u \cdot n_{ut} \quad \forall u, t \quad (160)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \leq CDmax_u \cdot n_{ut} \quad \forall u, t \quad (161)$$

$$\frac{M_{ut} \cdot ATR_{ut} \cdot Eatr_{ut}}{1000} = \sum_p PU_{put} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (162)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \cdot Patr_{pe} + \sum_{pm} PU_{pm,u,t} \cdot Matr_u \geq \sum_{pa} PU_{pa,u,t} \cdot \theta_{pa,u} \cdot Matr_u \quad \forall u, t \quad (163)$$

$$M_{ut} \geq 0; PU_{put} \geq 0 \quad \forall p, u, t \quad (164)$$

$$I_{pets}^+ \geq 0; I_{pts}^- \geq 0; D_{pts} \geq 0 \quad \forall p, e, t, s \quad (165)$$

$$\theta_s^+ \geq 0; \theta_s^- \geq 0; z_{pts}^+ \geq 0; z_{pts}^- \geq 0 \quad \forall s \quad (166)$$

O modelo PASUC/N1-M-VP [equações (150)-(166)] tem como base o modelo determinístico PASUC/N1 descrito na seção 4.2 e incorpora a modelagem de programação

estocástica robusta, com características de programação multiobjetivo, onde o fator de ajuste ω desempenha o papel de controlar o peso entre robustez da solução e robustez do modelo, e o parâmetro λ penaliza o desvio entre o valor da função objetivo de cada cenário s , conforme discutido na seção 3.4.3 e também no início desta seção. Os valores adotados para estas penalizações (λ e ω) são discutidos e apresentados no capítulo 7.

6.2.2 Incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-M-EATR)

Conforme discutido na seção anterior, o ponto fundamental para o desenvolvimento de um modelo de programação estocástica robusta é a definição dos cenários tratados e a determinação das variáveis de primeiro e segundo estágio. Para o caso da incerteza no parâmetro de eficiência global das usinas ($Eatr_{ut}$), modelo PASUC/N1-M-EATR, utilizam-se as mesmas variáveis de primeiro e segundo estágio do modelo PASUC/N1-M-VP (seção 6.2.1) e adota-se um novo parâmetro $Eatr_{uts}$ que determina o valor da eficiência global de conversão de ATR da usina u , no período t , para cada cenário s . Outra diferença existente entre o modelo PASUC/N1-M-EATR e o modelo PASUC/N1-M-VP é a remoção da incerteza no parâmetro VP_{pt} (preços dos produtos) e a modificação da variável auxiliar que representa a infactibilidade do modelo de otimização robusta, conforme descrito a seguir:

Novas variáveis incorporadas ao modelo PASUC/N1-M-EATR

z_{uts}^+ Variável auxiliar que representa a infactibilidade positiva para cada usina u , período t e cenário s ;

z_{uts}^- Variável auxiliar que representa a infactibilidade negativa para cada usina u , período t e cenário s ;

A seguir, apresenta-se a formulação do modelo PASUC/N1-M-EATR, seguindo a mesma notação adotada na seção anterior e utilizando a seguinte definição para os critérios de otimalidade (σ) e de penalidade por infactibilidade (ρ).

$$\sigma = \sum_s p_s \left(\left(\sum_t \sum_p VP_{pt} D_{pts} \right) - \left(\sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pets}^+ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pts}^- \right) \right) + \lambda \sum_s p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) \quad (167)$$

$$\rho = \sum_s \sum_t \sum_u p_s (z_{uts}^+ + z_{uts}^-) \quad (168)$$

Considere também a variável ζ_s como sendo a função objetivo do modelo determinístico original para cada cenário s [equação (87)], como segue:

$$\zeta_s = \left(\sum_t \sum_p VP_{pt} D_{pts} \right) - \left(\sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pets}^+ \right) + \left(\sum_p \sum_t CA \cdot I_{pts}^- \right) \quad \forall s \quad (169)$$

Assim como discutido na seção 6.2.1, a função objetivo do modelo proposto nesta seção também é uma função de maximização e, conseqüentemente, as penalizações λ e ω possuem termos negativos. Com estas definições é possível apresentar a formulação do modelo PASUC/N1-M-EATR, onde a discussão apresentada nesta seção pode ser verificada. Comparando com o modelo determinístico PASUC/N1, as modificações mais importantes no equacionamento que segue podem ser observadas na função objetivo (170), nas restrições (171) e (182) e na definição das variáveis de domínio de primeiro estágio (184), de segundo estágio (185) e das variáveis auxiliares do modelo de programação estocástica robusta (186).

Modelo PASUC/N1-M-EATR

$$\max \xi = \sum_s p_s \zeta_s - \lambda \sum_s p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) - \omega \sum_u \sum_t \sum_p p_s (z_{uts}^+ + z_{uts}^-) \quad (170)$$

Restrições do modelo PASUC/N1-M-EATR

$$\zeta_s - \sum_{s'=1}^S p_{s'} \zeta_{s'} = \theta_s^+ - \theta_s^- \quad \forall s \quad (171)$$

$$\sum_e I_{pets}^+ = \sum_e I_{p,e,t-1,s}^+ + \sum_u PU_{put} - D_{pts} + I_{pts}^- - I_{p,t-1,s}^- \quad \forall p, t, s \quad (172)$$

$$D_{pts} \geq Dmin_{pt} \quad \forall p, t, s \quad (173)$$

$$Dmax_p \geq \sum_t D_{pts} \quad \forall p, s \quad (174)$$

$$C_{u0} = \sum_t M_{ut} \quad \forall u \quad (175)$$

$$Mmin_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \leq M_{ut} \leq Mmax_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \quad \forall u, t \quad (176)$$

$$I_{pets}^+ \leq Emax_{pe} \quad \forall p, e, t, s \quad (177)$$

$$\sum_e I_{p,e,T^+,s}^+ \geq EP_p; I_{p,T^+,s}^- = 0 \quad \forall p, s \quad (178)$$

$$PU_{put} \leq CPmax_{pu} \cdot n_{ut} \quad \forall p, u, t \quad (179)$$

$$\sum_{pa} PU_{pa,u,t} \leq CFmax_u \cdot n_{ut} \quad \forall u, t \quad (180)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \leq CDmax_u \cdot n_{ut} \quad \forall u, t \quad (181)$$

$$\frac{M_{ut} \cdot ATR_{ut} \cdot Eatr_{uts}}{1000} = \sum_p PU_{put} \cdot Patr_p + z_{uts}^+ - z_{uts}^- \quad \forall u, t, s \quad (182)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \cdot Patr_{pe} + \sum_{pm} PU_{pm,u,t} \cdot Matr_u \geq \sum_{pa} PU_{pa,u,t} \cdot \theta_{pa,u} \cdot Matr_u \quad \forall u, t \quad (183)$$

$$M_{ut} \geq 0; PU_{put} \geq 0 \quad \forall p, u, t \quad (184)$$

$$I_{pets}^+ \geq 0; I_{pts}^- \geq 0; D_{pts} \geq 0 \quad \forall p, e, t, s \quad (185)$$

$$\theta_s^+ \geq 0; \theta_s^- \geq 0; z_{uts}^+ \geq 0; z_{uts}^- \geq 0 \quad \forall s \quad (186)$$

As modificações impostas ao modelo PASUC/N1-M-VP [equações (150)-(166)] para obter o modelo PASUC/N1-M-EATR [equações (170)-(186)] aparecem na definição dos termos da função objetivo [equações (167)-(169)] e na restrição (182), conforme descrito no início desta seção.

6.2.3 Incerteza na matriz de rendimentos industriais (PASUC/N2-M-A)

Uma questão que deve ser abordada antes de iniciar o desenvolvimento do modelo de programação estocástica robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais (A_{pkt}) do segundo nível de análise (PASUC/N2-M-A) é a necessidade de reformular o modelo determinístico PASUC/N2 para incorporar a variável de produção do produto p , no período t (PU_{pt}), que substitui o termo $\sum_k A_{pkt} M_{kt}'''$ em todo o modelo original. Esta modificação simplifica a identificação das variáveis de segundo estágio do modelo PASUC/N2-M-A, além de ser um ponto fundamental para a incorporação da incerteza no modelo PASUC/N2-B-A, conforme discutido e apresentado na seção 6.3.3 desta tese.

A seguir apresenta-se o novo modelo determinístico PASUC/N2 com a incorporação da restrição (188) e a substituição do termo $\sum_k A_{pkt} M_{kt}'''$ pela variável PU_{pt} , conforme descrito anteriormente. Os testes executados com o novo modelo PASUC/N2 comprovaram que esta reformulação não altera o resultado da função objetivo do modelo determinístico original e, portanto, esta formulação pode ser utilizada no decorrer dos experimentos desta tese.

Modelo PASUC/N2 com variável auxiliar de produção

$$\max Z = \sum_t \left(\begin{array}{l} \left(\sum_{pa} \frac{PU_{pa,t} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA \right. \\ \left. + \sum_{pe} \frac{PU_{pe,t} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{ProdE} RecE \right. \\ \left. + \sum_{pm} \frac{PU_{pm,t} Matr_{USC''}}{ProdM} RecM \right) + EE_t VE \\ - \left(\sum_m CM_{mt} M'_{mt} + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} + \sum_p \sum_t I_{pt}^- CA \right) \end{array} \right) \quad (187)$$

Restrições do modelo PASUC/N2

$$\sum_k A_{pkt} M_{kt}''' \geq PU_{pt} \quad \forall p, t \quad (188)$$

$$\sum_{t'=1}^t PU_{pt'} + I_{pt'}^- \geq \sum_{t'=1}^t Meta_{pt'} \quad \forall p, t \quad (189)$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t \quad \forall t \quad (190)$$

$$C_{mt} = C_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt} \quad \forall m, t \quad (191)$$

$$\sum_m C_{m0} = \sum_t \sum_m M'_{mt} \quad (192)$$

$$\sum_{mp} C_{mp,t} \leq Disp_t \quad \forall t \quad (193)$$

$$\sum_{mf} M'_{mf,t} \leq \alpha_t \cdot M_t \quad \forall t \quad (194)$$

$$Mmin \cdot n_t \cdot \varphi_t \leq M_t \leq Mmax \cdot n_t \cdot \varphi_t \quad \forall t \quad (195)$$

$$S_t = S_{t-1} + \left(\sum_p (RCa_p + Patr_p RCB) PU_{pt} \right) + RCc_t - \left(\sum_m GM_{mt} M'_{mt} + \sum_f GF_{ft} M''_{ft} + \sum_k GK_{kt} M'''_{kt} \right) \quad \forall t \quad (196)$$

$$M''_{ft} \leq Fmax_f \cdot n_t \cdot \beta_{ft} \quad \forall f, t \quad (197)$$

$$PU_{pt} \leq CPmax_p \cdot n_t \quad \forall p, t \quad (198)$$

$$\sum_{pa} PU_{pa,t} \leq CFMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (199)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,t} \leq CDMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (200)$$

$$\sum_k X_{kt} = 1 \quad \forall t \quad (201)$$

$$M'''_{kt} \leq G \cdot X_{kt} \quad \forall k, t \quad (202)$$

Restrições energia no modelo PASUC/N2

$$Ib_t = Ib_{t-1} + \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1 - UB_t} \right) - Mb_t \quad \forall t \quad (203)$$

$$Ib_t \geq \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1 - UB_t} \right) \cdot EB \quad \forall t \quad (204)$$

$$Ib_{T'} \geq EPb \quad (205)$$

$$Mb_t \cdot RC = VAP_t \quad \forall t \quad (206)$$

$$VAP_t \geq \sum_k M'''_{kt} \cdot CFVAP + \frac{EG_t}{RCF} \geq \sum_k \sum_p CVAP_p \cdot PU_{pt} \quad \forall t \quad (207)$$

$$EG_t - \left(\sum_k CFE \cdot M'''_{kt} + \sum_k \sum_p CVE_{pk} PU_{pt} \right) = EE_t \quad \forall t \quad (208)$$

$$VAP_t \leq VAPMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (209)$$

$$EG_t \leq EGMax \cdot n_t \quad \forall t \quad (210)$$

$$\begin{aligned} X_{kt} \in \{0,1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; C_{mt} \geq 0; I_{pt}^- \geq 0; \\ PU_{pt} \geq 0; S_t \geq 0; Ib_t \geq 0; Mb_t \geq 0; VAP_t \geq 0; EG_t \geq 0; EE_t \geq 0 \end{aligned} \quad \forall k, m, f, p, t \quad (211)$$

Para o desenvolvimento do modelo PASUC/N2-M-A, faz-se necessário a substituição do parâmetro A_{pkt} pelo parâmetro A_{pkts} que representa o rendimento industrial do produto p , com o processo k , no período t , para cada cenário s . Além disso, considera-se como variáveis de segundo estágio a produção do produto p , no período t , no cenário s (PU_{pts}); a variável de quantidade de capital disponível para giro financeiro por período t e cenário s (S_{ts}); assim como todas as variáveis relacionadas com os cálculos da cogeração de energia em cada período t e cada cenário s (estoque de bagaço - Ib_{ts} ; quantidade de bagaço consumido para geração de vapor - Mb_{ts} ; quantidade de vapor produzido - VAP_{ts} ; quantidade de energia produzida - EG_{ts} ; quantidade de energia exportada - EE_{ts}). Estas variáveis são consideradas de segundo estágio por ser possível calcular o valor das mesmas com base nas variáveis de primeiro estágio, tais como, a variável de seleção de processos (X_{kt}), as variáveis de moagem ($M_t, M'_{mt}, M''_{ft}, M'''_{kt}$) e de disponibilidade de cana (C_{mt}). Ou seja, são variáveis que podem ter seus resultados definidos após a realização da incerteza. Fato que não acontece com as variáveis de primeiro estágio.

Além das modificações apresentadas acima é necessário incorporar ao modelo PASUC/N2-M-A as variáveis auxiliares do critério de otimalidade de cada cenário s (θ_s^+ e θ_s^-), o parâmetro de penalização do desvio da função objetivo em cada cenário s (λ) e o vetor de probabilidade de ocorrência do cenário s (p_s), conforme apresentado na seção 6.2.1 deste estudo.

Para o caso da variável auxiliar de infactibilidade do modelo de programação estocástica robusta (z_s) e do parâmetro de penalização do *trade-off* entre otimalidade e robustez (ω) utiliza-se, respectivamente, a variável de atraso no atendimento da meta repassada pelo primeiro nível de decisão para cada produto p , no período t e cenário s (I_{pts}^-), e o parâmetro de penalização por atraso na entrega da demanda (CA), ambos já existentes no modelo PASUC/N2 apresentado acima.

Com a utilização destes novos parâmetros e variáveis é possível apresentar a formulação algébrica do modelo PASUC/N2-M-A. Para isso, considere a seguinte definição para os critérios de otimalidade (σ) e penalidade por infactibilidade (ρ) deste modelo.

$$\sigma = \sum_s \sum_t p_s \left(\begin{array}{l} \left(\sum_{pa} \frac{PU_{pa,t,s} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA \right. \\ \left. + \sum_{pe} \frac{PU_{pe,t,s} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{Prode} RecE \right. \\ \left. + \sum_{pm} \frac{PU_{pm,t,s} Matr_{USC}^{USC}}{ProdM} RecM \right) + EE_{ts} VE \\ \left. - \left(\sum_m CM_{mt} M'_{mt} + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} \right) \right) + \lambda \sum_s p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) \quad (212)$$

$$\rho = \sum_s \sum_t \sum_p p_s I_{pts}^- \quad (213)$$

Considere também a variável ζ_s como sendo a função objetivo do modelo determinístico original para cada cenário s [equação (187)], como segue:

$$\zeta_s = \sum_t \left(\begin{array}{l} \left(\sum_{pa} \frac{PU_{pa,t,s} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA \right. \\ \left. + \sum_{pe} \frac{PU_{pe,t,s} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{Prode} RecE \right. \\ \left. + \sum_{pm} \frac{PU_{pm,t,s} Matr_{USC}^{USC}}{ProdM} RecM \right) + EE_{ts} VE - \left(\begin{array}{l} \sum_m CM_{mt} M'_{mt} \\ + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} \\ + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} \end{array} \right) \end{array} \right) \forall s \quad (214)$$

Para finalizar, note que na formulação apresentada na revisão bibliográfica do modelo de programação estocástica robusta da seção 3.4.3 [equações (31)-(37)] a função objetivo é de minimização e, conseqüentemente, os valores das penalizações λ e ω são positivos. No caso do modelo proposto nesta seção tem-se uma função objetivo de maximização e, conseqüentemente, as penalizações devem ser negativas. A seguir, apresenta-se a formulação do modelo PASUC/N2-M-A, onde a discussão desenvolvida nesta seção está sendo aplicada.

Comparando com o modelo determinístico PASUC/N2, as modificações mais importantes aplicadas ao modelo PASUC/N2-M-A podem ser observadas na função objetivo (215), na restrição (216), na definição das variáveis de domínio de primeiro (240) e segundo estágio (241) e das variáveis auxiliares do modelo de programação estocástica robusta (242).

Modelo PASUC/N2-M-A com variável auxiliar de produção

$$\max \xi = \sum_s p_s \zeta_s - \lambda \sum_s p_s (\theta_s^+ + \theta_s^-) - CA \sum_s \sum_t \sum_p p_s I_{pts}^- \quad (215)$$

Restrições do modelo PASUC/N2-M-A

$$\zeta_s - \sum_{s'=1}^S p_{s'} \zeta_{s'} = \theta_s^+ - \theta_s^- \quad \forall s \quad (216)$$

$$\sum_k A_{pkts} M_{kt}''' \geq PU_{pts} \quad \forall p, t, s \quad (217)$$

$$\sum_{t'=1}^t PU_{pt's} + I_{pt's}^- \geq \sum_{t'=1}^t Meta_{pt'} \quad \forall p, t, s \quad (218)$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t \quad \forall t \quad (219)$$

$$C_{mt} = C_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt} \quad \forall m, t \quad (220)$$

$$\sum_m C_{m0} = \sum_t \sum_m M'_{mt} \quad (221)$$

$$\sum_{mp} C_{mp,t} \leq Disp_t \quad \forall t \quad (222)$$

$$\sum_{mf} M'_{mf,t} \leq \alpha_t \cdot M_t \quad \forall t \quad (223)$$

$$Mmin \cdot n_t \cdot \varphi_t \leq M_t \leq Mmax \cdot n_t \cdot \varphi_t \quad \forall t \quad (224)$$

$$S_{ts} = S_{t-1,s} + \left(\sum_p (RCa_p + Patr_p RCB) PU_{pts} \right) + RCC_t - \left(\sum_m GM_{mt} M'_{mt} + \sum_f GF_{ft} M''_{ft} + \sum_k GK_{kt} M'''_{kt} \right) \quad \forall t, s \quad (225)$$

$$M''_{ft} \leq Fmax_f \cdot n_t \cdot \beta_{ft} \quad \forall f, t \quad (226)$$

$$PU_{pts} \leq CPmax_p \cdot n_t \quad \forall p, t, s \quad (227)$$

$$\sum_{pa} PU_{pa,t,s} \leq CFMax \cdot n_t \quad \forall t, s \quad (228)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,t,s} \leq CDMax \cdot n_t \quad \forall t, s \quad (229)$$

$$\sum_k X_{kt} = 1 \quad \forall t \quad (230)$$

$$M'''_{kt} \leq G \cdot X_{kt} \quad \forall k, t \quad (231)$$

Restrições energia do modelo PASUC/N2-M-A

$$Ib_{t,s} = Ib_{t-1,s} + \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1 - UB_t} \right) - Mb_{ts} \quad \forall t, s \quad (232)$$

$$Ib_{ts} \geq \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1 - UB_t} \right) \cdot EB \quad \forall t, s \quad (233)$$

$$Ib_{T',s} \geq EPb \quad \forall s \quad (234)$$

$$Mb_{ts} \cdot RC = VAP_{ts} \quad \forall t, s \quad (235)$$

$$VAP_{ts} \geq \sum_k M_{kt}''' \cdot CFVAP + \frac{EG_{ts}}{RCF} \geq \sum_k \sum_p CVAP_p \cdot PU_{pts} \quad \forall t, s \quad (236)$$

$$EG_{ts} - \left(\sum_k CFE \cdot M_{kt}''' + \sum_k \sum_p CVE_{pk} PU_{pts} \right) = EE_{ts} \quad \forall t, s \quad (237)$$

$$VAP_{ts} \leq VAPMax \cdot n_t \quad \forall t, s \quad (238)$$

$$EG_{ts} \leq EGMax \cdot n_t \quad \forall t, s \quad (239)$$

$$X_{kt} \in \{0,1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; C_{mt} \geq 0 \quad \forall k, m, f, t \quad (240)$$

$$PU_{pts} \geq 0; S_{ts} \geq 0; Ib_{ts} \geq 0; Mb_{ts} \geq 0; VAP_{ts} \geq 0; EG_{ts} \geq 0; EE_{ts} \geq 0 \quad \forall p, t, s \quad (241)$$

$$\theta_s^+ \geq 0; \theta_s^- \geq 0; I_{pts}^- \geq 0; \quad \forall p, t, s \quad (242)$$

Diferentemente da modelagem de PASUC/N1-M-EATR, é possível considerar a variável de produção por período (PU_{pts}) como uma variável de segundo estágio pelo fato das decisões de mix de produção e de ritmo de moagem de cana serem obtidas por meio das variáveis de moagem (M'''_{kt} , M''_{ft} e M'_{mt}) e de seleção de processos (X_{kt}), todas consideradas de primeiro estágio. As restrições (240) apresentam o domínio das variáveis de primeiro estágio e as restrições (241) apresentam o domínio das variáveis de segundo estágio deste modelo.

6.2.4 Incerteza no tempo aproveitado (PASUC/N2-M-PHI)

Nesta seção, o modelo de programação estocástica robusta com incerteza no parâmetro de tempo aproveitado de moagem (φ_t) é apresentado. Neste modelo foram consideradas as mesmas variáveis de primeiro e segundo estágio do modelo PASUC/N2-M-A (seção 6.2.3). Além disso, adotou-se um novo parâmetro φ_{ts} que determina o percentual de tempo aproveitado de moagem no período t , para cada cenário s . A seguir, apresenta-se apenas as equações do modelo PASUC/N2-M-A que sofreram alterações para obter a formulação do modelo PASUC/N2-M-PHI.

Restrições modificadas no modelo PASUC/N2-M-A

$$\sum_k A_{pks} M_{kt}''' \geq PU_{pts} \quad \forall p, t, s \quad (217)$$

$$Mmin \cdot n_t \cdot \varphi_t \leq M_t \leq Mmax \cdot n_t \cdot \varphi_t \quad \forall t \quad (224)$$

Novas restrições do modelo PASUC/N2-M-PHI

$$\sum_k A_{pkt} M_{kt}''' \geq PU_{pts} \quad \forall p, t, s \quad (243)$$

$$Mmin \cdot n_t \cdot \varphi_{ts} \leq M_t \leq Mmax \cdot n_t \cdot \varphi_{ts} \quad \forall t, s \quad (244)$$

Analisando as restrições (243) e (244), juntamente com as demais restrições do modelo anterior, percebe-se de imediato que a única modificação feita foi a retirada da incerteza no parâmetro de rendimento industrial (A_{pkt}) e a incorporação da incerteza no

parâmetro de tempo aproveitado de moagem (φ_{ts}). Por meio destas restrições, também é fácil perceber que a variável de segundo estágio PU_{pts} assume o mesmo valor para todo cenário s , dado que não existe relação entre esta variável e o parâmetro φ_{ts} , que incorpora a incerteza no tempo aproveitado do modelo PASUC/N2-M-PHI. Desta forma, todas as outras variáveis de segundo estágio, que são dependentes do valor do variável PU_{pts} , também assumem um único valor para todos os cenários s . Além disso, a variável associada à restrição (244), única restrição onde o parâmetro incerto φ_{ts} está presente, é uma variável de primeiro estágio e, conseqüentemente, apenas a situação mais desfavorável dentre os s cenários do parâmetro φ_{ts} será considerada na solução do modelo.

As observações apresentadas no parágrafo anterior mostram as dificuldades de utilizar o método de programação estocástica robusta para este tipo de incerteza. Uma alternativa para suplantiar estes problemas seria a transformação da variável de primeiro estágio M_t em uma variável de segundo estágio M_{ts} , entretanto esta modificação não faz sentido prático dado que a moagem de cana é uma decisão que deve ser tomada antes das variáveis aleatórias apresentarem seus valores, ou seja, uma variável tipicamente de primeiro estágio, conforme discutido na seção 6.2.1. Testes computacionais executados com o modelo PASUC/N2-M-PHI comprovaram as observações apresentadas nesta seção.

6.3 Modelagem de otimização robusta Bertsimas-Sim e Bertsimas-Thiele

6.3.1 Incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-B-VP)

Nesta seção, discute-se a incorporação da técnica de otimização robusta Bertsimas-Sim (seção 3.4.5) ao modelo PASUC/N1 (seção 4.2), considerando o valor do produto p , no período t (VP_{pt}) como um parâmetro incerto. O modelo obtido é identificado pela abreviação PASUC/N1-B-VP, onde a letra B representa a utilização da técnica de otimização robusta (seções 3.4.5 e 3.4.6) e as letras VP identificam a incorporação da incerteza no parâmetro VP_{pt} . Considere as equações do modelo PASUC/N1 como referência para a modelagem apresentada a seguir.

Para obter o modelo de otimização robusta com incerteza nos preços dos produtos é necessário definir uma variável aleatória ($V\tilde{P}_{pt}$), que represente todos os possíveis valores de preços modelados. Considere que o valor médio da variável $V\tilde{P}_{pt}$ é dado por VP_{pt} e que o maior desvio (não negativo) em relação ao valor esperado é dado por $V\hat{P}_{pt}$. Desta forma, tem-se a variável aleatória $V\tilde{P}_{pt}$ pertencendo ao seguinte intervalo de incerteza: $V\tilde{P}_{pt} \in [VP_{pt} - V\hat{P}_{pt}, VP_{pt} + V\hat{P}_{pt}]$. Considere agora τ^{VP} o conjunto de coeficientes que

possuem incerteza, Γ^{VP} o grau de conservadorismo adotado, tal que $\Gamma^{VP} \in [0, |\tau^{VP}|]$, e S^{VP} um subconjunto de τ^{VP} ($S^{VP} \subseteq \tau^{VP}$), tal que $|S^{VP}| \leq \Gamma^{VP}$

Na seqüência, utiliza-se a modelagem de otimização robusta, descrita na seção 3.4.5, para reescrever a função objetivo do modelo PASUC/N1 [equação (87)]. Na formulação que segue, foi desconsiderada a variação positiva do parâmetro, visto que há interesse apenas na parcela desfavorável do desvio. Desta forma, tem-se a nova função objetivo aleatória \tilde{Z} dada pela seguinte expressão:

$$\max \tilde{Z} = \left(\sum_t \sum_p VP_{pt} D_{pt} \right) - \max_{\Omega^{VP}} \left\{ \sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} V\hat{P}_{pt} D_{pt} \right\} - \left(\begin{array}{l} \sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} \\ + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pet}^+ \\ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pt}^- \end{array} \right) \quad (245)$$

Onde:

$$\Omega^{VP} = \{S^{VP} | S^{VP} \subseteq \tau^{VP}, |S^{VP}| \leq \Gamma^{VP}\} \text{ e } \tau^{VP} = \{(p, t) | V\hat{P}_{pt} > 0\}$$

Considerando a solução ótima da variável D_{pt} (D_{pt}^*) e sabendo que a variável D_{pt} é não negativa [inequações (100)], é possível inserir a variável z_{pt} na equação acima e reescrever o problema auxiliar robusto obtido em (245) como um problema de otimização.

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} V\hat{P}_{pt} \cdot D_{pt}^* \cdot z_{pt} \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} z_{pt} \leq \Gamma^{VP} \\ & 0 \leq z_{pt} \leq 1, \forall (p,t) \in \tau^{VP} \end{aligned} \quad (246)$$

Seguindo o desenvolvimento apresentado na seção 3.4.5, introduz-se as variáveis duais λ^{VP} e ρ_{pt}^{VP} e aplica-se o conceito de dualidade forte ao problema (246) para obter a formulação dual correspondente.

<p style="text-align: center;">Modelo primal</p> $\begin{aligned} \max \quad & \sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} V\hat{P}_{pt} \cdot D_{pt}^* \cdot z_{pt} \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} z_{pt} \leq \Gamma^{VP} \\ & z_{pt} \leq 1, \forall (p,t) \in \tau^{VP} \\ & z_{pt} \geq 0, \forall (p,t) \in \tau^{VP} \end{aligned}$	<p style="text-align: center;">Modelo dual</p> $\begin{aligned} \min \quad & \sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} \rho_{pt}^{VP} + \lambda^{VP} \cdot \Gamma^{VP} \\ \text{s.a.} \quad & \lambda^{VP} + \rho_{pt}^{VP} \geq V\hat{P}_{pt} \cdot D_{pt}^*, \forall (p,t) \in \tau^{VP} \\ & \lambda^{VP} \geq 0 \\ & \rho_{pt}^{VP} \geq 0, \forall (p,t) \in \tau^{VP} \end{aligned}$
---	--

Substituindo a formulação dual obtida no modelo determinístico original (PASUC/N1), desprezando a minimização e liberando novamente a variável D_{pt} , é possível conservar a linearidade do modelo original e obter a formulação do modelo de otimização robusta correspondente, como segue:

$$\max Z = \left(\sum_t \sum_p VP_{pt} D_{pt} \right) - \left(\sum_{(p,t) \in \tau^{VP}} \rho_{pt}^{VP} + \lambda^{VP} \cdot \Gamma^{VP} \right) - \left(\begin{array}{l} \sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} \\ + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pet}^+ \\ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pt}^- \end{array} \right) \quad (247)$$

s.a. restrições (88)-(100)

$$\begin{aligned} \lambda^{VP} + \rho_{pt}^{VP} &\geq VP_{pt} \cdot D_{pt}^*, \quad \forall (p,t) \in \tau^{VP} \\ \lambda^{VP} &\geq 0 \\ \rho_{pt}^{VP} &\geq 0, \quad \forall (p,t) \in \tau^{VP} \end{aligned} \quad (248)$$

Desta forma, o modelo PASUC/N1-B-VP tem a função objetivo apresentada em (247), sujeito a todas as restrições do modelo PASUC/N1 [equações (88)-(100)] e também às restrições adicionais apresentadas em (248).

6.3.2 Incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-B-EATR)

O segundo parâmetro considerado para a aplicação da técnica de otimização robusta é a eficiência global em ATR das usinas u no período t ($Eatr_{ut}$). Neste caso, utiliza-se a abordagem de otimização robusta de Bertsimas-Thiele para modelar a incerteza e adota-se a denominação PASUC/N1-B-EATR. A escolha da abordagem de Bertsimas-Thiele (seção 3.4.6) se deve a esparcidade encontrada na modelagem da restrição (98), fator que impediria a simples aplicação da abordagem de Bertsimas-Sim. Desta forma, antes de iniciar o desenvolvimento do modelo de otimização robusta é necessário reformular a restrição (98) (seção 4.2) por meio de uma restrição de escalonamento, tornando possível agregar os parâmetros incertos em uma restrição e incorporar o controle do conservadorismo da solução. A seguir, apresenta-se a reformulação da restrição (98), conforme discutido anteriormente.

Restrição original

$$\frac{M_{ut} \cdot ATR_{ut} \cdot Eatr_{ut}}{1000} = \sum_p PU_{put} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (98)$$

Nova restrição

$$\sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot Eatr_{ut'}}{1000} = \sum_{t'=1}^t \sum_p PU_{put'} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (249)$$

Alguns testes foram executados com o modelo PASUC/N1 e a nova restrição (249). Estes testes comprovam que a reformulação proposta não altera o resultado ótimo da função objetivo do modelo, entretanto, é interessante destacar que a solução obtida para o modelo PASUC/N1 após a reformulação evidencia a existência de ótimos alternativos para o plano de safra da CRPAAA. A seguir, apresenta-se o desenvolvimento do modelo de otimização robusta PASUC/N1-B-EATR.

Para obter o modelo de otimização robusta com incerteza na matriz de eficiência global em ATR é necessário definir uma variável aleatória ($E\tilde{atr}_{ut}$), que represente todos os possíveis valores deste parâmetro. Considere que o valor médio da variável $E\tilde{atr}_{ut}$ é dado por $Eatr_{ut}$ e que o maior desvio (não negativo) em relação ao valor esperado é dado por $E\hat{atr}_{ut}$. Desta forma, tem-se que a variável aleatória $E\tilde{atr}_{ut}$ pertence ao seguinte intervalo de incerteza: $E\tilde{atr}_{ut} \in [Eatr_{ut} - E\hat{atr}_{ut}, Eatr_{ut} + E\hat{atr}_{ut}]$. Considere agora que τ_{ut}^{Eatr} representa o conjunto de coeficientes que possuem incerteza em cada uma das (u, t) inequações da restrição (249), Γ_{ut}^{Eatr} representa o grau de conservadorismo adotado (nesta modelagem adota-se $\Gamma_{ut}^{Eatr} = \Gamma^{Eatr}, \forall u, t$), tal que $\Gamma^{Eatr} \in [0, |\tau_{ut}^{Eatr}|], \forall u, t$ e S_{ut}^{Eatr} é um subconjunto de τ_{ut}^{Eatr} ($S_{ut}^{Eatr} \subseteq \tau_{ut}^{Eatr}$), tal que $|S_{ut}^{Eatr}| \leq \Gamma^{Eatr}$.

Na seqüência, utiliza-se a modelagem de otimização robusta de Bertsimas-Thiele, descrita na seção 3.4.6, para reescrever a restrição de balanceamento de ATR modificada do modelo PASUC/N1 [equação (249)]. Na formulação abaixo, foi desconsiderado a variação positiva do parâmetro, visto que existe interesse apenas na parcela desfavorável do desvio.

$$\sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot E\tilde{atr}_{ut'}}{1000} = \sum_{t'=1}^t \sum_p PU_{pu'} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (250)$$

Seguindo com o desenvolvimento do modelo de otimização robusta e substituindo a variável aleatória pelo valor esperado do parâmetro incerto e pela função proteção, tem-se:

$$\sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot Eatr_{ut'}}{1000} - \max_{\Omega_{ut}^{Eatr}} \left\{ \sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot E\hat{atr}_{ut'}}{1000} \right\} = \sum_{t'=1}^t \sum_p PU_{pu'} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (251)$$

Onde:

$$\Omega_{ut}^{Eatr} = \{S_{ut}^{Eatr} | S_{ut}^{Eatr} \subseteq \tau_{ut}^{Eatr}, |S_{ut}^{Eatr}| \leq \Gamma^{Eatr}\} \text{ e } \tau_{ut}^{Eatr} = \{(u, t) | E\hat{atr}_{ut} > 0\}$$

Considerando a solução ótima da variável M_{ut} (M_{ut}^*) e sabendo que a variável $M_{ut'}$ é não negativa [equação (100)], é possível inserir a variável $z_{ut'}$ na equação acima e reescrever o problema auxiliar robusto da u -ésima e t -ésima restrição obtido em (251) como

um problema de otimização. Para evitar que o modelo de otimização robusta resultante seja equivalente ao modelo de Soyster (1973), impõem-se também que $z_{ut'} \in \mathcal{P} = \{|z_{ut'}| \leq 1 \forall u, t', \sum_{t'=1}^t |z_{ut'}| \leq \Gamma^{Eatr} \forall u, t\}$, conforme seção 3.4.6.

$$\begin{aligned} & \max \sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'}^* \cdot ATR_{ut'} \cdot E\hat{atr}_{ut'}}{1000} \cdot z_{ut'} \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_{t'=1}^t z_{ut'} \leq \Gamma^{Eatr} \\ & 0 \leq z_{ut'} \leq 1, \forall t' \leq t \end{aligned} \quad (252)$$

Seguindo o desenvolvimento apresentado na seção 3.4.5, as variáveis duais λ_{ut}^{Eatr} e $\rho_{ut't}^{Eatr}$ são introduzidas e aplica-se o conceito de dualidade forte ao problema (252) para obter a formulação dual correspondente.

<p style="text-align: center;">Modelo primal</p> $\begin{aligned} & \max \sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'}^* \cdot ATR_{ut'} \cdot E\hat{atr}_{ut'}}{1000} \cdot z_{ut'} \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_{t'=1}^t z_{ut'} \leq \Gamma^{Eatr} \\ & z_{ut'} \leq 1, \forall t' \leq t \\ & z_{ut'} \geq 0, \forall t' \leq t \end{aligned}$	<p style="text-align: center;">Modelo dual</p> $\begin{aligned} & \min \sum_{t'=1}^t \rho_{ut't}^{Eatr} + \lambda_{ut}^{Eatr} \cdot \Gamma^{Eatr} \\ & \text{s.a.} \\ & \lambda_{ut}^{Eatr} + \rho_{ut't}^{Eatr} \geq \frac{M_{ut'}^* \cdot ATR_{ut'} \cdot E\hat{atr}_{ut'}}{1000}, \forall t' \leq t \\ & \lambda_{ut}^{Eatr} \geq 0 \\ & \rho_{ut't}^{Eatr} \geq 0, \forall t' \leq t \end{aligned}$
---	--

Substituindo a formulação dual obtida no modelo determinístico original (PASUC/N1), desprezando a minimização e liberando novamente a variável $M_{ut'}$, é possível conservar a linearidade do modelo original e obter a formulação do modelo de otimização robusta correspondente, como segue:

$$\max Z = \left(\sum_t \sum_p VP_{pt} D_{pt} \right) - \left(\sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} I_{pet}^+ + \sum_p \sum_t CA \cdot I_{pt}^- \right) \quad (87)$$

s.a. restrições (88)-(97) e (99)-(100)

$$\sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot Eatr_{ut'}}{1000} - \sum_{t'=1}^t \rho_{ut't}^{Eatr} - \lambda_{ut}^{Eatr} \cdot \Gamma^{Eatr} = \sum_{t'=1}^t \sum_p PU_{put'} \cdot Patr_p \quad \forall u, t \quad (253)$$

$$\begin{aligned} & \lambda_{ut}^{Eatr} + \rho_{ut't}^{Eatr} \geq \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot E\hat{atr}_{ut'}}{1000}, \forall (u, t) \in \tau_{ut}^{Eatr}, \forall t' \leq t \\ & \lambda_{ut}^{Eatr} \geq 0, \forall (u, t) \in \tau_{ut}^{Eatr} \\ & \rho_{ut't}^{Eatr} \geq 0, \forall (u, t) \in \tau_{ut}^{Eatr}, \forall t' \leq t \end{aligned} \quad (254)$$

Desta forma, o modelo PASUC/N1-B-EATR tem a função objetivo do modelo PASUC/N1 (87), sujeito a todas as restrições do modelo PASUC/N1 [equações (88)-(100)], com exceção da restrição (98), e sujeito à restrição modificada apresentada em (253) e as restrições adicionais apresentadas em (254).

6.3.3 Incerteza na matriz de rendimentos industriais (PASUC/N2-B-A)

Assim como discutido no desenvolvimento do modelo PASUC/N2-M-A (item 6.2.3), nesta seção também é necessário utilizar o modelo determinístico PASUC/N2 reformulado [equações (187)-(211)] para que seja possível adotar a técnica de otimização robusta na incerteza da matriz de rendimentos industriais (A_{pkt}). O motivo para esta escolha é a não existência de independência entre a taxa de produção dos produtos p , em um determinado processo k e período t do parâmetro A_{pkt} , como pode ser percebido na seção 4.4.

Esta dependência faz com que uma das hipóteses adotadas no desenvolvimento do modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim (seção 3.4.5) seja violada e impossibilita a aplicação desta técnica ao modelo PASUC/N2 com a formulação original. Entretanto, com a reformulação do modelo PASUC/N2 [equações (101)-(124)] é possível aplicar a modelagem de otimização robusta Bertsimas-Sim apenas nos índices de A_{pkt} que podem ser considerados independentes (k e t) e, desta forma, incorporar a incerteza na matriz de rendimentos industriais na nova restrição (188), apresentada na seção 6.2.3 [equações (187)-(211)].

A seguir, detalha-se o desenvolvimento do modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim considerando a matriz de rendimentos industriais A_{pkt} do segundo nível de análise como um parâmetro incerto. Este modelo recebe a denominação PASUC/N2-B-A.

Para obter o modelo de otimização robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais (A_{pkt}) é necessário definir uma variável aleatória (\tilde{A}_{pkt}), que represente todos os possíveis valores deste parâmetro. Considere que o valor médio da variável \tilde{A}_{pkt} é dado por A_{pkt} e que o maior desvio (não negativo) em relação ao valor esperado é dado por \hat{A}_{pkt} . Desta forma, tem-se que a variável aleatória \tilde{A}_{pkt} pertence ao seguinte intervalo de incerteza: $\tilde{A}_{pkt} \in [A_{pkt} - \hat{A}_{pkt}, A_{pkt} + \hat{A}_{pkt}]$. Considere agora que τ_{pt}^A representa o conjunto de coeficientes que possuem incerteza em cada uma das (p,t) inequações da restrição (188), Γ_{pt}^A representa o grau de conservadorismo adotado (nesta modelagem adota-se $\Gamma_{pt}^A = \Gamma^A, \forall p, t$), tal que $\Gamma^A \in [0, |\tau_{pt}^A|]$, $\forall p, t$, e S_{pt}^A é um subconjunto de τ_{pt}^A ($S_{pt}^A \subseteq \tau_{pt}^A$), tal que $|S_{pt}^A| \leq \Gamma^A$.

Na seqüência, utiliza-se a modelagem de otimização robusta, descrita na seção 3.4.5, para reescrever a nova restrição do modelo PASUC-N2 [equação (188)]. Na formulação abaixo, foi desconsiderado a variação positiva do parâmetro, visto que o interesse desta modelagem está apenas na parcela desfavorável do desvio.

$$\sum_k \tilde{A}_{pkt} M'''_{kt} \geq PU_{pt} \quad \forall p, t \quad (255)$$

Substituindo a variável aleatória pelo valor esperado do parâmetro incerto e pela função proteção, conforme seção 3.4.5, tem-se:

$$\sum_k A_{pkt} M'''_{kt} - \max_{\Omega_{pt}^A} \left\{ \sum_{k \in \tau_{pt}^A} \hat{A}_{pkt} M'''_{kt} \right\} \geq PU_{pt} \quad \forall p, t \quad (256)$$

Onde:

$$\Omega_{pt}^A = \{S_{pt}^A | S_{pt}^A \subseteq \tau_{pt}^A, |S_{pt}^A| \leq \Gamma^A\} \text{ e } \tau_{pt}^A = \{k | \hat{A}_{pkt} > 0\}$$

Considerando a solução ótima da variável M'''_{kt} (M'''_{kt}^*) e, sabendo que a variável M'''_{kt} é não negativa [equação (211)], é possível inserir a variável z_{pkt} na equação acima e reescrever o problema auxiliar robusto da p -ésima e t -ésima restrição obtido em (256) como um problema de otimização, conforme segue:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{k \in \tau_{pt}^A} \hat{A}_{pkt} M'''_{kt} z_{pkt}^A \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_{k \in \tau_{pt}^A} z_{pkt}^A \leq \Gamma^A \\ & 0 \leq z_{pkt}^A \leq 1, \forall k \in \tau_{pt}^A \end{aligned} \quad (257)$$

Seguindo o desenvolvimento apresentado na seção 3.4.5, introduz-se as variáveis duais λ_{pt}^A e ρ_{pkt}^A e aplica-se o conceito de dualidade forte ao problema (257) para obter a formulação dual correspondente.

<p>Modelo primal</p> $\max \sum_{k \in \tau_{pt}^A} \hat{A}_{pkt} M'''_{kt} z_{pkt}^A$ <p>s.a.</p> $\sum_{k \in \tau_{pt}^A} z_{pkt}^A \leq \Gamma^A$ $z_{pkt}^A \leq 1, \forall k \in \tau_{pt}^A$ $z_{pkt}^A \geq 0, \forall k \in \tau_{pt}^A$	<p>Modelo dual</p> $\min \sum_{k \in \tau_{pt}^A} \rho_{pkt}^A + \lambda_{pt}^A \cdot \Gamma^A$ <p>s.a.</p> $\lambda_{pt}^A + \rho_{pkt}^A \geq \hat{A}_{pkt} M'''_{kt}, \forall k \in \tau_{pt}^A$ $\lambda_{pt}^A \geq 0$ $\rho_{pkt}^A \geq 0, \forall k \in \tau_{pt}^A$
--	---

Substituindo a formulação dual obtida no modelo determinístico reformulado nesta seção (PASUC/N2), desprezando a minimização e liberando novamente a variável M'''_{kt} ,

é possível conservar a linearidade do modelo original e obter a formulação do modelo de otimização robusta correspondente, como segue:

$$\max Z = \sum_t \left(\begin{array}{l} \left(\sum_{pa} \frac{PU_{pa,t} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA \right. \\ \left. + \sum_{pe} \frac{PU_{pe,t} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{ProdE} RecE \right) + EE_t VE \\ \left. + \sum_{pm} \frac{PU_{pm,t} Matr_{USC^n}}{ProdM} RecM \right) \\ - \left(\sum_m CM_{mt} M'_{mt} + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} + \sum_p \sum_t I_{pt}^- CA \right) \end{array} \right) \quad (187)$$

s.a. restrições (189)-(211)

$$\sum_k A_{pkt} M'''_{kt} - \sum_k \rho_{pkt}^A - \lambda_{pt}^A \cdot \Gamma^A \geq PU_{pt} \quad \forall p, t \quad (258)$$

$$\lambda_{pt}^A + \rho_{pkt}^A \geq \hat{A}_{pkt} M'''_{kt}, \quad \forall p, t, \quad \forall k \in \tau^{Eatr} \quad (259)$$

$$\lambda_{pt}^A \geq 0, \quad \forall p, t$$

$$\rho_{pkt}^A \geq 0, \quad \forall p, t, \quad \forall k \in \tau^{Eatr}$$

Desta forma, o modelo PASUC/N2-B-A tem a função objetivo do modelo PASUC/N2 modificado (187), sujeito a todas as restrições do modelo PASUC/N2 [equações (189)-(211)] e também à restrição modificada apresentada em (258) e às restrições adicionais apresentadas em (259).

Conforme mencionado anteriormente, a formulação proposta para o modelo PASUC/N2-B-A é válida para os índices k pertencentes ao conjunto $\tau_{pt}^A = \{k | \hat{A}_{pkt} > 0\}$, $\forall p, t$. Além disso, o número de parâmetros incertos depende do grau de conservadorismo adotado (Γ^A), podendo variar entre zero (modelo determinístico) e K_{pt} [modelo de Soyster (1973)], sendo K_{pt} o número total de processos disponíveis para a produção do produto p no período t . Entretanto, ao serem analisadas as outras restrições do modelo PASUC/N2-B-A, especificamente as restrições (114) e (115) (seção 5.1.2) que tratam da produção *tudo ou nada*, percebe-se que a variável M'''_{kt} só assume valores diferentes de zero para um único processo k , em cada período t . Sendo assim, o termo que representa a incerteza da matriz de rendimentos industriais no bloco de restrições (259) ($\hat{A}_{pkt} M'''_{kt}$) é nulo para todos os processos k que não forem selecionados pela variável binária de seleção de processos (x_{kt}) no período t . Esta particularidade faz com que o modelo PASUC/N2-B-A seja equivalente ao modelo de Soyster (1973) quando Γ^A for igual a 1, fato que limita a utilização do modelo de Bertsimas-

Sim proposto e torna desnecessário a utilização de um grau de conservadorismo com valores superiores a um ($1 < \Gamma^A \leq K_{pt}$).

Para contornar esta limitação pode-se adotar a estratégia proposta por Bertsimas-Thiele (conforme discutido na seção 3.4.6 e 6.3.2) e incorporar o escalonamento da restrição (255), conforme segue:

$$\sum_{t'=1}^t \sum_k \tilde{A}_{pkt} M_{kt}''' \geq \sum_{t'=1}^t PU_{pt} \quad \forall p, t \quad (260)$$

Na sequencia desta tese, esta segunda abordagem é identificada pelo termo PASUC/N2-B-A/A2, enquanto a nomenclatura da primeira abordagem apresentada passa a ser PASUC/N2-B-A/A1. A seguir, apresenta-se a formulação final do modelo PASUC/N2-B-A/A2. Esta formulação foi obtida utilizando o mesmo desenvolvimento das seções anteriores que tratam do modelo de Bertsimas-Thiele (seções 3.4.6 e 6.3.2).

$$\max Z = \sum_t \left(\begin{array}{l} \left(\sum_{pa} \frac{PU_{pa,t} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA \right) \\ + \left(\sum_{pe} \frac{PU_{pe,t} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{ProdE} RecE \right) + EE_t VE \\ + \left(\sum_{pm} \frac{PU_{pm,t} Matr_{USC''}}{ProdM} RecM \right) \end{array} \right) \quad (187)$$

$$- \left(\sum_m CM_{mt} M'_{mt} + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} + \sum_p \sum_t I_{pt}^- CA \right)$$

s.a. restrições (189)-(211)

$$\sum_{t'=1}^t \sum_k A_{pkt} M_{kt}''' - \sum_{t'=1}^t \sum_k \rho_{pkt't}^A - \lambda_{pt}^A \cdot \Gamma^A \geq \sum_{t'=1}^t PU_{pt} \quad \forall p, t \quad (261)$$

$$\lambda_{pt}^A + \rho_{pkt't}^A \geq \hat{A}_{pkt} M_{kt}''', \quad \forall p, t, \forall k \in \tau^{Eatr}, \forall t' \leq t \quad (262)$$

$$\lambda_{pt}^A \geq 0, \quad \forall p, t$$

$$\rho_{pkt't}^A \geq 0, \quad \forall p, t, \forall k \in \tau^{Eatr}, \forall t' \leq t$$

Após a utilização da técnica de otimização robusta de Bertsimas-Thiele para o modelo PASUC/N2-B-A/A2 [equação (187), (189)-(211) e (261)-(262)], verifica-se a incorporação de um número maior de incertezas em uma mesma restrição do modelo. Este acúmulo de incertezas de forma escalonada propicia o controle da grau de conservadorismo da solução em uma abordagem de *quase pior caso*, conforme discutido na seção 3.4.5. No capítulo 7, são apresentados os testes computacionais para ambas as abordagens.

6.3.4 Incerteza no tempo aproveitado (PASUC/N2-B-PHI)

Nesta seção, são apresentadas algumas considerações para contextualizar a dificuldade de utilização da modelagem de otimização robusta para o parâmetro de eficiência de aproveitamento do tempo (φ_t). Para tanto, destaca-se abaixo a restrição que utiliza este parâmetro no modelo PASUC/N2.

$$M_{min} \cdot n_t \cdot \varphi_t \leq M_t \leq M_{max} \cdot n_t \cdot \varphi_t \quad \forall t \quad (195)$$

Analisando as inequações (195), é possível perceber que se trata de um conjunto de restrições independentes para cada período t e, conseqüentemente, existe um único parâmetro φ_t para cada restrição t . Isto se deve ao fato do parâmetro φ_t representar um recurso renovável, ou seja, não há acúmulo deste recurso ao longo do tempo. Tendo destacado esta particularidade da restrição (195), considere o parâmetro Γ_t^{PHI} como sendo o grau de conservadorismo adotado para a incerteza existente na variável aleatória $\tilde{\varphi}_t$, em cada restrição t . Como se tem apenas um parâmetro incerto em cada período, o domínio de Γ_t^{PHI} é dado por $\Gamma_t^{PHI} \in [0,1]$. Desta forma, só existe a possibilidade de desconsiderar a influencia da incerteza no período t ($\Gamma_t^{PHI} = 0$, modelo determinístico), incorporar totalmente a incerteza para cada período t [$\Gamma_t^{PHI} = 1$, modelo de Soyster (1973)], ou incorporar uma fração da incerteza para cada período t ($0 < \Gamma_t^{PHI} < 1$).

As observações apresentadas no parágrafo anterior mostram a dificuldade existente para aplicar a técnica de otimização robusta para este tipo de incerteza, quando se considera apenas a utilização de valores inteiros para o grau de conservadorismo. Uma alternativa para suplantar esta limitação seria utilizar os modelos de otimização robusta integrados com restrições de chance, como pode ser verificado em Chen *et al.* (2009), ou limitar a análise a um valor de Γ_t^{PHI} fracionário. Entretanto, por questões de aplicação prática, optou-se por utilizar apenas valores inteiros para o grau de conservadorismo de cada incerteza e, portanto, não é possível aplicar diretamente as abordagens de otimização robusta de Bertsimas-Sim e de Bertsimas-Thiele.

No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação dos modelos de programação estocástica robusta e otimização robusta desenvolvidos neste capítulo 6.

7 RESULTADOS DOS MODELOS SOB INCERTEZA

Neste capítulo são apresentados os resultados computacionais obtidos com a utilização dos modelos de programação estocástica robusta e otimização robusta, descritos no capítulo anterior e utilizando os dados do estudo de caso apresentados no capítulo 5. A seção 7.1.1 apresenta e discute os resultados dos modelos de programação estocástica robusta com incerteza no preço dos produtos (PASUC/N1-M-VP); a seção 7.1.2 apresenta os resultados da mesma técnica para o caso da incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-M-EATR) e, a seção 7.1.3 apresenta os resultados obtidos conjuntamente para a incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos (PASUC-M). Na seção 7.2, são apresentados os resultados provenientes das mesmas aplicações, porém, utilizando os modelos de otimização robusta Bertsimas-Sim e Bertsimas-Thiele.

Os resultados provenientes da análise dos modelos PASUC/N2-M-PHI e PASUC/N2-B-PHI não são apresentados nesta tese devido à constatação, discutida nas seções 6.2.4 e 6.3.4, que não existe melhoria de análise ao ser incorporada a incerteza nos respectivos parâmetros com as abordagens utilizadas neste estudo. Uma alternativa para suplantarmos esta limitação em pesquisas futuras seria utilizar os modelos de otimização robusta integrados com restrições de chance, como pode ser verificado em Erdoğan e Iyengar (2006) e Chen *et al.* (2009), ou limitar a análise a um valor de Γ fracionário entre 0 e 1.

Todos os resultados reportados neste capítulo referem-se a soluções ótimas globais ($gap = 0\%$) e foram obtidos utilizando a linguagem de modelagem GAMS, versão 22.7, com *solver* CPLEX 11 em um computador Pentium 4 3,2 GHz, 2GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP, *service pack 2*, ou seja, o mesmo ambiente computacional do capítulo 5.

7.1 Resultados do modelo de programação estocástica robusta

7.1.1 Resultados do modelo de programação estocástica robusta com incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-M-VP)

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a utilização do modelo PASUC/N1-M-VP, descrito na seção 6.2.1, adotando duas abordagens para tratar a incerteza no preço dos produtos finais (VP_{pi}). A primeira abordagem (PASUC/N1-M-VP/A1), considera desvios percentuais constantes entre os preços definidos para o modelo determinístico (valor nominal) e o preço adotado para cada cenário do modelo de programação estocástica robusta. A segunda abordagem (PASUC/N1-M-VP/A2), considera uma variação crescente do desvio percentual adotado para os cenários, ou seja, nesta segunda

abordagem supõe-se que a incerteza nos preços dos produtos é maior para períodos mais distantes e, conseqüentemente, menor para os períodos mais próximos, conforme ilustrado na Figura 27. Deste modo, os cenários da segunda abordagem apresentam desvios diferentes para cada período de análise. Entretanto, para facilitar a comparação entre os modelos PASUC/N1-M-VP/A1 e PASUC/N1-M-VP/A2, os valores adotados para os desvios foram definidos de forma que o percentual total (incerteza total) em todos os períodos seja o mesmo para cada uma das situações.

As aplicações reportadas neste estudo consideram três possíveis realizações para o parâmetro incerto VP_{pts} : variação negativa no valor do parâmetro VP_{pts} (Cenário A), uma variação positiva no valor do parâmetro VP_{pts} (Cenário C) e a permanência dos preços no valor nominal adotado no modelo determinístico PASUC/N1 (Cenário B). Considera-se que as probabilidades de ocorrência do cenário A e C são de 25% e a probabilidade de ocorrência do cenário B é de 50%. A Figura 27 apresenta um resumo das considerações discutidas neste início de seção.

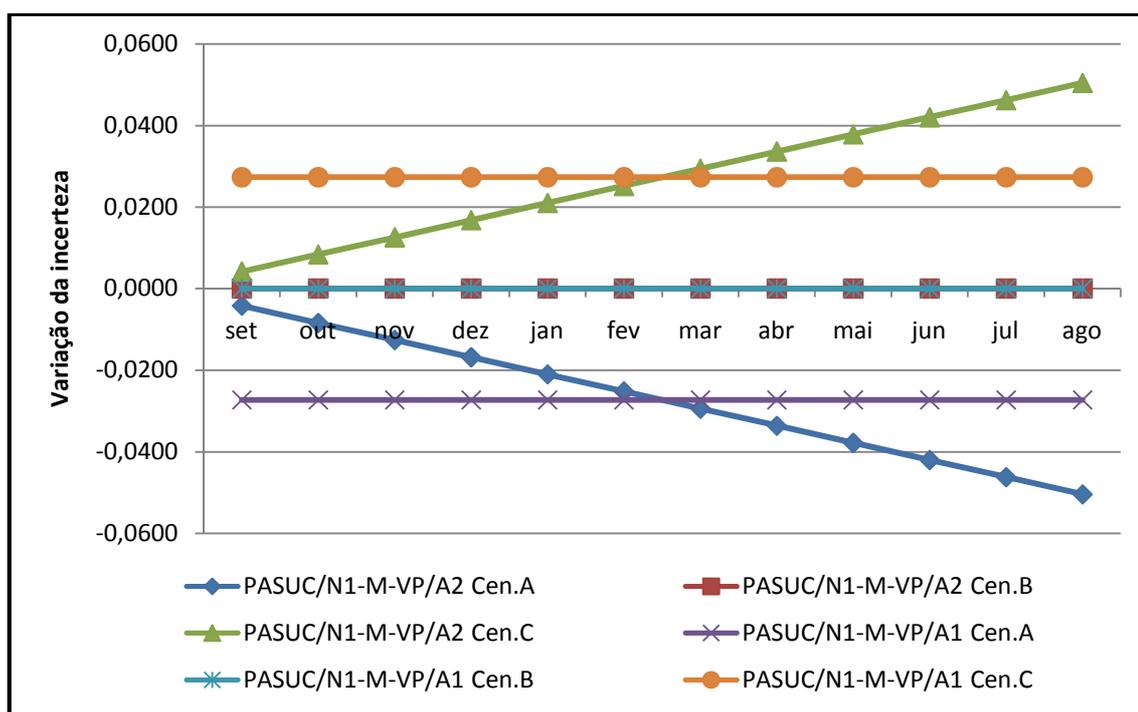


Figura 27. Percentual de incerteza em cada abordagem/cenário do modelo PASUC/N1-M-VP

Após a definição das duas abordagens utilizadas para analisar o impacto da incerteza no preço dos produtos e após a definição dos cenários adotados nesta aplicação, é possível apresentar os resultados obtidos para o modelo PASUC/N1-M-VP, conforme segue.

Os resultados obtidos nesta seção são avaliados por meio de três dados de saída do modelo PASUC/N1-M-VP, o primeiro é o valor da penalidade por infactibilidade (ρ), o segundo é o valor provável da função objetivo associada ao modelo determinístico original

($\zeta = \sum_s p_s \zeta_s$) e o terceiro é a função objetivo do modelo de programação estocástica robusta (ξ). Com estes resultados, pretende-se avaliar a deterioração dos valores de ρ , ζ e ξ de acordo com a variação do parâmetro ω (fator de ajuste do *trade-off* entre otimalidade e robustez do modelo) e do parâmetro λ (fator de penalização do desvio da função objetivo), apresentados na seção 6.2.1. A variação de ω inicia em zero e segue até o valor em que o aumento de ω não impacte mais a função objetivo do modelo. Para o caso do parâmetro λ , adota-se apenas os valores 1, 2 e 3 para viabilizar a análise pretendida e não acarretar em distorções da modelagem proposta. A Tabela 29 e a Tabela 30 apresentam os resultados mencionados acima.

Tabela 29. Resultados do modelo PASUC/N1-M-VP/A1

ω	ξ (10^6 unidades)			ζ (10^6 \$)			ρ (10^3 unidades)		
	$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$	$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$	$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$
0	3608,34	1951,87	535,06	5290,47	5239,18	3424,39	13982,0	13874,7	10000,4
100	2404,27	823,25	16,39	5089,58	5018,96	211,57	10659,9	10460,5	166,6
200	1352,34	90,66	12,30	5008,07	3259,99	112,05	10421,5	6677,95	26,02
300	339,80	42,59	9,84	3261,99	207,98	110,11	6682,53	161,32	24,56
400	88,95	39,25	8,15	212,03	116,33	53,27	148,89	27,14	0,44
500	77,99	36,83	8,15	182,79	112,24	52,13	93,54	20,19	0,00
600	68,88	34,81	8,15	163,54	112,24	52,13	71,09	20,18	0,00
700	65,84	33,15	8,15	115,03	106,06	52,13	19,99	13,22	0,00
800	64,26	32,59	8,15	106,18	91,26	52,13	10,19	0,00	0,00
900	63,57	32,59	8,15	98,24	91,26	52,13	0,49	0,00	0,00
1000	63,56	32,59	8,15	97,79	91,26	52,13	0,00	0,00	0,00

Tabela 30. Resultados do modelo PASUC/N1-M-VP/A2

ω	ξ (10^6 unidades)			ζ (10^6 \$)			ρ (10^3 unidades)		
	$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$	$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$	$\lambda=1$	$\lambda=2$	$\lambda=3$
0	3631,27	1975,62	546,94	5296,66	5277,19	3500,41	13981,8	13938,4	10127,6
100	2426,84	840,13	16,84	5095,61	5056,40	215,00	10659,9	10525,6	167,53
200	1369,76	97,85	12,58	5045,46	3334,55	113,71	10486,3	6805,08	25,94
300	355,25	43,81	10,11	3336,54	2147,35	111,83	6809,64	167,14	24,53
400	90,52	39,89	8,25	221,14	117,17	56,84	163,57	26,88	1,59
500	78,87	37,43	8,23	183,54	113,75	52,70	93,01	21,15	0,00
600	69,80	35,31	8,23	165,42	113,74	52,70	71,88	21,13	0,00
700	66,53	33,52	8,23	117,91	106,67	52,70	21,75	13,27	0,00
800	64,84	32,76	8,23	108,06	92,08	52,70	11,26	0,46	0,00
900	63,97	32,75	8,23	102,72	91,50	52,70	4,61	0,00	0,00
1000	63,92	32,75	8,23	98,69	91,50	52,70	0,00	0,00	0,00

Com os resultados da Tabela 29, percebe-se que o valor da função objetivo (ξ) decresce com o aumento do fator de ajuste de robustez do modelo (ω). Esta constatação é

justificada pela utilização da variável de ajuste de robustez (z_{pts}^+ ou z_{pts}^-), que funciona como uma variável de folga e possibilita uma melhora no valor da função objetivo em casos de penalização baixa (problema de maximização). Desta forma, pode-se dizer que o modelo PASUC/N1-M-VP/A1 possui maior grau de liberdade quanto à infactibilidade se comparado com o modelo determinístico PASUC/N1. Esta explicação também pode ser usada para justificar o comportamento da função objetivo associada ao modelo determinístico original (ζ). Os resultados reportados para a penalidade por infactibilidade (ρ) são intuitivos e indicam que quanto maior a penalização adotada para a infactibilidade, do modelo PASUC/N1-M-VP/A1, menor é o uso deste artifício (Tabela 29).

No caso do fator de penalização do desvio da função objetivo (λ), tem-se uma potencialização dos efeitos apresentados no parágrafo anterior, fazendo com que o modelo estabilize mais rapidamente em casos de λ maiores. Além disso, constatou-se que valores de penalização muito altos impossibilitam o correto funcionamento do modelo. As considerações apresentadas até este momento referem-se ao modelo PASUC/N1-M-VP/A1, a Tabela 30 apresenta os mesmos resultados obtidos para o modelo PASUC/N1-M-VP/A2.

Com os resultados apresentados na Tabela 29, é possível fazer uma comparação entre o valor obtido para a função objetivo associada ao modelo determinístico original (ζ) e a função objetivo do modelo determinístico PASUC/N1 (capítulo 5). Neste comparativo, pode-se dizer que ζ de PASUC/N1-M-VP/A1, quando $\lambda = 1$ e $\omega = 1000$, assume valores equivalentes ao encontrado para a função objetivo do modelo PASUC/N1 (Tabela 27). Avaliação análoga pode ser feita para o caso do modelo PASUC/N1-M-VP/A2 (Tabela 30), entretanto, neste caso, o resultado encontrado para ζ é ligeiramente superior ao resultado reportado para o modelo PASUC/N1.

Além disso, comparando os valores obtidos para as duas abordagens do modelo PASUC/N1-M-VP (Tabela 29 e Tabela 30), pode-se concluir que o padrão dos resultados é o mesmo, ou seja, existe um decréscimo do valor dos resultados apresentados até atingir uma assíntota, onde a alteração do valor de ω já não impacta nos resultados analisados. Desta forma, pode-se dizer que o modelo de programação estocástica robusta passa a apresentar resultados equivalentes a um modelo de programação estocástica em dois estágios com recurso para o caso em que ω tende a infinito (conforme discutido na seção 3.4.2).

As figuras abaixo (Figura 28, Figura 29 e Figura 30) ilustram o impacto de ω e λ nos resultados do modelo PASUC/N1-M-VP/A2. A Figura 28, corrobora a afirmativa anterior de que o modelo de programação estocástica robusta passa a apresentar resultados

equivalentes a um modelo de programação estocástica em dois estágios com recurso para o caso em que ω tende a infinito.

Na Figura 29, percebe-se que não existe um padrão tão regular para a parcela da função objetivo que corresponde à margem de contribuição provável (ζ), isto pode ter ocorrido devido ao impacto da utilização da variável de ajuste de robustez (z_{pts}^+ ou z_{pts}^-) em apenas alguns cenários específicos, fazendo com que a variação entre os resultados de ζ_s fosse maior e, conseqüentemente, o resultado médio da margem de contribuição também fosse maior. Este fato pode ser verificado quando se analisa o resultado do maior valor de λ ($\lambda=3$), onde se percebe que existe um comportamento mais próximo ao resultado da Figura 28.

Na Figura 30, é possível verificar que o decréscimo da parcela da função objetivo que representa a penalidade por infactibilidade no modelo PASUC/N1-M-VP/A2 apresenta o padrão esperado, conforme discutido anteriormente nos resultados da Tabela 30. Por meio da análise dos dados apresentados nesta seção, adotaram-se os valores de $\lambda = 1$ e $\omega = 1000$ para os demais resultados dos modelos de programação estocástica robusta desta tese, de forma que a factibilidade e a robustez do modelo sejam tratadas prioritariamente nas análises subseqüentes. É interessante notar que, o modelo determinístico pode ser considerado um caso particular do modelo de programação estocástica robusta, quando se tem $\lambda = 0$ e $\omega \rightarrow \infty$.

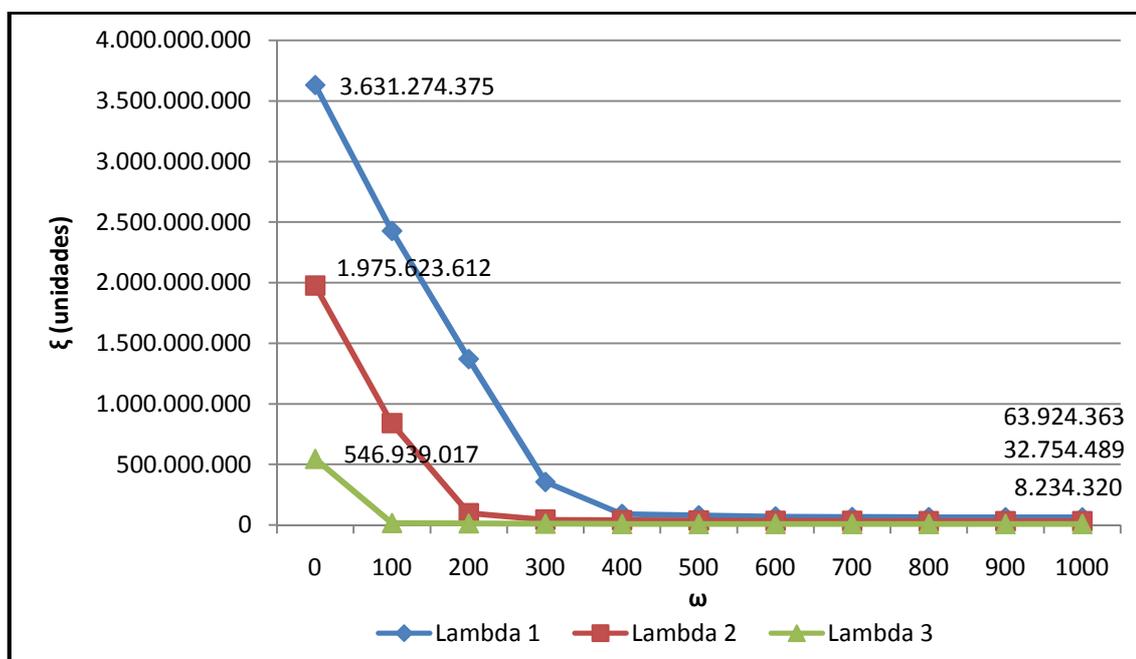


Figura 28. Impacto dos parâmetros de robustez e variabilidade entre cenários na função objetivo do modelo PASUC/N1-M-VP/A2

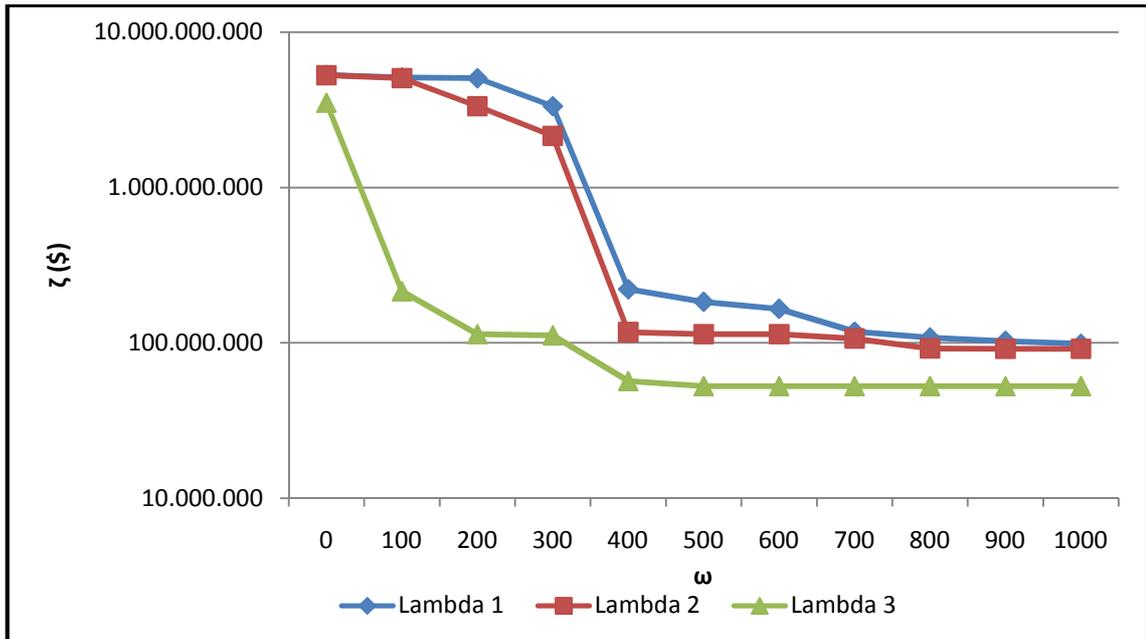


Figura 29. Impacto dos parâmetros de robustez e variabilidade entre cenários na margem de contribuição provável do modelo PASUC/N1-M-VP/A2

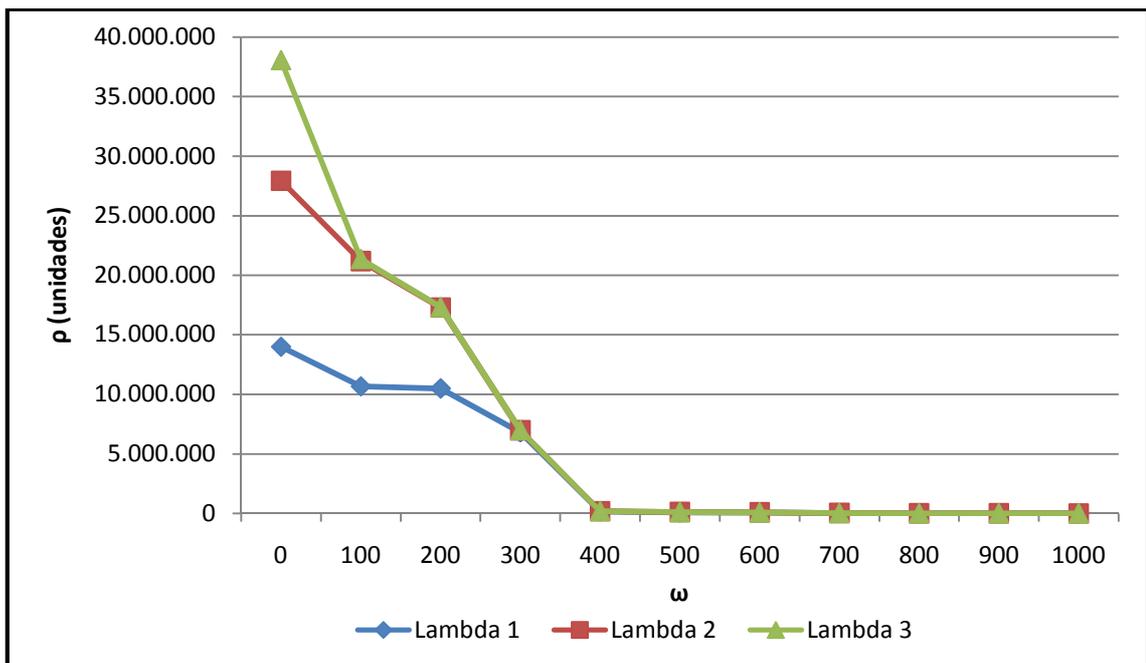


Figura 30. Impacto dos parâmetros de robustez e variabilidade entre cenários na penalização por infactibilidade da função objetivo do modelo PASUC/N1-M-VP/A2

Para uma análise mais detalhada dos resultados de cada cenário dos modelos PASUC/N1-M-VP/A1 e PASUC/N1-M-VP/A2 é fundamental avaliar o resultado obtido nos dois níveis de decisão e também os resultados das variáveis de decisão envolvidas. Para ilustrar esta análise, a Tabela 31 e a Tabela 32 apresentam, respectivamente, os resultados das margens de contribuição e o valor obtido para a variável de atendimento da demanda para o açúcar refinado ($D^{Refinado}_{ts}$) em cada abordagem/cenário considerada.

Tabela 31. Margem de contribuição do modelo PASUC/N1-M-VP (valores em \$)

Cenários	PASUC-M-VP/A1		PASUC-M-VP/A2	
	Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
A	78.198.731	17.044.226	79.022.260	17.195.707
B	97.794.874	19.154.816	97.740.687	19.359.375
C	117.391.000	21.265.405	120.256.600	21.839.269

Tabela 32. Atendimento da demanda de açúcar refinado por abordagem/cenário - PASUC/N1-M-VP (t)

Açúcar Refinado	PASUC/N1-M-VP/A1			PASUC/N1-M-VP/A2		
	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário A	Cenário B	Cenário C
set	1.891	1.891	1.891	1.891	1.891	
out	9.000	9.000	9.000	14.260	9.000	9.000
nov	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
dez	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
jan	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
fev	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
mar	14.080	14.080	14.080	9.000	14.260	9.000
abr	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
mai	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
jun	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000
jul	9.000	9.000	9.000	9.000	9.000	16.151
ago	0	0	0	0	0	0

Ao serem analisados os resultados da Tabela 31, percebe-se que os valores obtidos para a margem de contribuição da abordagem A2 são, em geral, um pouco maiores que os valores da abordagem A1 para todos os cenários analisados e para ambos os níveis. Este resultado indica que a abordagem com incerteza crescente (A2) propicia uma antecipação dos efeitos da queda mais acentuada dos preços, fazendo com que o atendimento da demanda seja alterado em cada cenário e, conseqüentemente, a margem de contribuição seja superior à obtida na abordagem A1.

No caso da Tabela 32, é possível verificar a alteração da variável de atendimento da demanda (variável de segundo estágio), mencionada anteriormente. Nesta tabela é possível perceber que a variável de decisão de atendimento da demanda apresentou o mesmo valor para todos os cenários da abordagem A1, fato que não ocorre para a segunda abordagem onde os meses de setembro, outubro, março e julho apresentam valores de atendimento da demanda distintos para cada cenário. Esta situação também foi observada para outros produtos e outras variáveis de segundo estágio, tais como o estoque (I_{pts}^+) e a falta de produtos (I_{pts}^-).

Tendo como base as considerações apresentadas nesta seção, adota-se a abordagem A2 para as demais análises do modelo de programação estocástica robusta. O

tempo computacional para obter a solução ótima do modelo PASUC/N2-M-VP foi de 349 segundos para a abordagem A1 e de 4416 segundos para a abordagem A2.

7.1.2 Resultados do modelo de programação estocástica robusta com incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-M-EATR)

Como discutido na seção 6.2.2, o ponto fundamental para o desenvolvimento de um modelo de programação estocástica robusta é a definição dos cenários tratados e a determinação das variáveis de primeiro e segundo estágio. Nesta seção são apresentados os resultados do modelo PASUC/N1-M-EATR onde a variável de atendimento da demanda D_{pts} e as variáveis de estoque (I_{pets}^+) e falta de produtos (I_{pts}^-), foram consideradas como variáveis de segundo estágio. Além disso, foram estabelecidos três cenários (Cenário A - variação negativa, Cenário B - valor nominal e Cenário C - variação positiva) para a variação da eficiência global de conversão de ATR das usinas ($Eatr_{ut}$), similarmente a abordagem A1 da seção anterior (desvios percentuais constantes entre o valor nominal e a eficiência de cada cenário do modelo de programação estocástica robusta).

Estas considerações, juntamente com uma análise do modelo apresentado na seção 6.2.2 [restrição (182)], tornam possível afirmar que todos os cenários do modelo de programação estocástica robusta PASUC/N1-M-EATR apresentam resultados iguais, independentemente dos valores adotados para λ e ω , pois a restrição que apresenta o parâmetro incerto é uma igualdade e as variáveis associadas a esta restrição são todas de primeiro estágio (M_{ut} e PU_{put}). Além disso, não é possível utilizar uma desigualdade nesta restrição, conforme discussão apresentada na seção 6.3.2.

A Tabela 33 ilustra a discussão apresentada nessa seção com os resultados da margem de contribuição da CRPAAA. Considerações semelhantes sobre a dificuldade de incorporar incerteza neste parâmetro são apresentadas na seção 7.2.2.

Tabela 33. Margem de contribuição do modelo PASUC/N1-M-EATR (valores em \$)

Cenário A	Cenário B	Cenário C
97.779.255	97.779.255	97.779.255

7.1.3 Resultados do modelo de programação estocástica robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos (PASUC-M)

Nesta seção são apresentados os resultados da incorporação da incerteza no parâmetro de preço dos produtos (nível 1), discutido nas seções 6.2.1 e 7.1.1, juntamente com a incerteza proveniente da matriz de rendimentos industriais (nível 2), apresentada na seção 6.2.3. Esta abordagem de análise conjunta de dois parâmetros incertos faz com que o número

de cenários cresça para um total de 9 (Cenários A, B, ..., I), formados pela composição da incerteza em VP_{pts} (3 possibilidades – Cenários A^{VP} , B^{VP} , C^{VP}) e da incerteza em A_{pkts} (3 possibilidades – Cenários A^A , B^A , C^A). Isto se deve à natureza estocástica dos parâmetros de saída do primeiro nível que são utilizados como dados de entrada no segundo nível, especificamente os parâmetros relacionados com a receita da CRPAAA ($RecA_s$, $RecE_s$, $RecM_s$). Desta forma, é possível afirmar que o segundo nível de análise do modelo hierárquico possui pelo menos o mesmo número de cenários que o primeiro nível de decisão.

A probabilidade de ocorrência do cenário A, C, G e I é de 6,3%, a probabilidade de ocorrência do cenário B, D, F e H é de 12,5% e probabilidade de ocorrência do cenário E foi adotada como sendo de 25%. Estes valores foram obtidos com a combinação das probabilidades que representam a ocorrência de cada cenário s para os parâmetros incertos VP_{pts} e A_{pkts} $[(0,25; 0,50; 0,25) \cdot (0,25; 0,50; 0,25) = (0,063; 0,125; 0,063; 0,125; 0,25; 0,125; 0,063; 0,125; 0,063)]$. Por exemplo, a probabilidade de ocorrência do cenário A^{VP} é de 0,25% e a probabilidade de ocorrência do cenário C^A é de 0,25%, o cenário combinado (A^{VP} , C^A) corresponde ao cenário C que possui probabilidade de 6,3% de ocorrer. Os valores de VP_{pts} foram calculados da mesma forma que a abordagem 2 do modelo PASUC/N1-M-VP e os valores de A_{pkts} foram calculados de acordo com um desvio percentual uniforme de -1% nos cenários A, D e G (cenários com variação negativa para a eficiência industrial) e +1% para os cenários C, F e I (cenários com variação positiva para a eficiência industrial). Nesta seção, considera-se que existe independência entre os parâmetros incertos VP_{pts} e A_{pkts} , assim como existe independência entre os cenários formados pela combinação desses dados.

Outro ponto que merece destaque é que a dificuldade de utilização da técnica de programação estocástica robusta para o parâmetro de eficiência global em ATR (seção anterior, PASUC/N1-M-EATR) pode ser suplantada com a análise da incerteza na matriz de rendimentos industriais do modelo PASUC/N2-M-A, dado que estes dois parâmetros possuem funções equivalentes em cada nível do modelo.

Na sequência desta seção e desta tese, utiliza-se um artifício para acelerar a obtenção dos resultados apresentados para o segundo nível de análise (modelo com variáveis binárias), aproveitando a estrutura hierárquica desta modelagem. Esse procedimento consiste em verificar quais produtos estão sendo contemplados pelas metas repassadas do modelo PASUC/N1 para o modelo PASUC/N2 e reformular a geração de parâmetros do modelo, considerando apenas os processos que contém estes produtos, de forma que o segundo nível tenha o menor número de variáveis binárias possíveis. Inclui-se também mais um produto que

seja considerado de boa margem de contribuição, de acordo com a análise dos resultados da variável de atendimento da demanda do primeiro nível de análise, agregando um pouco mais de flexibilidade a análise do segundo nível. Desta forma, tem-se um subconjunto de processos que contemplam a produção das metas repassadas pela CRPAAA, sem perda de generalidade, quando comparado ao modelo que contém todos os processos possíveis.

Sabendo que a quantidade de variáveis binárias do modelo é igual $K \cdot T$ (K processos e T períodos), percebe-se que a redução do número de processos propicia uma substancial diminuição do tamanho do modelo. Os resultados apresentados nessa seção foram obtidos com $K=24$ processos e $T=25$ semanas, chegando a um total de 600 variáveis binárias. Na abordagem que contempla todos os produtos e processos possíveis, utiliza-se $K=252$ processos e $T=25$ semanas, conseqüentemente, 6300 variáveis binárias.

A seguir são apresentados os resultados encontrados para o modelo PASUC/M enfocando os valores obtidos com algumas variáveis de segundo estágio do nível 1 e do nível 2, tais como: atendimento da demanda por parte da CRPAAA (D_{pts}), produção da USC por produto p , período t e cenário s (PU_{pts}), geração de energia (EG_{ts}) e saldo financeiro (S_{ts}); além da variável de primeiro estágio que define a meta de produção ($Meta_{pt}$) para o caso da USC (primeiro nível).

Os resultados da margem de contribuição da CRPAAA e atendimento da demanda do modelo PASUC/N1-M são os mesmos valores apresentados para o modelo PASUC/N1-M-VP/A2, dado que nesta seção está sendo utilizada a mesma abordagem e os mesmos dados da seção 7.1.1. Estes valores estão apresentados na Tabela 31 e Tabela 32, respectivamente. Nesta seção, são apresentados apenas os dados de atendimento da demanda de forma mais agregada, conforme Tabela 34.

Tabela 34. Tabela de atendimento da demanda por produto (t ou m³) – PASUC/N1-M

Produtos	Demanda mínima ($Dmin_{pt}$)	Demanda máxima ($Dmax_p$) [c]	Demanda atendida ($\sum_t D_{pts}$) [d]	Saldo demanda [c-d]	Atraso ($I_{p^*T^m}$)	Estoque inicial ($\sum_e I_{pe0}$)
Standard	3.000	53.500	3.000	50.500	0	2000
Superior	18.000	53.500	18.000	35.500	0	0
Especial	18.000	53.500	53.500	0	0	1000
Extra	75.000	80.000	80.000	0	0	0
Refinado	90.000	100.000	97.151	2.849	0	500
VHP	480.000	10.000.000	480.000	9.520.000	0	1000
VHP+	80.000	1.000.000	80.000	920.000	0	0
VHPe	1.500	20.000	1.500	18.500	0	0
Melaço	0	10.000	4.721	5.279	0	0
AEHC	96.000	155.000	155.000	0	0	5000
AEAC	116.000	180.000	180.000	0	0	5000
AEHren	4.800	5.000	4.800	200	0	0

É interessante comparar os resultados da Tabela 34 com os valores da Tabela 24 e da Tabela 43 (seção 5.2.1 e 0, respectivamente) para avaliar o atendimento total da demanda ($\sum_t D_{pts}$), coluna [d]. Nesta análise percebe-se que o modelo PASUC/N1-M obteve o mesmo resultado do modelo PASUC/N1 (Tabela 24), diferentemente do que é apresentado para o modelo PASUC/N1-B (Tabela 43), onde a demanda máxima de açúcar refinado foi atingida e a demanda máxima de AEAC não foi atingida. Este resultado mostra que as alterações ocorridas na variável de atendimento da demanda (D_{pts}), no caso do modelo PASUC/N1-M, são apenas alterações entre os períodos de planejamento. Também é importante destacar que não ocorreu falta (ou atraso) no último período do planejamento ($I_p^{-nT^n} = 0$).

Tabela 35. Resultado obtido para a meta de produção da USC (t ou m³) – PASUC/N1-M

Produtos	Meta de produção mensal da USC ($Meta_{pt}$)							Meta PASUC/N1-M total [e]	Prod. USC Real [f]	[(e-f)/f]
	set	out	nov	dez	Jan	fev	mar			
<i>Standard</i>								0		-
Superior								0		-
Especial	2443	11368	1500	9221	12000			36531	39868	-8,37%
Extra						6778		6778	14317	-52,7%
Refinado								0		-
VHP			18111	12904		17793	5625	54433	40725	33,7%
VHP+								0		-
VHPe								0		-
Melaço								0		-
AEHC	2415	6195	2610	1651	2096	2953	1349	19268	12268	57,1%
AEAC			3480	3540	3480			10500	16752	-37,3%
AEHren								0		-

A Tabela 35 apresenta a meta de produção mensal da USC ($Meta_{pt}$), assim como um comparativo entre a meta acumulada para toda a safra e a produção real da USC na safra 2007/2008. Conforme discutida anteriormente (seção 5.2), a meta de produção total da USC (coluna [e]) está sendo comparada com a produção real da USC na safra 2007/2008 (coluna [f]). Esta comparação é meramente ilustrativa, pelo fato de ocorrerem alterações normais no direcionamento do mix de produção no decorrer da safra. Estas modificações não foram incorporadas no modelo PASUC/N1-M, pois os dados utilizados referem-se aos dados de planejamento e projeção da produção executados em agosto de 2007, portanto, antes do término da safra que ocorreu em abril de 2008.

Os resultados da geração de energia estão apresentados na Figura 31, onde se percebe uma geração um pouco superior a 1.000.000 Mwh/semana para as primeiras semanas de safra (semana 1 a semana 9) e uma geração máxima de 1680 Mwh/semana na semana 18.

Este padrão de geração de energia elétrica também foi verificado nos resultados apresentados na Figura 19 (seção 5.2.1). Além disso, este padrão de geração de energia elétrica total foi obtido para todos os cenários do modelo PASUC/N2-M. As diferenças entre estes cenários só aparecem no valor da energia elétrica exportada (EE_{ts}), ainda assim com valores muito reduzidos.

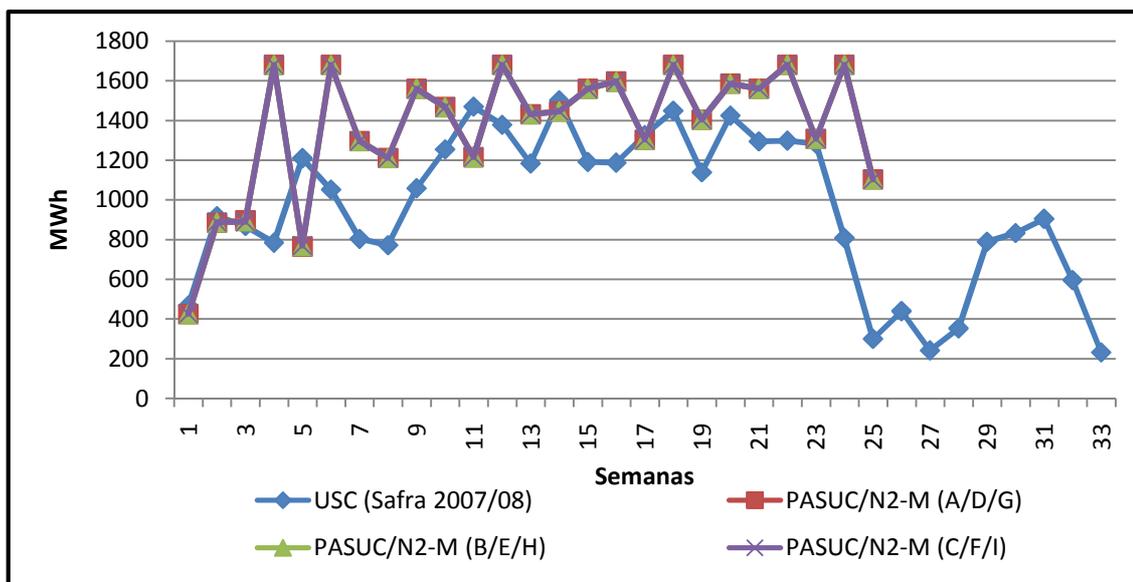


Figura 31. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2-M e a dados da safra 2007/2008

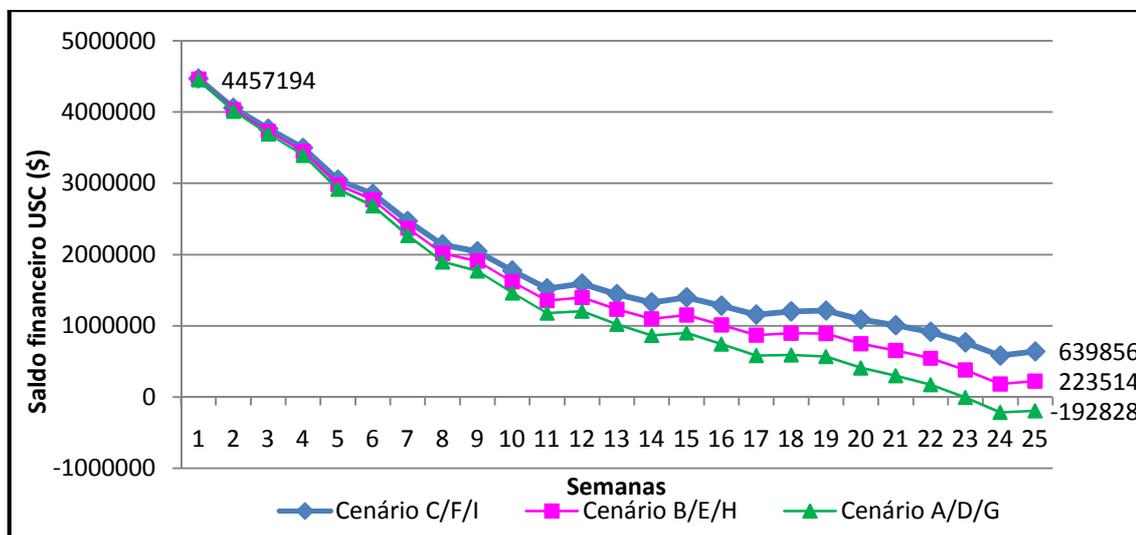


Figura 32. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2-M

A Figura 32 apresenta a projeção de saldo financeiro obtida para o modelo PASUC/N2-M. Analisando esta figura é possível dizer que cada conjunto de cenários apresenta um fluxo financeiro próprio. A explicação para esta situação é o impacto exercido pela incerteza no rendimento industrial, que gera uma redução na produção da USC e, conseqüentemente, modifica os repasses da CRPAAA. Considere também a Figura 21 (seção 5.2.1) e a Figura 39 (seção 7.2.3) para a comparação entre os resultados obtidos para a

variável de saldo financeiro dos modelos. Como discutido no capítulo 5, este resultado é interessante para embasar negociações com bancos para a obtenção de linhas de crédito de capital de giro, sendo possível verificar o impacto da incerteza envolvida no saldo financeiro da empresa. Além disso, também é possível utilizar os resultados da Figura 32 para negociar com a CRPAAA um melhor repasse financeiro (RCa_p , RCb , RCc_t), para que o risco de atingir um saldo negativo em algum momento da safra seja reduzido.

Para finalizar a análise do modelo PASUC-M, é possível apresentar duas tabelas que representam a comparação dos resultados globais (Tabela 36, Tabela 37 e Tabela 38), da mesma forma que a Tabela 28 (seção 5.2.1) e a Tabela 46 (seção 7.2.3).

É interessante notar na Tabela 36 que existe uma relação de proporcionalidade inversa entre a produção de açúcar e álcool e a quantidade de energia exportada. Isto se deve à necessidade de consumo de vapor e de energia elétrica para produzir esses produtos, fazendo com que a quantidade de energia disponível para exportação seja reduzida. Assim como destacado na seção 5.2.1, também é importante perceber a possibilidade de atraso no atendimento das metas repassadas pela cooperativa (I_{pt}^-) para o cenário apresentado neste estudo, conforme relação entre as colunas [a], [b], [c] e [d] da Tabela 36.

Tabela 36. Comparação dos resultados globais de produção e exportação de energia - PASUC-M

Resultados	Unid	Meta USC PASUC/N1 -M [a]	PASUC/N2 -M (A/D/G) [b]	PASUC/N2 -M (B/E/H) [c]	PASUC/N2 -M (C/F/I) [d]	PASUC/N2 [e]	Desvio relativo [(b-e)/e]
<i>Standard</i>	t						
Superior	t						
Especial	t	39.868	36.494	36.862	37.232	52.075	-29,9%
Extra	t	14.317	7.053	7.124	7.195		-
VHP	t	40.725	53.216	53.757	54.293	47.730	11,5%
VHP+	t						
VHPe	t						
AEAC	m ³	12.268	19.254	19.450	19.650	14.123	36,3%
AEHC	m ³	16.752	10.868	10.974	11.085	13.700	-20,7%
Melaço	t						
Energia Exp	MWh		13642	13599	13561	14.074	-3,1%

Os dados apresentados na Tabela 36 ilustram, primeiramente, a meta de produção repassada pelo modelo PASUC/N1-M para o modelo PASUC/N2-M (coluna [a]). Na sequência, são apresentados os resultados da produção total de cada produto em cada cenário (colunas [b], [c], [d]) e, na coluna [e], são apresentados os resultados do modelo determinístico PASUC/N2. Analisando esses dados é possível notar que todos os cenários do modelo de programação estocástica robusta consideram a produção do açúcar tipo Extra, fato

que não ocorreu no modelo PASUC/N2. Este resultado, juntamente com a verificação do desvio relativo entre os cenários A/D/G (menor valor para o parâmetro da matriz de rendimentos industriais) e o modelo determinístico, indicam que o mix sugerido pelo modelo determinístico não é necessariamente próximo dos resultados obtidos para o modelo de programação estocástica robusta.

Na Tabela 38 percebe-se que o segundo nível do modelo PASUC-M (PASUC/N2-M) apresenta um conjunto de resultados de margem de contribuição que estão variando entre 15,83 milhões e 22,02 milhões de unidades monetárias (coluna [g]). Estes resultados ajudam a entender o impacto da variação dos parâmetros considerados na análise, possibilitando um direcionamento mais ou menos conservador, dependendo do perfil de cada tomador de decisão. Os resultados apresentados na Tabela 37 são os mesmos resultados apresentados na Tabela 31, para o modelo PASUC/N1-M-VP/A2, dado que estas abordagens são idênticas para o primeiro nível de decisão. A Tabela 37 acrescenta apenas um comparativo deste resultado com o valor obtido no modelo determinístico, apresentado na seção 5.2.

Tabela 37. Comparação da margem de contribuição por cenário – PASUC/N1-M (mil \$)

Cenários	Receita CRPAAA			Margem CRPAAA		
	PASUC/N1-M [a]	PASUC/N1 [b]	Desvio relativo [(a-b)/b]	PASUC/N1-M [c]	PASUC/N1 [d]	Desvio relativo [(c-d)/d]
A/D/G	697.962.500	717.811.700	-2,77%	79.022.260	97.794.883	-19,20%
B/E/H	717.916.500		0,01%	97.740.687		-0,06%
C/F/I	741.156.500		3,25%	120.256.600		22,97%

Tabela 38. Comparação da margem de contribuição por cenário – PASUC/N2-M (mil \$)

Cenários	Receita USC			Margem USC		
	PASUC/N2-M [e]	PASUC/N2 [f]	Desvio relativo [(e-f)/f]	PASUC/N2-M [g]	PASUC/N2 [h]	Desvio relativo [(g-h)/h]
A	73.729.664	78.301.976	-5,84%	15.833.035	18.228.645	-13,14%
B	74.482.489		-4,88%	16.579.489		-9,05%
C	75.235.314		-3,92%	17.325.944		-4,95%
D	75.874.080		-3,10%	17.977.451		-1,38%
E	76.648.566		-2,11%	18.745.567		2,84%
F	77.423.051		-1,12%	19.513.682		7,05%
G	78.332.766		0,04%	20.436.137		12,11%
H	79.132.087		1,06%	21.229.087		16,46%
I	79.931.407		2,08%	22.022.038		20,81%

Outra característica dos modelos de programação estocástica robusta, que é realizada pela existência de vários cenários, é a necessidade de inferir a probabilidade de

ocorrência dos valores associados a cada parâmetro incerto. Esta característica é frequentemente criticada pelos trabalhos que tratam dos modelos de otimização robusta. Entretanto, outros autores consideram este item como um ponto positivo por ser possível incorporar as informações de probabilidade quando este dado está disponível (Beyer e Sendhoff, 2007). Nesta tese, entende-se como uma desvantagem dos modelos de programação estocástica robusta a necessidade de determinação da probabilidade de cada cenário, pois se considera complicado a obtenção deste dado de forma confiável para a maioria dos parâmetros incertos encontrados na prática. A seção 7.2 apresenta os resultados do modelo de otimização robusta Bertsimas-Sim e Bertsimas-Thiele para os mesmos casos apresentados nesta seção, de forma que seja possível verificar as principais diferenças na aplicação de cada técnica de análise de otimização sob incerteza.

O tempo computacional necessário para obter a solução do modelo PASUC/N2-M foi de 2521 segundos (~42 minutos). Vale lembrar que este tempo computacional foi obtido ao solucionar o modelo reduzido com 600 variáveis binárias, ao invés do modelo completo com 6300 variáveis binárias. Convém observar que o modelo completo não obtém resultados com *gaps* inferiores a 1,00% em um período de 2 horas.

7.2 Resultados do modelo de otimização robusta

7.2.1 Resultados do modelo de otimização robusta com incerteza nos preços dos produtos (PASUC/N1-B-VP)

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a utilização do modelo PASUC/N1-B-VP, apresentado na seção 6.3.1, com as mesmas abordagens de análise da incerteza no preço dos produtos finais que são apresentadas na seção 7.1.1. A primeira abordagem (PASUC/N1-B-VP/A1) considera desvios percentuais constantes entre os preços definidos para o modelo determinístico (valor nominal) e o desvio máximo da variável aleatória no modelo de otimização robusta. A segunda abordagem (PASUC/N1-B-VP/A2) considera um crescimento percentual do desvio máximo da variável aleatória. Conforme discutido anteriormente, o apelo prático que motivou a utilização destas duas abordagens foi a suposição de que a incerteza nos preços dos produtos é maior para períodos mais distantes e conseqüentemente, menor para os períodos mais próximos. Dado que o modelo proposto nesta tese é hierárquico, apresenta-se ao final desta seção uma análise sobre o impacto causado pela incerteza nos preços dos produtos (nível 1) no segundo nível de decisão.

A Figura 33 ilustra a diferença entre as abordagens mencionadas (PASUC/N1-B-VP/A1 e PASUC/N1-B-VP/A2). Os valores dos desvios utilizados para cada uma das

abordagens são os mesmos que foram descritos na seção 7.1.1 para o cenário A das duas abordagens (PASUC/N1-M-VP/A1 Cen.A, PASUC/N1-M-VP/A2 Cen.A), ou seja, o modelo de otimização robusta aqui descrito utiliza os mesmos desvios percentuais dos cenários pessimistas do modelo de programação estocástica robusta com incerteza no preço dos produtos.

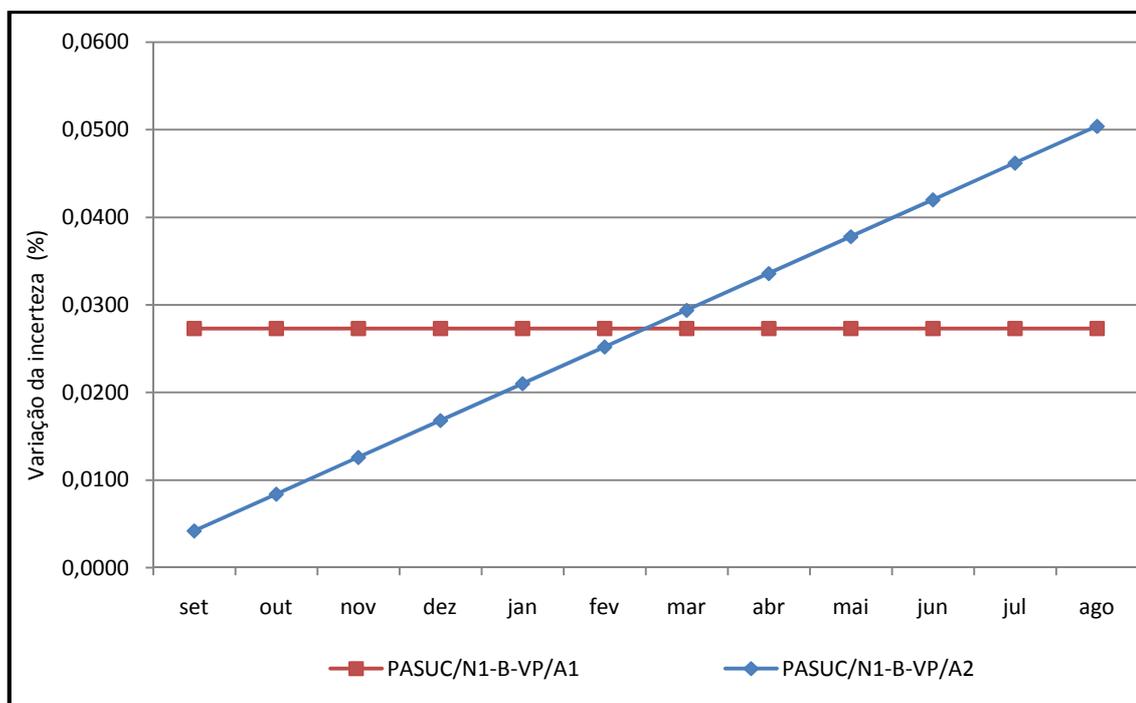


Figura 33. Percentual de incerteza em cada abordagem do modelo PASUC/N1-B-VP

Após a definição das duas abordagens utilizadas para analisar o impacto da incerteza no preço dos produtos, é possível apresentar os resultados obtidos para o modelo PASUC/N1-B-VP, conforme segue.

A análise feita nesta seção procura avaliar a deterioração da função objetivo do modelo ao se impor valores ao parâmetro Γ^{VP} (parâmetro de controle da robustez do modelo, seção 6.3.1). A variação do parâmetro Γ^{VP} inicia em zero e segue até o valor em que o aumento de Γ^{VP} deixa de impactar no resultado do modelo de otimização robusta. A seguir são apresentados os resultados obtidos para a margem de contribuição do modelo PASUC/N1-B-VP (Figura 34 e Figura 35) e do modelo PASUC/N2-B-VP (Figura 36) para cada uma das abordagens.

A Figura 34 apresenta a curva de deterioração da função objetivo para valores Γ^{VP} variando entre 0 e 80 e a Figura 35 apresenta os mesmos dados para valores de Γ^{VP} variando entre 0 e 10. Por meio destas duas figuras é possível verificar que a queda percentual da função objetivo é acentuada para valores baixos de Γ^{VP} . Ou seja, para uma pequena variação no parâmetro de controle da robustez do modelo, tem-se uma grande perda de

otimalidade. Este resultado indica que existem poucos produtos que representam uma grande parcela da receita das empresas. Por meio desta constatação, é possível dizer que é interessante determinar planos de produção menos dependentes de um único produto ou, caso isso não seja possível, trabalhar com mecanismos de proteção, tais como *hedging*, para reduzir o impacto da incerteza nos preços.

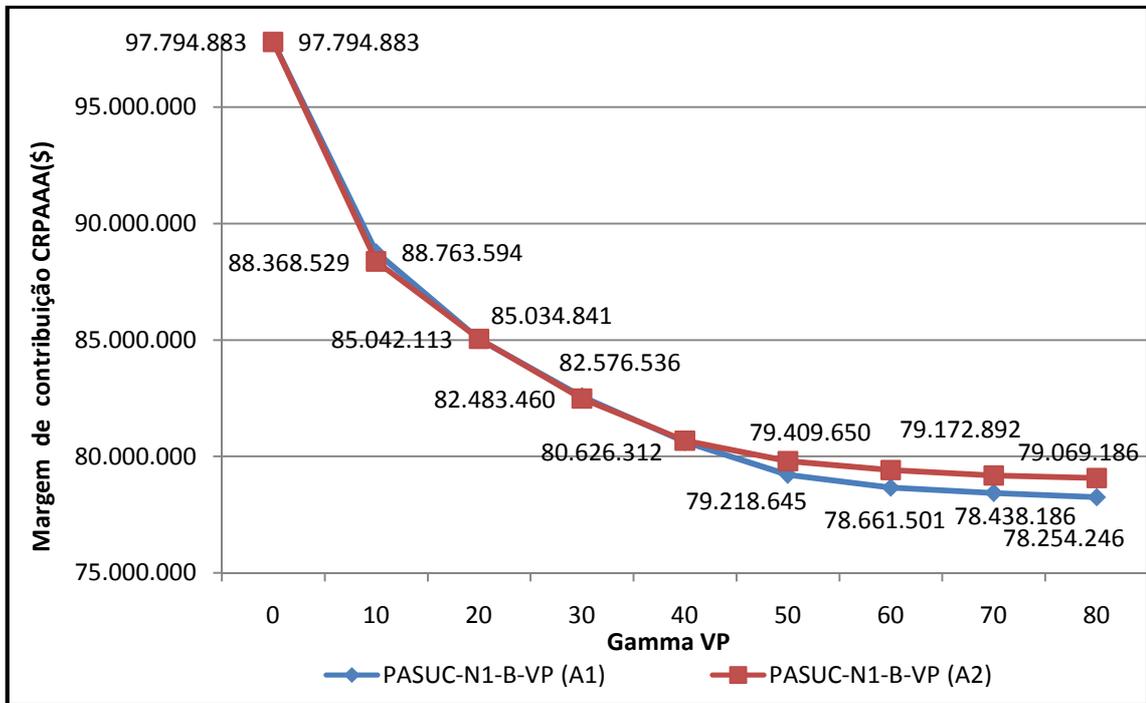


Figura 34. Impacto do grau de conservadorismo em PASUC/N1-B-VP/A1 e PASUC/N1-B-VP/A2

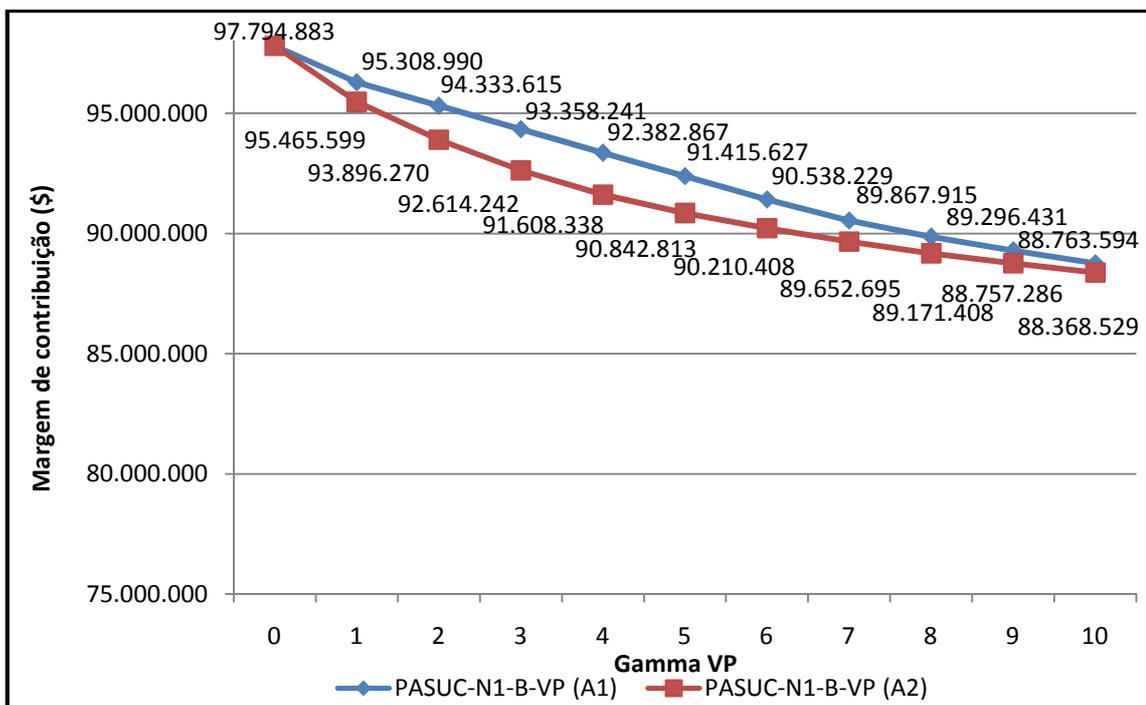


Figura 35. Impacto do grau de conservadorismo em PASUC/N1-B-VP/A1 e PASUC/N1-B-VP/A2 com Γ^{VP} pequeno

Além disso, percebe-se uma diferença entre as curvas de perda de otimalidade (Figura 34 e Figura 35) para as abordagens PASUC/N1-B-VP/A1 e PASUC/N1-B-VP/A2. Neste caso, considera-se que a solução apresentada para o modelo robusto da abordagem PASUC/N1-B-VP/A2 antecipa a ocorrência das incertezas dos períodos mais distantes e, conseqüentemente, propicia uma solução com dependência um pouco menor nos preços desses períodos, fazendo com que o valor de sua solução mais conservadora seja maior que a mesma situação da abordagem A1.

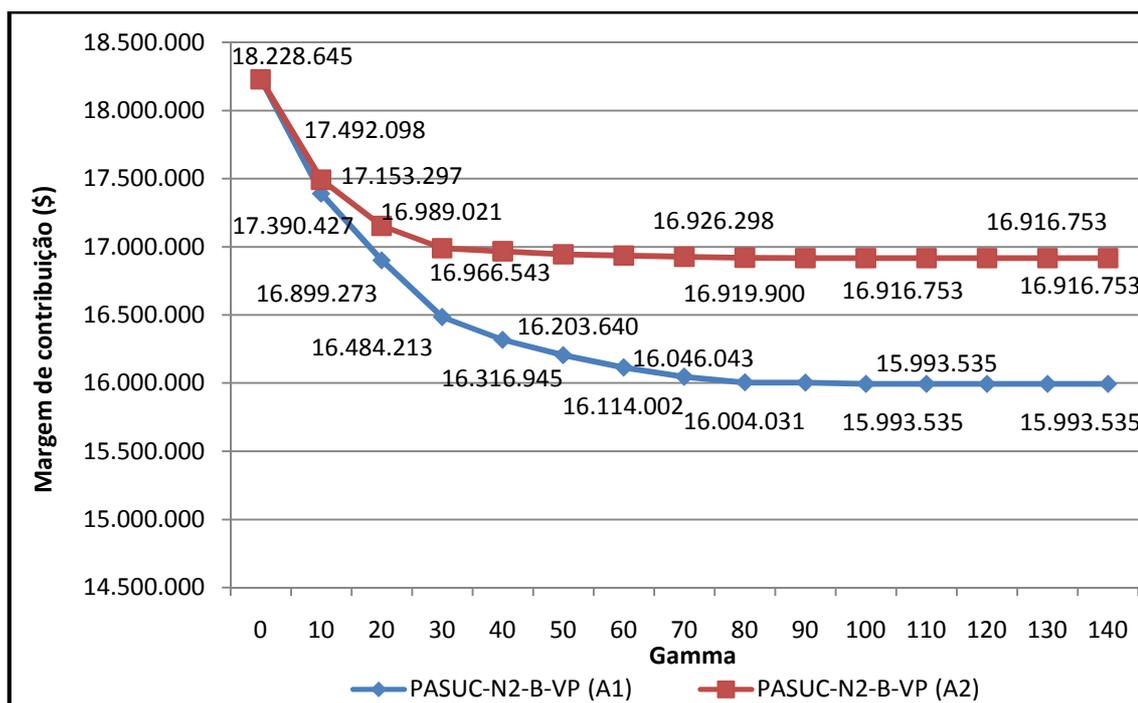


Figura 36. Impacto do grau de conservadorismo para PASUC/N2-B-VP/A1 e PASUC/N2-B-VP/A2

Tabela 39. Tempo computacional PASUC/N2-B-VP/A1 e PASUC/N2-B-VP/A2 (segundos)

Γ^{VP}	PASUC/N2-B-VP/A1	PASUC/N2-B-VP/A2
0	251	240
10	28	177
20	37	4.342
30	655	10.737
40	178	387
50	60	666
60	33	402
70	38	10.045
80	4.187	377
90	1.142	2.225
100	12.033	2.023

O tempo computacional para solucionar os problemas do modelo PASUC/N2-B-VP variaram bastante entre as instâncias analisadas (Tabela 39). Todas as soluções obtidas são comprovadamente ótimos globais do problema.

Após a obtenção destes resultados é interessante resgatar a discussão apresentada na seção 3.4.5, onde foi apresentada a formulação que possibilita inferir a probabilidade de violação das restrições para os casos em que a variável aleatória ultrapasse o espaço de incerteza considerado. Com a utilização desta ferramenta não é necessário rodar vários cenários com vários valores para o parâmetro Γ^{VP} . Desta forma, necessita-se apenas a determinação do valor mais apropriado para o parâmetro Γ^{VP} e, na sequência, uma única rodada do modelo de otimização robusta. Este artifício é utilizado nas próximas seções deste capítulo.

7.2.2 Resultados do modelo de otimização robusta com incerteza na eficiência global das usinas (PASUC/N1-B-EATR)

Durante a apresentação do modelo de otimização robusta que incorpora a incerteza no parâmetro de eficiência global de ATR de cada usina u em cada período t ($Eatr_{ut}$), seção 6.3.2, foi discutido a necessidade de adotar uma reformulação do modelo determinístico original por meio de um escalonamento da restrição (98), obtendo a restrição (249).

Esta nova restrição foi testada e validada no modelo determinístico, onde não ocorreram mudanças em comparação com os resultados do modelo original e em relação aos modelos de programação estocástica robusta. Entretanto, com a adoção do modelo de otimização robusta [equações (87)-(97), (99)-(100) e (253)-(254)], percebeu-se que o comportamento do modelo não correspondia com a expectativa inicial. Esta inconsistência foi percebida quando foi adotado o valor de Γ^{Eatr} igual a zero e o resultado obtido foi diferente do resultado do modelo determinístico original.

Após esta constatação, foram executados outros experimentos para verificar o motivo desta inconsistência e observou-se que a restrição (253) do modelo de otimização robusta funciona de forma equivalente a uma desigualdade, fazendo com que ocorra um desbalanceamento entre o primeiro termo da equação (ATR proveniente da cana) e o segundo termo da equação (ATR obtido nos produtos). Ou seja, a restrição (253), rerepresentada abaixo, funciona de forma equivalente a restrição (260) representada de forma ilustrativa nesta seção.

$$\sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot Eatr_{ut'}}{1000} - \sum_{t'=1}^t \rho_{ut't}^{Eatr} - \lambda_{ut}^{Eatr} \cdot \Gamma^{Eatr} = \sum_{t'=1}^t \sum_p PU_{put'} \cdot Patr_p \quad \forall (u, t) \in \tau^{Eatr} \quad (253)$$

Restrição equivalente para $\Gamma^{Eatr}=0$

$$\sum_{t'=1}^t \frac{M_{ut'} \cdot ATR_{ut'} \cdot Eatr_{ut'}}{1000} \geq \sum_{t'=1}^t \sum_p PU_{put'} \cdot Patr_p \quad \forall (u, t) \in \tau^{Eatr} \quad (260)$$

Isto se deve ao fato da variável de penalização do modelo de otimização robusta $\rho_{ut't}$ funcionar como uma variável de folga sem nenhuma penalização na função objetivo, além de se ter uma restrição escalonada no tempo. Para facilitar o entendimento desta questão, são apresentados dois resultados obtidos com o modelo de otimização robusta mencionado acima (Tabela 40 e Tabela 41). O desbalanceamento mencionado anteriormente pode ser percebido quando são comparados, por exemplo, os resultados de produção total da CRPAAA do mês de abril ($\sum_u PU_{pu"abril"} \geq 0$, Tabela 40), com os resultados de moagem total do mesmo mês ($M_{u"abril"} = 0$, Tabela 41). Estes resultados mostram que a modelagem possibilitou o aparecimento de um estoque de cana em processo para a produção de um produto no futuro e, na realidade prática do setor canavieiro, não existe a possibilidade da existência de estoques intermediários para a cana de açúcar para este nível de análise, pois se trata de um produto perecível, conforme discutido no capítulo 4.

Tabela 40. Produção mensal do modelo PASUC-B-EATR

Produtos	Produção mensal de toda a CRPAAA por produto ($\sum_u PU_{put}$)							
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr
<i>Standard</i>				330	670			
Superior	1500	1500	4264		10736			
Especial	500	1500	1500	9100	20300	19600		
Extra		4590	8986	14670	34373	17381		
Refinado	1391	10978	19372	19706	19372	18704	8016	
VHP		79000	92868	87132	100000	86899	28403	4698
VHP+			19913	54891	5197			
VHPe					1500			
Melaço							2350	885
AEHC	16216	35854	25930	19995	22804	18332	10860	9
AEAC	5000	10000	40248	41957	41112	29622	6603	459
AEHren				1100	2183	1517		

Tabela 41. Moagem mensal PASUC-B-EATR

Usinas	Moagem mensal por usina (M_{ut})							
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr
Capricho		92.640	111.166	113.083	111.166	107.333	104.612	
Paisa	50.833	146.624	144.181	146.624	141.737			
Port.Aleg.	38.812	98.610	105.608	107.429	105.608	101.966	101.966	
Port.Rico	54.194	295.285	300.149	305.324	300.149	144.900		
USC	71.635	183.760	222.333	226.166	214.191	174.416	57.500	
USM	76.666	164.607	172.308	175.279	172.308	118.833		
Seresta	95.593	163.874	176.967	209.203	209.203	145.159		
Sinimbú	88.192	254.437	250.124	258.749	250.124	198.374		
Sumaúma	25.827	140.875	169.125	172.499	169.624	163.874	28.175	
Triunfo	42.694	287.286	277.916	282.707	277.916	268.332	93.150	

O fato apresentado nesta seção invalida a utilização do modelo de otimização robusta para tratar a incerteza no parâmetro de eficiência global das usinas. Esta situação também propicia a discussão sobre a utilização de análise de incerteza em restrições que envolvem igualdades. Dentro desta discussão, pode-se afirmar que se deve evitar a incorporação de variáveis aleatórias em parâmetros de restrições de igualdade, para que o modelo não culmine em uma infactibilidade, conforme também apontado por outros autores (Bertsimas & Thiele, 2006; Ross, 2007).

7.2.3 Resultados do modelo de otimização robusta com incerteza na matriz de rendimentos industriais e no preço dos produtos (PASUC-B)

A dificuldade de utilização da técnica de otimização robusta no modelo PASUC/N1 para o parâmetro de eficiência global em ATR pode ser suplantada com a consideração da incerteza na matriz de rendimentos industriais do modelo PASUC/N2, conforme discutido na seção 7.1.3.

Nesta seção, são apresentados os resultados combinados da incorporação da incerteza no parâmetro de preço do produto (nível 1), discutido nas seções 6.3.1 e 7.2.1, e também na incerteza proveniente da matriz de rendimentos industriais (nível 2), apresentada na seção 6.3.3. No caso da incerteza em A_{pkt} (nível 2) existem duas abordagens apresentadas (PASUC/N2-B-A/A1 e PASUC/N2-B-A/A2), a primeira abordagem está baseada na proposta de Bertsimas e Sim (2003) e a segunda embasa-se na modelagem de Bertsimas e Thiele (2006). Conforme discutido anteriormente, o modelo PASUC/N2-B-A/A1 torna-se equivalente ao modelo de Soyster (1973) para valores de Γ^A maiores que 1 e, portanto, o modelo com maior potencial para incorporar a incerteza na matriz de rendimentos industriais é o modelo PASUC/N2-B-A/A2. Entretanto, testes computacionais executados para este segundo modelo não obtiveram resultados com *gap* inferiores a 2% em um período de 20 horas de tempo computacional. Levando em consideração as limitações das duas abordagens propostas optou-se pela apresentação dos resultados de modelo PASUC/N2-B-A1.

Antes de iniciar a apresentação dos resultados desta seção é importante destacar que foram selecionados valores de Γ^{VP} e Γ^A de acordo com probabilidade de violação das restrições do modelo, conforme descrito nas equações (75)-(77) (seção 3.4.5). Conforme considerações do parágrafo anterior, adotou-se $\Gamma^A=1$ para o modelo PASUC/N2-B-A1. Vale ressaltar que teste computacionais foram realizados com a utilização de outros valores de Γ^A e observou-se que não houve alteração nos resultados. No caso de Γ^{VP} , a Tabela 42 apresenta diversos valores do limitante da probabilidade de violação das restrições de modelo [limitante

aproximado; equações (75)-(77), seção 3.4.5], em função do conjunto de coeficientes que possuem incerteza (τ) e do valor do parâmetro de controle de robustez (Γ), considerando, por exemplo, $|\tau|$ igual a 7, 24, 144 e 600. Para a aplicação desta seção adotou-se $\Gamma^{VP}=20$ ($|\tau^{VP}| = |VP_{pt}| = 144$), de forma que se obtenha uma probabilidade de 5,67% para a violação de cada restrição que possui parâmetros incertos em sua modelagem inicial. A Figura 37 ilustra o comportamento do limitante da probabilidade de violação para diversos valores de τ e de Γ .

Os valores de $V\hat{P}_{pt}$ foram calculados segundo a abordagem 2 do modelo PASUC/N1-B-VP e os valores de \hat{A}_{pkt} foram calculados de acordo com um desvio percentual uniforme de 1%. Além disso, utilizou-se a estratégia de redução do número de variáveis binárias existentes no modelo (sem perda de generalidade), conforme discutido na seção 7.1.3. Considerando que a análise é hierárquica, esse procedimento consiste em verificar quais produtos estão sendo contemplados nas metas repassadas do modelo PASUC/N1 para o modelo PASUC/N2 e reformular a geração de parâmetros do modelo, considerando apenas os processos que contém estes produtos, de forma que o segundo nível tenha o menor número de variáveis binárias possíveis. Inclui-se também mais um produto que seja considerado de boa margem de contribuição, de acordo com a análise dos resultados da variável de atendimento da demanda do primeiro nível de análise. Desta forma, tem-se um subconjunto de processos ($K=24$) que contemplam a produção das metas repassadas pela CRPAAA, sem perda de generalidade, em comparação ao modelo que contém todos os processos possíveis ($K=252$).

Tabela 42. Tabela de limitantes de violação da restrição do modelo de otimização robusta

Total de incertezas ($ \tau $)	7	24	144	600
Γ	Limitante calculado [equação (77)]			
0	64,73%	58,09%	53,32%	51,63%
1	50,00%	50,00%	50,00%	50,00%
2	35,27%	41,91%	46,68%	48,37%
3	22,48%	34,15%	43,38%	46,75%
4	12,84%	27,01%	40,13%	45,13%
5	6,53%	20,71%	36,94%	43,51%
6	2,94%	15,37%	33,85%	41,91%
7	1,17%	11,03%	30,85%	40,32%
8		7,65%	27,98%	38,75%
9		5,12%	25,25%	37,20%
10		3,31%	22,66%	35,67%
20		0,01%	5,67%	27,01%
30			0,78%	24,38%
40			0,06%	5,57%
50			0,00%	2,27%
60				0,80%
80				0,06%
100				0,00%

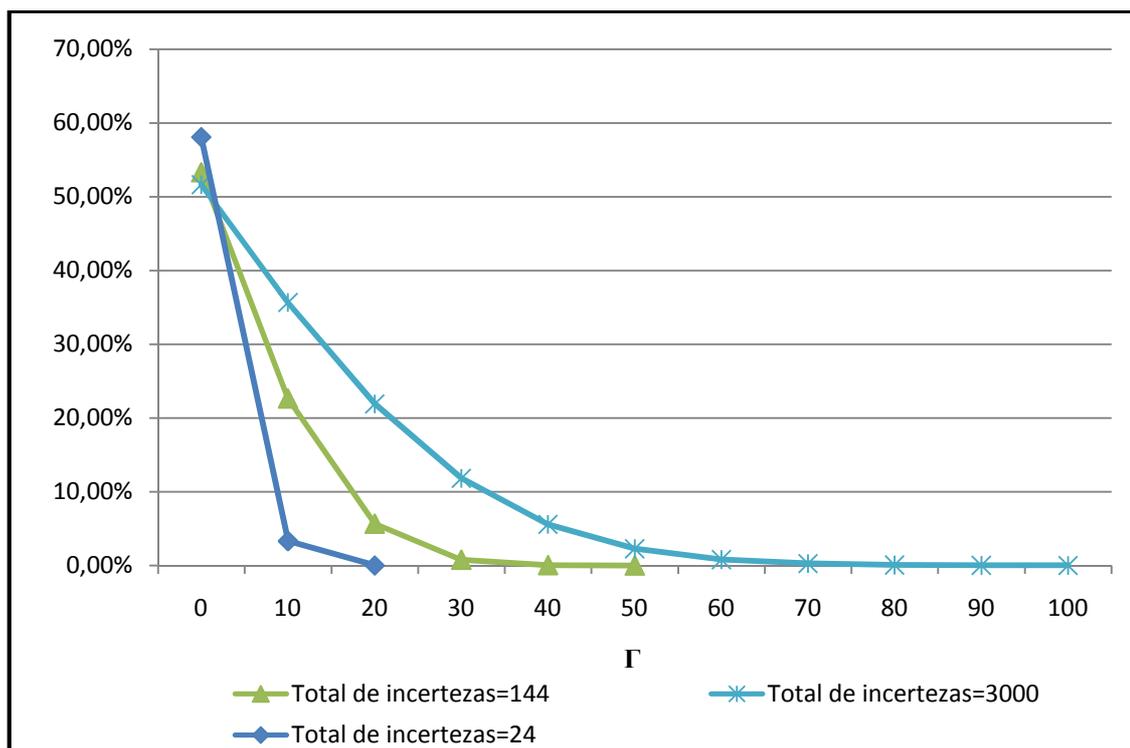


Figura 37. Limitante de violação da restrição Γ^{VP} e Γ^A

A seguir, são apresentados os dados de saída obtidos para o modelo PASUC-B (composição do modelo PASUC/N1-B-VP/A2 e PASUC/N2-B-A/A1), enfocando os resultados de atendimento da demanda (D_{pt}) por parte da CRPAAA e estabelecimento das metas de produção ($Meta_{pt}$) para o caso da USC (primeiro nível); além dos dados de produção (PU_{pt}), geração de energia (EG_t) e saldo financeiro (S_t) que se referem ao segundo nível.

Tabela 43. Tabela de atendimento da demanda por produto (t ou m^3) – PASUC/N1-B

Produtos	Demanda mínima ($Dmin_{pt}$)	Demanda máxima ($Dmax_p$) [c]	Demanda atendida ($\sum_t D_{pt}$) [d]	Saldo demanda [c-d]	Atraso (I_p^{-TT})	Estoque inicial ($\sum_e I_{pe0}$)
Standard	3.000	53.500	3.000	50.500	0	2000
Superior	18.000	53.500	18.000	35.500	0	0
Especial	18.000	53.500	53.500	0	0	1000
Extra	75.000	80.000	80.000	0	0	0
Refinado	90.000	100.000	100.000	0	0	500
VHP	480.000	10.000.000	480.000	9.520.000	0	1000
VHP+	80.000	1.000.000	80.000	920.000	0	0
VHPe	1.500	20.000	1.500	18.500	0	0
Melaço	0	10.000	4.721	5.279	0	0
AEHC	96.000	155.000	155.000	0	0	5000
AEAC	116.000	180.000	178.196	1.804	0	5000
AEHren	4.800	5.000	4.800	200	0	0

É interessante comparar os resultados da Tabela 43 com os resultados da Tabela 24 (seção 5.2.1) e da Tabela 34 (seção 7.1.3) para avaliar o impacto da incorporação da incerteza na variável de atendimento da demanda (D_{pt}). Nos resultados apresentados na

Tabela 24 e Tabela 34, a demanda máxima foi atingida (saldo demanda igual a zero) para os açúcares Especial, Extra e os alcoóis AEHC e AEAC, diferentemente do resultado apresentado na Tabela 43, onde a demanda máxima de açúcar refinado foi alcançada e a demanda máxima de AEAC não foi. Este resultado mostra uma diferença considerável na incorporação da robustez do modelo de programação estocástica robusta (seção 7.1.3) e do modelo de otimização robusta apresentado nesta seção, dificultando a comparação dos resultados encontrados para as variáveis de decisão das referidas técnicas.

Tabela 44. Resultado obtido para a meta de produção da USC (t ou m³) – PASUC/N1-B

Produtos	Meta de produção mensal da USC (<i>Meta_{pt}</i>)							Meta PASUC-B total [e]	Prod. USC Real [f]	[(e-f)/f]
	set	out	nov	dez	jan	fev	mar			
Standard								0		-
Superior								0		-
Especial		1500	1500	20417	15180	13402		51999	39868	30,6%
Extra					6569			6569	14317	-100%
Refinado								0		-
VHP	2450	9897	17596			7597	5625	43165	40725	5,7%
VHP+								0		-
VHPe								0		-
Melaço								0		-
AEHC	2415	6195	2398	2655	955	3626	1349	19593	12268	59,7%
AEAC			743	3540	3480			7763	16752	-116%
AEHren								0		-

A Tabela 44 apresenta a meta de produção mensal da USC (*Meta_{pt}*), assim como um comparativo entre a meta acumulada para toda a safra e a produção real da USC na safra 2007/2008. Conforme discutido anteriormente, esta comparação é apenas ilustrativa, pelo fato de ocorrerem alterações normais ao longo da safra no direcionamento do mix de produção, na quantidade de cana processada e em alguns parâmetros considerados neste processo de planejamento.

Os resultados do modelo PASUC/N2-B para a geração de energia estão apresentados na Figura 38, onde se percebe uma geração um pouco superior a 1.000.000 Mwh/semana para as primeiras semanas de safra (semana 1 a semana 9) e uma geração máxima de 1680 Mwh/semana na semana 18. Este padrão de geração de energia elétrica também foi verificado nos resultados apresentados na Figura 19 (seção 5.2.1).

Assim como discutido nas seções 5.2.1 e 7.1.3, outra possibilidade de análise proporcionada pelos modelos propostos nesta tese é a obtenção de uma projeção de saldo financeiro ao longo do tempo. A Figura 39 apresenta a projeção obtida para o modelo PASUC/N2-B. Analisando esta figura é possível inferir que, neste cenário, o repasse semanal da cooperativa não está sendo suficiente para cobrir as despesas correntes da USC. Desta

forma, percebe-se um decréscimo do saldo inicial até um valor ligeiramente negativo nas últimas semanas de safra. No caso da última semana de safra (semana 25) verifica-se que o valor do saldo financeiro projetado pelo modelo PASUC/N2 (Figura 21) é ligeiramente inferior ao projetado pelo modelo PASUC/N2-B (Figura 39). Esta constatação indica que a otimização da margem de contribuição do modelo não está diretamente ligada à maximização do saldo financeiro. Considere também a Tabela 46 e a Tabela 28 para a comparação da margem de contribuição dos modelos. Além disso, conforme mencionado nas seções 5.2.1 e 7.1.3, este resultado é interessante para embasar negociações com bancos para a obtenção de linhas de crédito de capital de giro e para negociar com a CRPAAA um melhor repasse financeiro (RCa_p , RCb , RCc_t).

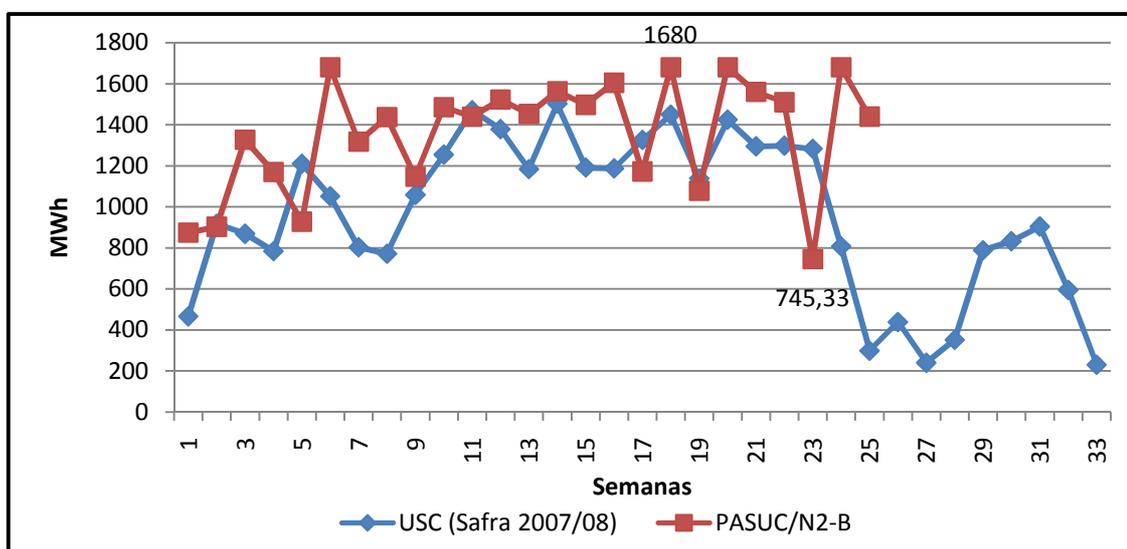


Figura 38. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2-B e a dados da safra 2007/2008

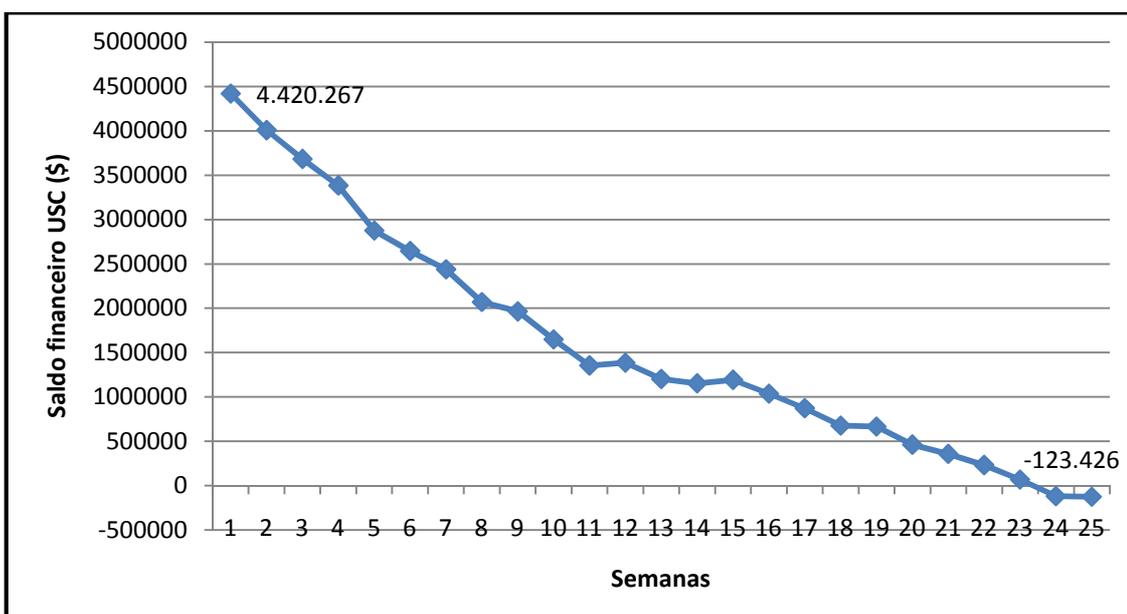


Figura 39. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2-B

Para finalizar a análise do modelo PASUC-B, são apresentadas duas tabelas de comparação dos resultados globais (Tabela 45 e Tabela 46). A Tabela 45 destaca os principais resultados do primeiro nível do modelo PASUC-B (PASUC/N1-B) e faz um comparativo com os resultados obtidos no modelo determinístico (PASUC/N1). De forma análoga à discussão dos resultados da seção 7.1.3, deve-se destacar que os resultados do modelo PASUC/N1-B são idênticos aos resultados do modelo PASUC/N1-B-VP/A2 (seção 7.2.1) com $\Gamma^{VP}=20$ (Figura 34) e, portanto, as considerações do item 7.2.1 também são válidas nesta seção.

Os resultados da Tabela 46 se referem ao segundo nível de decisão do modelo PASUC-B (PASUC/N2-B). Analisando nesta tabela o valor obtido para a margem de contribuição total da USC (função objetivo do modelo PASUC/N2-B), é possível afirmar que o modelo PASUC/N2-B obteve um resultado 12,69% inferior ao valor obtido pelo modelo PASUC/N2, demonstrando o grande impacto decorrente das incertezas no preço dos produtos (nível 1) e na matriz de rendimentos industriais (nível 2) para o planejamento da USC.

Tabela 45. Comparação dos resultados globais – PASUC/N1-B

Resultados	Unidade	PASUC/N1-B [b]	PASUC/N1 [c]	Desvio relativo [(b-c)/c]
Receita CRPAAA	\$	704.119.300	717.811.700	-1,91%
Margem CRPAAA	\$	85.042.113	97.794.883	-13,04%

Tabela 46. Comparação dos resultados globais – PASUC/N2-B

Resultados	Unidade	Meta USC PASUC/N1-B [a]	PASUC/N2-B [b]	PASUC/N2 [c]	Desvio relativo [(b-c)/c]	
Produção total	<i>Standard</i>	t				
	Superior	t				
	Especial	t	51.999	48.919	52.075	-6,06%
	Extra	t	6.569	3.715		
	VHP	t	43.165	48.927	47.730	2,51%
	VHP+	t				
	VHPe	t				
	AEAC	m ³	19.593	19.733	14.123	39,72%
	AEHC	m ³	7.763	6.993	13.700	-48,96%
	Melão	t				
Energia Exp.	MWh		13.677	14.074	-2,82%	
Receita USC	\$		73.866.318	78.301.976	-5,66%	
Margem USC	\$		15.915.232	18.228.645	-12,69%	

Tendo em vista que os modelos de otimização robusta adotam uma abordagem de pior caso, é interessante comparar os resultados da margem de contribuição do modelo PASUC-B (Tabela 45 e Tabela 46) com o resultado do cenário mais pessimista (Cenário A) do modelo PASUC-M (Tabela 37 e Tabela 38). Esta comparação indica que o modelo de

programação estocástica robusta apresenta valores ligeiramente inferiores aos resultados do modelo de otimização robusta para o caso da margem de contribuição do segundo nível de decisão (\$15.833.035 para o cenário A do modelo PASUC/N2-M e \$15.915.232 para o modelo PASUC/N2-B). Esta constatação não é observada para comparação da margem de contribuição do primeiro nível (\$79.022.260 para os cenários A/D/G do modelo PASUC/N1-M e \$85.042.113 para o modelo PASUC/N1-B). Desta forma, é possível afirmar que o fato do modelo PASUC/N2-B corresponder ao modelo de Soyster (1973) gera um impacto significativo na qualidade da solução do modelo apresentado nesta seção.

O tempo computacional necessário para obter a solução ótima do modelo PASUC/N2-B foi de 2314 segundos (~39 minutos). Vale lembrar que este tempo computacional foi obtido ao solucionar o modelo reduzido com apenas 600 variáveis binárias, ao invés do modelo completo com 6300 variáveis binárias. A título de curiosidade, o modelo completo não obteve resultados com *gaps* inferiores a 1,00% em um período de 2 horas. Na próxima seção são apresentadas outras considerações sobre o tempo computacional dos testes executados e sobre a utilização dos modelos.

7.3 Considerações sobre os testes executados

Nesta seção são apresentadas algumas considerações sobre a complexidade computacional de cada modelo abordado nesta tese (Tabela 47) e sobre a utilização prática dos mesmos. Analisando o tempo computacional necessário para obter a solução ótima em cada teste, o número de variáveis e o número de restrições de cada modelo (últimas linhas da Tabela 47), é possível afirmar que não foi verificada a suposição inicial de que o modelo de otimização robusta apresentaria menor tempo computacional em comparação ao modelo correspondente de programação estocástica robusta. Atribui-se este fato à escolha das variáveis de segundo estágio do modelo de programação estocástica robusta, que apenas acarretaram um acréscimo de restrições e variáveis lineares aos modelos PASUC/N1-M-VP/A2, PASUC/N2-M-VP/A2, PASUC/N1-M-EATR e PASUC/N2-M, fazendo com que a complexidade computacional destes modelos fosse mantida a mesma dos modelos PASUC/N1 e PASUC/N2. Provavelmente, esta situação não seria observada caso fosse necessário modelar a variável binária de seleção de processos (X_{kt}) do modelo PASUC/N2 como uma variável de segundo estágio. Também é importante destacar que em ambas as técnicas estudadas foi necessário adotar o artifício da redução do número variáveis binárias (discutido na seção 7.1.3) para que fossem obtidos resultados comprovadamente ótimos ($gap = 0\%$) em um tempo computacional aceitável para a utilização prática destes modelos.

Tabela 47. Resumo dos modelos analisados

Modelo	PASUC/N1	PASUC/N2	PASUC/N1-M- VP/A2	PASUC/N2-M- VP/A2	PASUC/N1-M- EATR	PASUC/N2-M	PASUC/N1-B- VP/A2	PASUC/N2-B- VP/A2	PASUC/N1-B- EATR	PASUC/N2-B
Fornecedores de cana (m)	01	02	01	02	01	02	01	02	01	02
Transportadores de cana (f)	-	02	-	02	-	02	-	02	-	02
Estoque (e)	08	-	08	-	08	-	08	-	08	-
Produtos (p)	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10
Processos industriais (k)	-	252	-	252	-	24	-	252	-	24
Períodos (t)	12	25	12	25	12	25	12	25	12	25
Usinas (u)	10	1	10	1	10	1	10	1	10	1
Número total de variáveis	3121	13176	6016	13938	6016	7253	4166	13176	4166	4901
Número de variáveis binárias	-	6300	-	6300	-	600	-	6300	-	600
Número de restrições	3875	7452	6845	8803	6845	7054	4811	7452	4811	4628
Tempo computacional	<1	12333	<1	4416	<1	2521	<1	2693 média	<1	2341

Analisando os resultados reportados nesta tese, também é possível verificar que os modelos de programação estocástica robusta e otimização robusta possibilitam a incorporação da incerteza inerente aos parâmetros de preço dos produtos VP_{pt} (seções 7.1.1 e 7.2.1) e rendimentos industriais A_{pkt} (seções 7.1.3 e 7.2.3). Entretanto, os mesmos resultados não foram obtidos com a utilização das referidas técnicas de modelagem para as incertezas nos parâmetros de tempo aproveitado de moagem φ_t (seções 6.2.4 e 6.3.4) e eficiência global de conversão de ATR das usinas $Eatr_{ut}$ (seções 7.1.2 e 7.2.2). A seguir, são apresentadas algumas considerações sobre a utilização destas técnicas, destacando as vantagens e as limitações percebidas ao longo deste estudo.

Vantagens do modelo de programação estocástica robusta

- I. Possibilita uma análise multiobjetivo considerando penalidades para a violação das restrições nos cenários considerados e a utilização de diferentes critérios de otimização, tais como: valor médio esperado; valor esperado para a combinação entre

média e variância das soluções de cada cenário; minimização do máximo arrependimento. O critério de valor médio utilizado nesta tese proporcionou resultados adequados para este estudo;

- II. Durante a análise dos parâmetros do modelo de programação estocástica robusta (seção 7.1.1), foi possível avaliar o *trade-off* entre a robustez do modelo e a robustez da solução (critérios da função multiobjetivo). Nesta tese, decidiu-se por priorizar a robustez do modelo em detrimento da robustez da solução, procurando gerar soluções factíveis em todos os cenários;
- III. Durante a análise da incerteza no preço dos produtos (seção 7.1.1), foi possível adotar diferentes padrões de comportamento da variável aleatória que representa a incerteza analisada, tornando flexível a incorporação de cenários com padrões totalmente independentes;
- IV. As variáveis de segundo estágio incorporam o ajuste das decisões tomadas ao longo do horizonte de planejamento de acordo com a realização dos parâmetros incertos, facilitando a análise de diferentes políticas para tratar as incertezas;
- V. Constatou-se um potencial de melhora no processo de tomada de decisão por meio desta técnicas de otimização, principalmente pela possibilidade de analisar conjuntamente vários cenários;

Limitações do modelo de programação estocástica robusta

- VI. Necessidade de indicar a probabilidade de ocorrência de cada cenário. Nesta tese, entende-se que este é um ponto negativo por ser complicada a determinação das probabilidades associadas aos parâmetros analisados. Outros autores consideram este item como um ponto positivo por ser possível incorporar as informações de probabilidade quando este dado está disponível. (Beyer e Sendhoff, 2007);
- VII. Limitação da utilização do modelo de programação estocástica robusta em parâmetros incertos pertencentes a restrições que contenham apenas variáveis de primeiro estágio em sua modelagem. Esta limitação foi percebida durante a análise da incerteza no parâmetro de eficiência global de conversão de ATR $Eatr_{ut}$ (seção 7.1.2) e no parâmetro de tempo aproveitado de moagem φ_t (seção 6.2.4), onde não foi possível utilizar uma variável de segundo estágio associada à restrição (182);
- VIII. Modelo pode crescer muito com o crescimento do número de cenários, além de ser muito dependente da definição das variáveis de segundo estágio;

Vantagens do modelo de otimização robusta

- IX. Não há necessidade de determinar as distribuições de probabilidade que representam as variáveis aleatórias. Outros autores consideram este item como ponto negativo por não ser possível incorporar as informações de probabilidade quando este dado está disponível (Beyer e Sendhoff, 2007);
- X. Possibilita inferir a probabilidade de violação das restrições para os casos em que a variável aleatória ultrapasse o espaço de incerteza considerado;
- XI. Por se tratar de uma abordagem de pior caso, não é necessário utilizar parâmetros de penalização para garantir a factibilidade do modelo;
- XII. Durante a análise da incerteza no preço dos produtos (seção 7.2.1), foi possível adotar diferentes padrões de comportamento do intervalo de incerteza analisado, tornando flexível a incorporação deste parâmetro do modelo;
- XIII. Possível exercer controle sobre o grau de conservadorismo da solução, agregando maior flexibilidade de análise e possibilitando a utilização do conceito de diagrama de Pareto Robusto (curva de deterioração da função objetivo para diferentes valores Γ), assim como apresentado na seção 7.2.1. Vale lembrar que este resultado não foi observado para o caso do modelo PASUC/N2-B-A/A1 e PASUC/N2-B-A/A2, devido às respectivas limitações (seção 7.2.3) ;

Limitações do modelo de otimização robusta

- XIV. Alta penalização da otimalidade da solução, principalmente quando o número de parâmetros incertos é pequeno. Resultados com perda de otimalidade pequena só foram alcançados com uma alta probabilidade de violação das restrições, ou seja, muito próximo do modelo determinístico ($\Gamma = 0$);
- XV. Limitação da aplicação da técnica de otimização robusta em parâmetros que possuem dependência entre seu índices. Por exemplo, foi necessário uma modificação da modelagem adotada para que a técnica pudesse ser utilizada para a incerteza proveniente da matriz de rendimentos industriais (seção 7.2.3);
- XVI. Limitação da utilização do modelo de otimização robusta em restrições de igualdade. Esta limitação foi percebida durante a análise da incerteza no parâmetro de eficiência global de conversão de ATR $Eatr_{ut}$ (seção 7.2.2). Dentro desta discussão, pode-se afirmar que se deve evitar a incorporação de variáveis aleatórias em parâmetros de restrições de igualdade, para que o modelo não se torne trivialmente infactível (Bertsimas & Thiele, 2006; Ross, 2007)
- XVII. Necessário a existência de um acúmulo de parâmetros incertos em uma mesma restrição para que o modelo possa controlar a utilização da função proteção e

selecionar os parâmetros que mais impactam na função objetivo do modelo. Esta limitação pode ser suplantada pela utilização do modelo de otimização robusta de Bertsimas-Thiele, entretanto, quando o parâmetro incerto é um recurso renovável (assim como φ_i , seção 6.3.4), a abordagem de Bertsimas-Thiele não pode ser aplicada. Uma alternativa para suplantar esta limitação em pesquisas futuras seria utilizar os modelos de otimização robusta integrados com restrições de chance, como pode ser verificado em Erdoğan e Iyengar (2006) e Chen *et al.* (2009), ou limitar a análise a um valor de Γ fracionário entre 0 e 1.

Por meio dos tópicos listados acima, é possível afirmar que ambos os modelos robustos proporcionam uma análise adequada, apesar de suas limitações, ficando a cargo do tomador de decisão a escolha da técnica que deve ser utilizada. Nesta tese, considera-se mais simples e direta a utilização prática do modelo de otimização robusta, além de ser necessário uma menor quantidade de informação para utilizar este tipo de modelo em situações práticas. Entretanto, os resultados obtidos com a utilização do modelo de programação estocástica robusta não apresentaram limitações para a incorporação da incerteza na matriz de rendimentos industriais (fato que não ocorreu para o modelo de otimização robusta) e, portanto, propiciaram uma melhor condição de análise para o tomador de decisão interessado nas questões relativas ao segundo nível do modelo hierárquico proposto.

8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

8.1 Considerações finais

Conforme apresentado ao longo deste texto, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e analisar a aplicação de um modelo de planejamento agregado de safra para usinas cooperadas do setor sucroenergético. Este modelo considera uma relação hierárquica entre o planejamento anual de produção e comercialização da cooperativa (PASUC/N1) e o planejamento tático de safra de uma das usinas cooperadas (PASUSC/N2). Além do modelo determinístico, também foram aplicadas técnicas de otimização robusta para permitir que extensões do modelo tratassem as incertezas inerentes ao processo decisório da cooperativa e das usinas.

Ao longo desta tese, apresentou-se resumidamente a situação da agroindústria canavieira no Brasil, descreveu-se de forma generalista o processo de produção adotado por grande parte das unidades brasileiras para a produção de açúcar, álcool, e energia elétrica, apontou-se características gerais do planejamento agregado de safra no setor sucroenergético e apresentou-se algumas especificidades das organizações que participaram do estudo de caso. Também foi feita uma breve revisão teórica sobre planejamento agregado e sobre os modelos de PL e PIM utilizados para o planejamento da produção em múltiplos períodos e múltiplos produtos, além de uma revisão sobre as técnicas de otimização sob incerteza, tais como, programação estocástica, programação estocástica robusta, restrições de chance e otimização robusta.

Finalmente, discutiu-se o processo de coleta de dados desenvolvido no estudo de caso (safra 2007/2008) e analisou-se os resultados computacionais encontrados na aplicação do modelo PASUC. Esta análise incluiu também os resultados do modelo de otimização robusta e de programação estocástica robusta com a incorporação da incerteza no preço dos produtos, na eficiência global de ATR e na matriz de rendimentos industriais.

Com base nestes resultados, concluiu-se que o modelo determinístico proposto para o planejamento agregado de safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético tem potencial para apoiar decisões nas organizações escolhidas para o estudo de caso. As expectativas quanto à aderência do conceito de planejamento adotado pelas organizações estudadas, tempo computacional e melhoria nos resultados do planejamento foram atingidas.

Também ficou claro que este modelo abre uma nova perspectiva para a relação existente entre a cooperativa e suas cooperadas, tornando possível para as usinas um rápido questionamento das decisões de alocação de metas de produção estabelecida pela cooperativa

e fazendo com que o acompanhamento, a reavaliação e a cobrança do plano de safra estabelecido possam ser efetuados com maior velocidade por parte da cooperativa. Além disso, sinergias podem ser atingidas com a adoção de uma estratégia de safra que incorpora de forma integrada as questões de produção, logística e comercialização dos produtos.

Na prática, é interessante utilizar o modelo PASUC/N1 para efetuar uma análise em planejamento rolante, com periodicidade semanal ou quinzenal, rodando novamente o modelo após as atualizações de dados de entrada decorrentes de acontecimentos dos períodos anteriores. Os resultados obtidos com o modelo PASUC/N1 seriam repassados às usinas para que fossem atualizados os modelos PASUC/N2 de cada unidade e para que o plano de safra fosse reestudado. Este processo iterativo continuaria até que o plano de safra convergisse para uma solução factível e de boa qualidade para ambas as partes.

No caso das extensões do modelo PASUC para incorporar e analisar o impacto da incerteza, foi possível verificar que a programação estocástica robusta e otimização robusta possibilitaram a incorporação da incerteza inerente aos parâmetros de preço dos produtos e rendimentos industriais. Entretanto, os mesmos resultados não foram obtidos com a utilização das referidas técnicas para as incertezas nos parâmetros de tempo aproveitado de moagem e eficiência global de conversão de ATR das usinas.

Com os resultados obtidos é possível afirmar que ambos os modelos robustos proporcionam uma análise adequada, apesar de suas limitações, ficando a cargo do tomador de decisão a escolha da técnica que deve ser utilizada. Nesta tese, considera-se mais simples e direta a utilização prática do modelo de otimização robusta, além de ser necessário uma menor quantidade de informação para utilizar este tipo de modelo em situações práticas. Entretanto, os resultados obtidos com a utilização do modelo de programação estocástica robusta não apresentaram limitações para a incorporação da incerteza na matriz de rendimentos industriais (fato que não ocorreu para o modelo de otimização robusta) e, portanto, propiciaram uma melhor condição de análise para o tomador de decisão interessado nas questões relativas ao segundo nível do modelo hierárquico proposto. Também é importante destacar que o tempo computacional obtido para ambas as técnicas estudadas foi aceitável, apesar de ter sido necessário adotar (sem perda de generalidade) o artifício da redução do número de variáveis binárias, para que fossem atingidos resultados comprovadamente ótimos para este modelo de PIM.

8.2 Perspectivas para pesquisa futura

Os resultados encontrados neste estudo são promissores e encorajam pesquisas futuras no sentido de melhorar o desempenho dos modelos propostos e ampliar o poder de análise propiciado por estas técnicas de otimização. A seguir, apresenta-se 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 e ampliar o escopo de aplicação.

- I. No âmbito da modelagem determinística seria interessante avaliar de forma mais ampla a cogeração de energia elétrica, incorporando a utilização de pontas e palhas, que atualmente são queimadas ou deixadas no canavial. Este estudo poderia contemplar também os vários usos para a biomassa da cana-de-açúcar (bagaço, pontas e palhas), por exemplo, a hidrólise do bagaço para a produção de álcool combustível ou a gaseificação deste material para melhorar o rendimento de todo o sistema de cogeração;
- II. No sistema de cogeração é interessante adaptar o modelo proposto para as condições de balanço térmico de outras usinas, de forma que seja possível validar o modelo em condições de geração de energia elétrica com turbinas de condensação;
- III. Outra possibilidade de pesquisa é a integração entre o modelo proposto nesta tese e outros modelos existentes na literatura, principalmente os que adotam o mesmo horizonte de planejamento e tratam de decisões da área agrícola (por exemplo, decisões de colheita) e da área de CCT (por exemplo, logística de frentes de colheita);
- IV. Também seria interessante considerar o custo de *setup* dos processos no modelo de seleção de processos PASUC/N₂, mas ainda mantendo o tempo de *setup* fora da análise conforme argumentação prévia.

Além dos itens relacionadas à modelagem determinística do setor sucroenergético, são apresentadas algumas sugestões que se referem à análise e ampliação da utilização dos modelos de otimização sob incerteza.

- V. Nesta tese não foi possível a consideração da incerteza no tempo aproveitado de moagem e na matriz de rendimentos globais em ATR. Uma perspectiva para pesquisa futura seria a utilização da técnica de restrição de chance robusta (*robust chance constraint*), para viabilizar a análise destas incertezas, por meio de metodologias correlacionadas. Outra possibilidade seria limitar a análise a um valor de Γ fracionário entre 0 e 1;

- VI. Utilizar no modelo de programação estocástica robusta outros critérios de otimalidade, tais como a função média/variância ou o critério de maximização do mínimo arrependimento;
- VII. Analisar o comportamento dos modelos de otimização robusta (principalmente o modelo PASUC-M e o modelo PASUC-B/A2) em termos de desempenho de solução, buscando aceleração da solução dos modelos apresentados por meio de heurísticas baseadas em pacotes de otimização e outros estudos relacionados ao desempenho computacional destas aplicações;
- VIII. Incorporar incerteza em outros parâmetros dos modelos apresentados nesta tese como, por exemplo, os custos envolvidos tanto no primeiro nível de decisão quanto no nível segundo;

Além disso, é interessante destacar a necessidade de ampliar as análises executadas nesta tese, fazendo o processo de validação deste modelo em outras empresas, para verificar mais aprofundadamente a aplicação prática deste tipo de modelo, conforme segue.

- IX. Utilização da metodologia de pesquisa participativa para analisar as vantagens e desvantagens da utilização do modelo proposto;
- X. 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.

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 chrysolite. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.46, n.4, p.751-757, 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.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. & YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Campus-Elsevier, 2007, 523 p.
- 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.
- BEALE, E. M. L. On minimizing convex function subject to linear inequalities. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B**. n.17, p.173–184, 1955.
- BELIK, W. & VIAN, C. E. de F. **Desregulamentação estatal e novas estratégias competitivas da agroindústria canvieira em São Paulo**. In: MORAES, M. A. F. D. de & SHIKIDA, P. F. A. (Organizadores): *Agroindústria canvieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.
- BEN-TAL, A. & NEMIROVSKI, A. Robust convex optimization. **Mathematics of Operations Research**. v.23, n.4, p.769-805, 1998.
- BEN-TAL, A. & NEMIROVSKI, A. Robust solutions of uncertain linear programs. **Operations Research Letters**. v.25, n.1, p.1-13, 1999.
- BEN-TAL, A. & NEMIROVSKI, A. Robust solutions of Linear Programming problems contaminated with uncertain data. **Mathematical Programming**. v.88, n.3, p.411-424, 2000.
- 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, 2003.

- BERTSIMAS, D. & SIM, M. The price of robustness. **Operations Research**, v.52, n.1, p.35-53, 2004.
- BERTSIMAS, D.; PACHAMANOVA, D. & SIM, M. Robust linear optimization under general norms. **Operations Research Letters**, v.32, n.6, p.510-516, 2004.
- BERTSIMAS, D. & THIELE, A. A robust optimization approach to inventory theory. **Operations Research**, v.54, n.1, p. 150-168, 2006.
- BEYER, H. & SENDHOFF, B. Robust optimization – A comprehensive survey. **Computer Methods Applied to Mechanical Engineering**. v.196, p.3190-3218, 2007.
- BIRGE, J. R. & LOUVEAUX, F. **Introduction to Stochastic Programming**. New York: Springer, 1997.
- BOUZA, C. Stochastic programming: the state of the art. **Investigación Operacional**. v.14, n.2, 1993.
- BRUNSTEIN, I. & TOMIYA, E. H. Modelo econômico de empresa sucroalcooleira. **Gestão & Produção**, v.2, n.3, p.264-280, 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.
- CHARNES, A. & COOPER, W. W. Chance-constrained programming. **Management Science**. v.6, n.1, 1959.
- CHEN, W.; SIM, M.; SUN, J.; TEO, C.; From CVaR to Uncertainty Set: Implications in Joint Chance Constrained Optimization. **Operations Research**, aceito para publicação, 2009.
- 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.
- COLIN, E. C.; CIPPARRONE, F. A. M. & SHIMIZU, T. Otimização do custo de transporte na distribuição-armazenagem de açúcar. **Produção**, v.9, n.1, p.23-30, 1999.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da Safra Brasileira Cana-de-açúcar, safra 2008 – primeiro levantamento**. Brasília: Conab, 2008.
- 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: <www.sindicucar-al.com.br>. Acesso em: 16 de agosto de 2008a.
- CONSECANA-AL (Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Álcool de Alagoas). **Relatório de preço de produtos finais e formação de preços do ATR**. Disponível em: <<http://www.sindicucar-al.com.br/www/consecana.htm>>. Acesso em 10 maio e 2008b.
- 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.
- DANTZIG, G. Linear programming under uncertainty. **Management Science**, v.1, n.3, p.197–206, 1955.
- DIWEKAR, U. Optimization under uncertainty. **SIAG/OPT Views-and-News**, v.13, n.1, p.1-8, 2002.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling – survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v.99, n.2, p.221-235, 1997.
- EL-GHAOUI, L. & LEBRET, H. Robust solutions to least-square problems to uncertain data matrices. **SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications**, v.18, p.1035-1064, 1997.
- EL-GHAOUI, L., OUSTRY, F. & LEBRET, H. Robust solutions to uncertain semidefinite programs. **SIAM Journal on Optimization**, v.9, p.33-52, 1998.
- CONSECANA-AL (Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Alcool 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: <www.sindicucar-al.com.br>. Acesso em: 16 de agosto de 2008a.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias). **Agência de Informações Embrapa – Cana de açúcar (Preparo do Solo)**. Disponível em: <www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 15 de janeiro de 2009a.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias). **Agência de Informações Embrapa – Cana de açúcar (Rotação e reforma)**. Disponível em: <www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 15 de janeiro de 2009b.
- ERDOĞAN, E. & IYENGAR, G. Ambiguous chance constrained problems and robust optimization. **Mathematical Programming Series B**, v.107, p.37-61, 2006.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. Piracicaba: EME:STAB, 2003.
- FERREIRA, D. Abordagens para o problema integrado de dimensionamento e seqüenciamento de lotes da produção de bebidas. São Carlos, 2006. 247 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R. & RANGEL, S. Um modelo de otimização inteira mista e heurísticas relax and fix para a programação da produção de fábricas de refrigerantes de pequeno porte. **Produção**, v.18, n.1, p.76-88, 2008.
- FERREIRA, D.; MORABITO, R. & RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem, **European Journal of Operational Research**, v.169, p.697-706, 2009.
- GOLDBARG, M. C. & LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória 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, 2005.

- HIGLE, J. L. & SEN, S. Stochastic decomposition: An algorithm for two-stage linear programs with recourse. **Mathematics of Operations Research**, v.16, n.3, p.650-669, 1991.
- 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**. 6^a 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. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção**, v.9, n.2, p.107-128, 2002.
- 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.
- 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, 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, 2003.
- KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P. & YOSHIZAKI, H. Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry: a case study. **International Transactions in Operational Research**, v.13, n.5, p.425-439, 2006.
- KHOR, C. S.; ELKAMEL, A.; PONNAMBALAM, K. & DOULGAS, P. L. Two-stage stochastic programming with fixed recourse via scenario planning with economic and operational risk management for petroleum refinery planning under uncertainty. **Chemical Engineering and Processing**, v.47, p.1744-1764, 2008.
- 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, 1999.
- LIMA, J. P. L. & SICSÚ, A. B. Revisando o setor sucroalcooleiro do nordeste: O novo contexto e a reestruturação possível. **Estudos Infosuco**, 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, 2005.

LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R. & PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, aceito para publicação, 2008.

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.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) **Acompanhamento da Produção Sucroalcooleira**. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/portal/page_pageid=33,96992_9&_dad=portal&_schema=PORTAL>. Acesso em: 1 de agosto de 2008a.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) **Balanco Nacional da Cana-de-açúcar e Agroenergia - 2007**. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/portal/page_pageid=33,96992_9&_dad=portal&_schema=PORTAL>. Acesso em: 1 de agosto de 2008b.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) **Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia**. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/portal/page_pageid=33,96992_9&_dad=portal&_schema=PORTAL>. Acesso em: 1 de agosto de 2008c.

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

MATURANA, S.; ORDÓÑEZ, F.; PEREZ, A. & VERA, J. Robust optimization: A case in forest operations planning. Working paper. 2008.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior) **Exportações Anuais de Açúcar**. Disponível em <<http://alicesweb.desenvolvimento.gov.br>>. Acesso em: 1 de agosto de 2008a.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior) **Exportações Mensais de Alcool**. Disponível em <<http://alicesweb.desenvolvimento.gov.br>>. Acesso em: 1 de agosto de 2008b.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior) **Alcool combustível**. Disponível em <<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=999>>. Acesso em: 1 de agosto de 2008c.

MDIC (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior) **Destino das exportações brasileiras de álcool etílico**. Disponível em <<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=999>>. Acesso em: 10 de agosto de 2008d.

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**, v.174, n.1, p.374-386, 2006.
- 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.
- MULVEY, J. M., VANDERBEI, R. J. & ZENIOS, S. A. Robust optimization of large-scale systems. **Operations Research**. v.43, n.2, p.264-281, 1995.
- 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, 2001a.
- MUNHOZ, J. R. & MORABITO, R. A goal programming model for frozen concentrated orange juice production and distribution system. **Opsearch**, v.38, n.6, p.630-646, 2001b.
- NAHMIA, S. **Production and operations analysis**. Hoewood: Irwin, 1995.
- NATARAJAN, K.; PACHAMANOVA, D. & SIM, M. Incorporating Asymmetric Distributional Information in Robust Value-at-Risk Optimization. **Working paper**. 2008.
- PAIVA, R. P. O. Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. São Carlos, 2006. 184 p. **Dissertação de Mestrado** (Mestrado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.
- PAIVA, R. P. O. & MORABITO, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. **Gestão & Produção**, v.14, n.1, p.25-41, 2007.
- PAIVA, R. P. O. & MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. **Annals of Operations Research**, DOI 10.1007/s10479-008-0428-9, 2008.
- PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel:STAB, 1989.
- PRÉKOPA, A. **Stochastic programming**. Dordrecht. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- PROCANA. **Dados Estatísticos – Números do setor (Safrá 2006/07)**. Disponível em: < <http://www.jornalcana.com.br> >. Acesso em: 15 de agosto de 2008.
- QUARANTA, A. G. & ZAFFANORI, A. Robust optimization of conditional value at risk and portfolio selection. **Journal of Banking & Finance**, v. 32, n.10, p.2046-2056, 2008.
- 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.

- ROSS (Robust Optimization Summer School) **Lechtures notes**. Agosto, 2007
- SAHINIDIS, N. V. Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. **Computers and Chemical Engineering**, v.28, n.6-7, p.971-983, 2004.
- 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) **Balança Comercial Brasileira – Dados Consolidados**. Disponível em: < <http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=5&menu=571>>. Acesso em: 1 de agosto de 2008.
- SEN, S.; HINGLE, J. L. An introductory tutorial on stochastic linear programming models. **Interfaces**, v.29, n.2, p.33-61, 1999.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim quinzenal – safra 2007/2008 (Açúcar)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em: 10 maio de 2008a.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim quinzenal – safra 2007/2008 (Alcool)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em 10 maio de 2008b.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim quinzenal – safra 2007/2008 (Cana)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em 10 maio de 2008c.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim quinzenal – safra 2007/2008 (Melaço)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em 10 maio de 2008d.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim quinzenal – safra 2007/2008 (ATR)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em 10 maio de 2008e.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim Semanal – safra 2007/2008 (Açúcar)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em 10 maio de 2008f.
- SINDAÇÚCAR-AL (Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Alagoas). **Boletim Semanal – safra 2007/2008 (Alcool)**. Disponível em: <http://www.sindicucar-al.com.br/www/bq2007_08.html>. Acesso em 10 maio de 2008g.
- SIPPER, D. & BULFIN Jr., R. L. **Production: Planning, Control, and Integration**. New York: McGraw-Hill, 1998.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S. & JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2ª Ed. São Paulo: Atlas, 2002
- SOX, C. R. & MUCKSTADT, J. A. Multi-item, multi-period production planning with uncertain demand. **IIE Transactions**. v.28, n.11, p. 891-900, 1996.
- SOX, C. R. & MUCKSTADT, J. A. Optimization-based planning for the stochastic lot-scheduling problem. **IIE Transactions**. v.29, n.5, p.349-357, 1997.
- SOYSTER, A. L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. **Operations Research**. v.21, n.1, p.1154-1157, 1973.

- 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.
- TAKRITI, S. & AHMED, S. On robust optimization of two-stage systems. *Mathematical Programming – Ser.A*, v.99, p.109-126, 2004.
- TOSO, E. A. V. Dimensionamento e Seqüenciamento de Lotes de Produção na Indústria de Suplementos para Nutrição Animal. São Carlos, 2008. 191 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Produção) – DEP/UFSCar.
- TOSO, E. A. V. & MORABITO, R. Otimização no dimensionamento e seqüenciamento de lotes de produção: Estudo de caso numa fábrica de rações. **Gestão & Produção**, v.12, n.2, 2005.
- TOSO, E. A. V.; MORABITO, R. & CLARK, A. R. Combinação de abordagens GLSP e ATSP para o Problema de Dimensionamento e Seqüenciamento de Lotes de Produção de Suplementos para Nutrição Animal. **Pesquisa Operacional**, v.28, p.423-450, 2008.
- UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo) **Bioeletricidade: Realidade & Perspectivas**. Apresentação institucional - Forum Cogen-SP 22 de julho de 2008. Disponível em: < <http://www.cogensp.com.br/cogensp/>>. Acesso em: 20 de agosto 2008.
- VIAN, C. E. de F. **Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização**. Campinas: Átomo, 2003.
- VLADIMIROU, H. & ZENIOS, S. A. Stochastic linear programs with recourse. **European Journal of Operational Research**. v.101, n.1, p.177-192, 1997.
- 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, 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.

XAVIER, C. E. O. Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil: aplicação de um modelo matemático de otimização. Piracicaba, 2008. 175 p. **Dissertação** (Mestrado) – ESALQ/USP.

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.

YAMASHITA, D. S.; ARMENTANO, V. A. & LAGUNA, M. Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost. **Journal of Scheduling**, v.10., n.1, p.67-76, 2007.

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.

YU, C. & LI, H. A robust optimization model for stochastic logistic problems. **International Journal of Production Economics**, v.64, p.385-397, 2000.

GLOSSÁRIO

A terminologia adotada no decorrer desta tese está baseada nos termos comumente utilizados no setor sucroenergético, 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.

Cogeração de energia: Produção simultânea de energia térmica e energia elétrica a partir do uso de um combustível convencional (gás natural, óleo combustível, diesel e carvão) ou algum tipo de resíduo industrial (madeira, casca de arroz, bagaço de 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).

Setor canavieiro: denominação adotada para identificar as usinas e empresas que utilizam a cana-de-açúcar como matéria-prima de seu processo produtivo.

Setor sucroalcooleiro: denominação adotada para as usinas relacionadas à cadeia de produção do açúcar e álcool a partir da cana-de-açúcar.

Setor sucroenergético: denominação adotada para as usinas relacionadas à cadeia de produção do açúcar, álcool e energia elétrica a partir da cana-de-açúcar.

Usina: termo adotado para designar de forma genérica a unidade produtora de açúcar, álcool e energia elétrica. Caso seja importante especificar a empresa que só produz álcool esta será denominada apenas como *destilaria*; nos outros casos, inclui-se 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%.

Tabela 48. 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)

Para exemplificar esta terminologia apresenta-se na Tabela 48 a composição tecnológica de duas variedades de cana bastante utilizadas no Brasil.

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 sucroenergético tem-se a margem de contribuição agrônômica, a margem de contribuição industrial e a margem de contribuição agroindustrial. Neste trabalho analisa-se a margem de contribuição agroindustrial.

Pol na cana (PC): indica toda sacarose aparente contida no caldo absoluto.

Produtividade: para esta tese, 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.

Talhão: Designação dada à menor subdivisão, em área, de um canavial.

Terno de moagem: equipamento de uma moenda convencional composto por um conjunto de três rolos (rolo superior, entrada e saída) dispostos em triângulo de forma que a fibra da cana embebida em caldo seja espremida duas vezes, entre o rolo superior e o rolo de entrada e entre o rolo superior e o rolo de saída, proporcionando a extração do caldo.

Transbordo: Equipamento, geralmente puxado por um trator, destinado à remoção da cana recém colhida do talhão para o local de carregamento dos veículos de transporte de cana. Utilizado para evitar a entrada de caminhões no talhão e, desta forma, minimizar a compactação do solo e o pisoteio da socaria.

III. Termos e parâmetros dos açúcares e dos alcoóis

É importante destacar que não existe especificação para todos os tipos de alcoóis disponíveis no mercado, sendo necessária uma caracterização técnica das propriedades químicas e físicas do produto em negociação. Nesta tese consideram-se apenas os alcoóis 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 tese, o termo *álcool*, refere-se 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 alcoóis, 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 AEAC.

Açúcar: produto com propriedades adoçantes e corantes, decorrente da cristalização da sacarose. A Tabela 49 indica os principais tipos de açúcares de acordo com o teor de sacarose e a umidade de cada produto.

Tabela 49. 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	0,1
Cristal Superior	99,5	0,1
Cristal Especial	99,7	0,1
Cristal Especial extra	99,8	0,1
Refinado	99,8	0,04
VHP	99,3	0,15
VVHP	99,6	0,15
VHPe	99,3	0,05

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.

ANEXO A – Modelo de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes para o Planejamento de Usinas (SPDL/PU2)

Neste anexo apresenta-se o modelo determinístico de seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento de usinas (SPDL/PU2) proposto por Paiva (2006) e Paiva e Morabito (2007; 2008). A descrição dos índices, parâmetros e equações apresentados respeitam a notação adotada no trabalho original.

Índices do modelo SPDL/PU2

- k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool ($k = 1, 2, \dots, K$);
- t Períodos: determinados pelo planejamento agrícola; estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar ($t = 1, 2, \dots, T$);
- p Produtos fabricados: produtos que podem ser produzidos pela empresa, tanto na fábrica de açúcar, quanto na destilaria de álcool ($p = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VHP+, Demerara, Melaço, AEHC, AEAC$). 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 ($ps = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VHP+, Demerara$);
- pa Subconjunto de produtos da destilaria ($pa = AEHC, AEAC$);
- px Subconjunto de resíduos da usina ($px = Melaço$);
- m Matérias-primas: determinadas de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana provém ($m = cana própria - cprop, cana arrendada - carr, cana acionistas - caci, cana fornecedor - cform$). Ainda, é necessário criar um subconjunto das matérias-primas próprias (subíndice mp), como segue:
- mp Subconjunto de canas que são administradas pela própria usina ($mp = cana própria, cana arrendada$);
- f Serviços de transporte: determinados de acordo com o tipo de prestador de serviço de transporte que está sendo utilizado ($f = transporte próprio - Fprop, transporte condomínio - Fcond, transporte terceirizado - Fterc$);
- e Locais de estoque: determinados de acordo com o local do estoque ($e = estoque próprio - Eprop, estoque terceirizado - Eterc$).

Parâmetros do modelo SPDL/PU2

- 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 (\$);
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 t (%);
φ_t	Tempo aproveitado na indústria durante um período t (%);
γ_t	Tempo efetivo de moagem durante um período 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 (\$/t);
h_{pe}	Custo variável de estocagem do produto p , por local de estoque e (\$/t ou m ³);
h_{spe}	Estoque do produto p , por local de estoque e no período de entre safra (\$/t ou m ³);
DS_{pt}	Demanda do produto p , em cada período t (t ou m ³);
V_{pt}	Valor líquido do produto p , em cada período t (\$/t ou m ³);
VC_{pt}	Adiantamento líquido da CRPAAA pelo produto p , em cada período t (\$/t ou m ³);
I_{pe0}	Estoque inicial de cada produto p , no local de estoque e (t ou m ³);
$Disp_{m0}$	Previsão de safra por tipo de fornecimento m (t);
M'_{m0}	Quantidade de cana colhida antes do início da safra (t);
A_{pkt}	Elementos da matriz de rendimentos de cada produto p , em cada processo k , em cada período t (t ou m ³). Cálculos para obtenção deste parâmetro são análogos aos cálculos de A_{pkt} apresentados na seção 4.1;
CK_{kt}	Elementos da matriz de custos industriais de cada processo k , em cada período t (\$/t de cana). Cálculos para obtenção deste parâmetro são análogos aos cálculos de CK_{kt} apresentados na seção 4.1;
C_{mt}	Elementos da matriz de custos agrícolas de cada fonte m , em cada período t (\$/t de cana). Cálculos para obtenção deste parâmetro são análogos aos cálculos de C_{mt} apresentados na seção 4.1;

Variáveis do modelo SPDL/PU2

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

- M''_{ft} Variável de decisão de quantidade de cana transportada por semana (t) – Quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte f , no período t ;
- M'''_{kt} Variável de decisão de quantidade de cana por processo por semana (t) – Quantidade de cana moída pelo processo k , no período t ;
- $Disp_{mt}$ Variável de disponibilidade de matéria-prima (t) – Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de matéria-prima m , no período t ;
- I_{pet} Variável de estoque (t ou m^3) – Quantidade estocada do produto p , pelo estoque tipo e , no período t ;

Função objetivo do modelo SPDL/PU2

$$\max Z = \sum_t \left(\left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pe} \right) \right) \quad (261)$$

Na expressão (261) têm-se a função objetivo do modelo SPDL/PU2. Nela procura-se 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 local de estoque e , em todos os períodos t .

Restrições do modelo SPDL/PU2

$$\sum_e I_{pet} = \sum_e I_{p,e,t-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DS_{pt}, \quad p=Standard, \dots, AEAC; \quad t=1, \dots, T \quad (262)$$

$$\sum_k X_{kt} = 1, \quad t=1, \dots, T \quad (263)$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t, \quad t=1, \dots, T \quad (264)$$

$$Disp_{mt} = Disp_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt}, \quad m=prop, \dots, cform; \quad t=1, \dots, T \quad (265)$$

$$\sum_m Disp_{m1} = \sum_t M_t \quad (266)$$

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \leq M'_t \leq M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100}, \quad t=1, \dots, T \quad (267)$$

$$\sum_p \sum_k VC_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t + Cgiro_t \geq \left(\sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pet} \cdot I_{pet} \right), \quad t=1, \dots, T \quad (268)$$

$$M'_{cform} + M'_{caci} + M'_{cout} \leq \alpha_t \cdot M_t, \quad t=1, \dots, T \quad (269)$$

$$M''_{ft} \leq \frac{\beta_{ft}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \cdot CT_f, f = F_{prop}, \dots, F_{terc}; t = 1, \dots, T \quad (270)$$

$$I_{pet} \leq Cest_{pe}, p = Standard, \dots, AEAC; e = E_{prop}, E_{terc}; t = 1, \dots, T \quad (271)$$

$$M'''_{kt} \leq M^{\max} \cdot X_{kt}, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (272)$$

$$X_{kt} \in \{0, 1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; Disp_{mt} \geq 0; I_{pet} \geq 0; \quad (273)$$

A restrição (262) representa o balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t . A equação (263) é a restrição de utilização de apenas um processo por período t . As equações (264) são restrições de compatibilidade entre a quantidade de cana colhida (M'_{mt}), a quantidade de cana transportada (M''_{ft}) e a quantidade de cana por processo (M'''_{kt}) e a quantidade de cana moída (M_t), em todos os períodos t da safra. A inequação (265) é a restrição disponibilidade de cana tipo m no início de cada período de análise t . A equação (266) é a restrição utilização total da cana disponível. A inequação (267) é a restrição de moagem em cada período t . A inequação (268) é a restrição de fluxo de caixa em cada período t . A inequação (269) é a restrição de quantidade de cana não administrada (c_{form} , c_{aci}) em cada período t ; a inequação (270) é a restrição de capacidade de transporte com frota própria em cada período t . A inequação (271) é a restrição de capacidade de estoque para cada produto p , em cada local de estoque e , nos períodos t . A restrição (272) impõe, em todos os períodos t , que a quantidade de cana por processo (M'''_{kt}) seja nula sempre que o processo k equivalente não esteja sendo utilizado ($X_{kt}=0$). Por fim, em (273) estão descritas as restrições de domínio das variáveis de decisão do modelo.

Neste modelo tem-se P produtos, K processos, M matérias-primas, F tipos de transporte, E tipos de estoque e T períodos. No total, $T(P \cdot E + F + 2M + 2K) + 1$ variáveis, onde $K \cdot T$ são binárias, e $T(P \cdot E + 2M + P + K + F + 7) + 2$ restrições. Por exemplo, considerando os dados do problema do estudo de caso com $M=4$, $K=252$, $F=3$, $E=2$, $P=10$, $T=23$ (veja próxima seção), o modelo SPDL/PU2 resulta em 12.306 variáveis, sendo 5.796 binárias, e 6902 restrições. Para mais detalhes sobre o modelo SPDL/PU2, veja Paiva (2006) e Paiva e Morabito (2007; 2008).

ANEXO B – Lista de processos utilizados no estudo de caso

Neste anexo é apresentada 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 50, inicialmente apresenta-se 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 49);

$Umid_k$ Índice percentual que determina a umidade de um determinado tipo de açúcar (característica dos açúcares na Tabela 49);

$MAP_{pa,k}$ Matriz auxiliar para determinar o açúcar que está sendo produzido pelo processo k . Este parâmetro não é apresentado na Tabela 50;

$MEP_{pe,k}$ 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 50. Lista de processos

Constantes	R_{AEHC} (l/100kgART)		R_{AEAC} (l/100kgART)		BMF	$PzaM$
	67,87		65,03		84%	42%
Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS_k (Unit)	TM_k (Unit)	Pol_k (%)	$Umid_k$ (%)	$MEP_{k,pe}$ (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc1	1	0,33	99,3	0,1	1	
Proc2	1	0,33	99,5	0,1	1	
Proc3	1	0,33	99,7	0,1	1	
Proc4	1	0,33	99,8	0,1	1	
Proc5	1	0,33	99,3	0,15	1	
Proc6	1	0,33	99,6	0,15	1	
Proc7	1	0,33	99,3	0,15	1	
Proc8	1	0,33	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc9	1	0,33	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc10	1	0,33	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc11	1	0,33	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc12	1	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc13	1	0,33	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc14	1	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc15	1	0,33	99,3	0,1		1
Proc16	1	0,33	99,5	0,1		1
Proc17	1	0,33	99,7	0,1		1
Proc18	1	0,33	99,8	0,1		1
Proc19	1	0,33	99,3	0,15		1
Proc20	1	0,33	99,6	0,15		1
Proc21	1	0,33	99,3	0,15		1
Proc22	0,9	0,33	99,3	0,1	1	
Proc23	0,9	0,33	99,5	0,1	1	
Proc24	0,9	0,33	99,7	0,1	1	
Proc25	0,9	0,33	99,8	0,1	1	
Proc26	0,9	0,33	99,3	0,15	1	
Proc27	0,9	0,33	99,6	0,15	1	
Proc28	0,9	0,33	99,3	0,15	1	
Proc29	0,9	0,33	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc30	0,9	0,33	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc31	0,9	0,33	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc32	0,9	0,33	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc33	0,9	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc34	0,9	0,33	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc35	0,9	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc36	0,9	0,33	99,3	0,1		1
Proc37	0,9	0,33	99,5	0,1		1
Proc38	0,9	0,33	99,7	0,1		1
Proc39	0,9	0,33	99,8	0,1		1
Proc40	0,9	0,33	99,3	0,15		1
Proc41	0,9	0,33	99,6	0,15		1
Proc42	0,9	0,33	99,3	0,15		1
Proc43	0,8	0,33	99,3	0,1	1	
Proc44	0,8	0,33	99,5	0,1	1	

Tabela 50. Lista de processos (continuação)

Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS_k (Unit)	TM_k (Unit)	Pol_k (%)	$Umid_k$ (%)	$MEP_{k,pe}$ (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc45	0,8	0,33	99,7	0,1	1	
Proc46	0,8	0,33	99,8	0,1	1	
Proc47	0,8	0,33	99,3	0,15	1	
Proc48	0,8	0,33	99,6	0,15	1	
Proc49	0,8	0,33	99,3	0,15	1	
Proc50	0,8	0,33	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc51	0,8	0,33	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc52	0,8	0,33	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc53	0,8	0,33	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc54	0,8	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc55	0,8	0,33	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc56	0,8	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc57	0,8	0,33	99,3	0,1		1
Proc58	0,8	0,33	99,5	0,1		1
Proc59	0,8	0,33	99,7	0,1		1
Proc60	0,8	0,33	99,8	0,1		1
Proc61	0,8	0,33	99,3	0,15		1
Proc62	0,8	0,33	99,6	0,15		1
Proc63	0,8	0,33	99,3	0,15		1
Proc64	0,7	0,33	99,3	0,1	1	
Proc65	0,7	0,33	99,5	0,1	1	
Proc66	0,7	0,33	99,7	0,1	1	
Proc67	0,7	0,33	99,8	0,1	1	
Proc68	0,7	0,33	99,3	0,15	1	
Proc69	0,7	0,33	99,6	0,15	1	
Proc70	0,7	0,33	99,3	0,15	1	
Proc71	0,7	0,33	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc72	0,7	0,33	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc73	0,7	0,33	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc74	0,7	0,33	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc75	0,7	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc76	0,7	0,33	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc77	0,7	0,33	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc78	0,7	0,33	99,3	0,1		1
Proc79	0,7	0,33	99,5	0,1		1
Proc80	0,7	0,33	99,7	0,1		1
Proc81	0,7	0,33	99,8	0,1		1
Proc82	0,7	0,33	99,3	0,15		1
Proc83	0,7	0,33	99,6	0,15		1
Proc84	0,7	0,33	99,3	0,15		1
Proc85	1	0,66	99,3	0,1	1	
Proc86	1	0,66	99,5	0,1	1	
Proc87	1	0,66	99,7	0,1	1	
Proc88	1	0,66	99,8	0,1	1	
Proc89	1	0,66	99,3	0,15	1	
Proc90	1	0,66	99,6	0,15	1	
Proc91	1	0,66	99,3	0,15	1	

Tabela 50. Lista de processos (continuação)

Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS_k (Unit)	TM_k (Unit)	Pol_k (%)	$Umid_k$ (%)	$MEP_{k,pe}$ (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc92	1	0,66	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc93	1	0,66	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc94	1	0,66	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc95	1	0,66	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc96	1	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc97	1	0,66	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc98	1	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc99	1	0,66	99,3	0,1		1
Proc100	1	0,66	99,5	0,1		1
Proc101	1	0,66	99,7	0,1		1
Proc102	1	0,66	99,8	0,1		1
Proc103	1	0,66	99,3	0,15		1
Proc104	1	0,66	99,6	0,15		1
Proc105	1	0,66	99,3	0,15		1
Proc106	0,9	0,66	99,3	0,1	1	
Proc107	0,9	0,66	99,5	0,1	1	
Proc108	0,9	0,66	99,7	0,1	1	
Proc109	0,9	0,66	99,8	0,1	1	
Proc110	0,9	0,66	99,3	0,15	1	
Proc111	0,9	0,66	99,6	0,15	1	
Proc112	0,9	0,66	99,3	0,15	1	
Proc113	0,9	0,66	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc114	0,9	0,66	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc115	0,9	0,66	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc116	0,9	0,66	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc117	0,9	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc118	0,9	0,66	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc119	0,9	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc120	0,9	0,66	99,3	0,1		1
Proc121	0,9	0,66	99,5	0,1		1
Proc122	0,9	0,66	99,7	0,1		1
Proc123	0,9	0,66	99,8	0,1		1
Proc124	0,9	0,66	99,3	0,15		1
Proc125	0,9	0,66	99,6	0,15		1
Proc126	0,9	0,66	99,3	0,15		1
Proc127	0,8	0,66	99,3	0,1	1	
Proc128	0,8	0,66	99,5	0,1	1	
Proc129	0,8	0,66	99,7	0,1	1	
Proc130	0,8	0,66	99,8	0,1	1	
Proc131	0,8	0,66	99,3	0,15	1	
Proc132	0,8	0,66	99,6	0,15	1	
Proc133	0,8	0,66	99,3	0,15	1	
Proc134	0,8	0,66	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc135	0,8	0,66	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc136	0,8	0,66	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc137	0,8	0,66	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc138	0,8	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575

Tabela 50. Lista de processos (continuação)

Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS_k (Unit)	TM_k (Unit)	Pol_k (%)	$Umid_k$ (%)	$MEP_{k,pe}$ (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc139	0,8	0,66	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc140	0,8	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc141	0,8	0,66	99,3	0,1		1
Proc142	0,8	0,66	99,5	0,1		1
Proc143	0,8	0,66	99,7	0,1		1
Proc144	0,8	0,66	99,8	0,1		1
Proc145	0,8	0,66	99,3	0,15		1
Proc146	0,8	0,66	99,6	0,15		1
Proc147	0,8	0,66	99,3	0,15		1
Proc148	0,7	0,66	99,3	0,1	1	
Proc149	0,7	0,66	99,5	0,1	1	
Proc150	0,7	0,66	99,7	0,1	1	
Proc151	0,7	0,66	99,8	0,1	1	
Proc152	0,7	0,66	99,3	0,15	1	
Proc153	0,7	0,66	99,6	0,15	1	
Proc154	0,7	0,66	99,3	0,15	1	
Proc155	0,7	0,66	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc156	0,7	0,66	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc157	0,7	0,66	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc158	0,7	0,66	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc159	0,7	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc160	0,7	0,66	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc161	0,7	0,66	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc162	0,7	0,66	99,3	0,1		1
Proc163	0,7	0,66	99,5	0,1		1
Proc164	0,7	0,66	99,7	0,1		1
Proc165	0,7	0,66	99,8	0,1		1
Proc166	0,7	0,66	99,3	0,15		1
Proc167	0,7	0,66	99,6	0,15		1
Proc168	0,7	0,66	99,3	0,15		1
Proc169	1	1	99,3	0,1	1	
Proc170	1	1	99,5	0,1	1	
Proc171	1	1	99,7	0,1	1	
Proc172	1	1	99,8	0,1	1	
Proc173	1	1	99,3	0,15	1	
Proc174	1	1	99,6	0,15	1	
Proc175	1	1	99,3	0,15	1	
Proc176	1	1	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc177	1	1	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc178	1	1	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc179	1	1	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc180	1	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc181	1	1	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc182	1	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc183	1	1	99,3	0,1		1
Proc184	1	1	99,5	0,1		1
Proc185	1	1	99,7	0,1		1

Tabela 50. Lista de processos (continuação)

Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS_k (Unit)	TM_k (Unit)	Pol_k (%)	$Umid_k$ (%)	$MEP_{k,pe}$ (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc186	1	1	99,8	0,1		1
Proc187	1	1	99,3	0,15		1
Proc188	1	1	99,6	0,15		1
Proc189	1	1	99,3	0,15		1
Proc190	0,9	1	99,3	0,1	1	
Proc191	0,9	1	99,5	0,1	1	
Proc192	0,9	1	99,7	0,1	1	
Proc193	0,9	1	99,8	0,1	1	
Proc194	0,9	1	99,3	0,15	1	
Proc195	0,9	1	99,6	0,15	1	
Proc196	0,9	1	99,3	0,15	1	
Proc197	0,9	1	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc198	0,9	1	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc199	0,9	1	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc200	0,9	1	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc201	0,9	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc202	0,9	1	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc203	0,9	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc204	0,9	1	99,3	0,1		1
Proc205	0,9	1	99,5	0,1		1
Proc206	0,9	1	99,7	0,1		1
Proc207	0,9	1	99,8	0,1		1
Proc208	0,9	1	99,3	0,15		1
Proc209	0,9	1	99,6	0,15		1
Proc210	0,9	1	99,3	0,15		1
Proc211	0,8	1	99,3	0,1	1	
Proc212	0,8	1	99,5	0,1	1	
Proc213	0,8	1	99,7	0,1	1	
Proc214	0,8	1	99,8	0,1	1	
Proc215	0,8	1	99,3	0,15	1	
Proc216	0,8	1	99,6	0,15	1	
Proc217	0,8	1	99,3	0,15	1	
Proc218	0,8	1	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc219	0,8	1	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc220	0,8	1	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc221	0,8	1	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc222	0,8	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc223	0,8	1	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc224	0,8	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc225	0,8	1	99,3	0,1		1
Proc226	0,8	1	99,5	0,1		1
Proc227	0,8	1	99,7	0,1		1
Proc228	0,8	1	99,8	0,1		1
Proc229	0,8	1	99,3	0,15		1
Proc230	0,8	1	99,6	0,15		1
Proc231	0,8	1	99,3	0,15		1
Proc232	0,7	1	99,3	0,1	1	

Tabela 50. Lista de processos (continuação)

Processo	Características técnicas de cada processo					
	TS_k (Unit)	TM_k (Unit)	Pol_k (%)	$Umid_k$ (%)	$MEP_{k,pe}$ (Unit)	
					AEHC	AEAC
Proc233	0,7	1	99,5	0,1	1	
Proc234	0,7	1	99,7	0,1	1	
Proc235	0,7	1	99,8	0,1	1	
Proc236	0,7	1	99,3	0,15	1	
Proc237	0,7	1	99,6	0,15	1	
Proc238	0,7	1	99,3	0,15	1	
Proc239	0,7	1	99,3	0,1	0,425	0,575
Proc240	0,7	1	99,5	0,1	0,425	0,575
Proc241	0,7	1	99,7	0,1	0,425	0,575
Proc242	0,7	1	99,8	0,1	0,425	0,575
Proc243	0,7	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc244	0,7	1	99,6	0,15	0,425	0,575
Proc245	0,7	1	99,3	0,15	0,425	0,575
Proc246	0,7	1	99,3	0,1		1
Proc247	0,7	1	99,5	0,1		1
Proc248	0,7	1	99,7	0,1		1
Proc249	0,7	1	99,8	0,1		1
Proc250	0,7	1	99,3	0,15		1
Proc251	0,7	1	99,6	0,15		1
Proc252	0,7	1	99,3	0,15		1

ANEXO C – Calendário de funcionamento das usinas cooperadas

Neste anexo são apresentados os calendários de funcionamento das usinas que fazem parte da CRPAAA. Nos calendários apresentados (Tabela 53, Tabela 54, Tabela 55, Tabela 56, Tabela 57, Tabela 58, Tabela 59, Tabela 60, Tabela 61, Tabela 62), destaca-se o dia de início de safra, os dias de final de safra programados no planejamento 1 e re-planejamentos 2 e 3, o último dia real da safra, as paradas programadas para manutenção das usinas e as datas de execução dos planejamentos (Tabela 51). A Tabela 52 apresenta um resumo dos dados de duração da safra.

Tabela 51. Legenda dos calendários apresentados no Anexo C

Representação no calendário	Significado do símbolo
∩	Dia de início da safra 2007/2008
⊥	Dia final programada no planejamento USC
⊢	Último dia real da safra 2007/2008
∅	Paradas programadas no planejamento USC
‡	Data de execução do planejamento USC

Tabela 52. Resumo de duração prevista da safra para cada usina

Usinas	Dias de safra	Semanas de safra
CAP	188	28
PAI	136	20
PAL	196	28
PRI	145	21
USC	173	25
USM	158	24
SER	162	24
SIM	160	23
USU	165	24
TRI	170	25

Tabela 53. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Capricho (CAP)

Setembro							Janeiro							Maio									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem1 ^T					1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17	18	19	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24	25	26	27	28	29	30	sem23	28 ^U	29	30	31				sem40	26	27	28	29	30	31	
Outubro							Fevereiro							Junho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem6	1	2	3	4	5	6 ^J	7	sem23				1	2	3	sem40						1		
sem7	8	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15 ^U	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29 ^U	30	31					sem27	25 ^U	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29
Novembro							Março							Julho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem10			1	2	3	4	sem27					1	2	sem45	1	2	3	4	5	6			
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12 ^U	13	14	15	16	17	18	sem29	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19	20	21	22	23	24	25	sem30	17 ^U	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26 ^U	27	28	29	30			sem31	24 ^U	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31			
								sem32	31 ^U														
Dezembro							Abril							Agosto									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem14					1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49				1	2	3			
sem15	3	4	5	6	7	8	9	sem33	7 ^U	8	9	10 ^T	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20 ^T	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24 ^U	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30				sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^U																						

Tabela 54. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Paise (PAI)

Setembro								Janeiro								Maio							
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem1 ^F						1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36				1	2	3	4	
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17	18 ^O	19	20	21	22	23	sem22	21 ^U	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24	25	26	27	28	29	30	sem23	28	29	30	31 ^T			sem40	26	27	28	29	30	31		
Outubro								Fevereiro								Junho							
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem6	1	2	3	4	5	6	7	sem23					1	2	3	sem40							1
sem7	8 ^U	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19 ^I	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29 ^U	30	31					sem27	25	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29
Novembro								Março								Julho							
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem10				1	2	3	4	sem27						1	2	sem45				1	2	3	4
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19 ^U	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31			
								sem32	31														
Dezembro								Abril								Agosto							
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem14						1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49					1	2	3	
sem15	3	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30				sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^U																						

Tabela 55. Calendário da safra 2007/2008 da destilaria Porto Alegre (PAL)

Setembro							Janeiro							Maio									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem1 ^T					1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8 ^I	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17 ^O	18	19	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24	25	26	27	28	29	30	sem23	28 ^U	29	30	31				sem40	26	27	28	29	30	31	
Outubro							Fevereiro							Junho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem6	1	2	3	4	5	6	7	sem23				1	2	3	sem40						1		
sem7	8 ^U	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22 ^U	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29	30	31					sem27	25 ^U	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29
Novembro							Março							Julho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem10				1	2	3	4	sem27					1	2	sem45	1	2	3	4	5	6		
sem11	5 ^U	6	7	8	9	10	11	sem28	3 ^U	4	5	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12	13	14	15	16	17	18	sem29	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19 ^U	20	21	22	23	24	25	sem30	17 ^U	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26	27	28	29	30			sem31	24 ^U	25	26	27	28	29	30 ^T	sem49	28	29	30	31			
								sem32	31														
Dezembro							Abril							Agosto									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem14					1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49					1	2	3		
sem15	3 ^U	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17 ^U	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30					sem53	25	26	27	28	29	30	31
sem19	31 ^U																						

Tabela 56. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Porto Rico (PRI)

Setembro							Janeiro							Maio									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem1 ^T					1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17	18	19	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24 ^P	25	26	27	28	29	30	sem23	28 ^U	29	30	31			sem40	26	27	28	29	30	31		
Outubro							Fevereiro							Junho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem6	1	2	3	4	5	6	7	sem23				1	2	3	sem40						1		
sem7	8 ^U	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15 ^T	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22 ^U	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29	30	31					sem27	25	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29
Novembro							Março							Julho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem10				1	2	3	4	sem27					1	2	sem45	1	2	3	4	5	6		
sem11	5 ^U	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5 ^I	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19 ^U	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31			
								sem32	31														
Dezembro							Abril							Agosto									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem14					1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49					1	2	3		
sem15	3 ^U	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17 ^U	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30				sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^U																						

Tabela 57. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Santa Clotilde (USC)

Setembro				Janeiro				Maio															
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem1 ^T					1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17	18	19 ^O	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24	25	26	27	28	29	30	sem23	28 ^U	29	30	31				sem40	26	27	28	29	30	31	
Outubro				Fevereiro				Junho															
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem6	1 ^U	2	3	4	5	6	7	sem23				1	2	3	sem40						1		
sem7	8	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15 ^U	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29 ^U	30	31				sem27	25 ^U	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29	
Novembro				Março				Julho															
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem10				1	2	3	4	sem27					1	2	sem45	1	2	3	4	5	6		
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3 ^U	4	5	6	7	8	9 ^T	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12 ^U	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26 ^U	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31			
							sem32	31															
Dezembro				Abril				Agosto															
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem14					1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49					1	2	3		
sem15	3	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24 ^U	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30 ^L					sem53	25	26	27	28	29	30	31
sem19	31 ^U																						

Tabela 58. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Santa Maria (USM)

Setembro							Janeiro							Maio									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem1 ^T					1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14 ^U	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17	18	19	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24 ^U	25	26	27	28	29	30	sem23	28 ^U	29	30	31			sem40	26	27	28	29	30	31		
Outubro							Fevereiro							Junho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem6	1	2	3	4	5	6	7	sem23				1	2	3	sem40						1		
sem7	8 ^U	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22 ^U	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21 ^T	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29	30	31				sem27	25	26	27	28	29		sem44	23	24	25	26	27	28	29		
Novembro							Março							Julho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem10				1	2	3	4	sem27					1	2	sem45	1	2	3	4	5	6		
sem11	5 ^U	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19 ^U	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26	27	28	29	30		sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31				
							sem32	31															
Dezembro							Abril							Agosto									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem14					1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49				1	2	3			
sem15	3 ^U	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10 ^T	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17 ^U	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30				sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^U																						

Tabela 59. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Seresta (SER)

Setembro								Janeiro								Maio									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem1 ^F						1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36				1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11		
sem3	10	11	12	13 ^O	14	15	16	sem21	14	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18		
sem4	17	18	19	20	21	22	23	sem22	21 ^U	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25		
sem5	24	25	26	27	28	29	30	sem23	28	29	30	31			sem40	26	27	28	29	30	31				
Outubro								Fevereiro								Junho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem6	1 ^U	2	3	4	5	6	7	sem23					1	2	3	sem40							1		
sem7	8	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8		
sem8	15	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15		
sem9	22 ^U	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21 ^T	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22		
sem10	29	30	31					sem27	25	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29		
Novembro								Março								Julho									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem10				1	2	3	4	sem27						1	2	sem45				1	2	3	4	5	6
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7	8	9 ^I	sem46	7	8	9	10	11	12	13		
sem12	12 ^U	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20		
sem13	19	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27		
sem14	26	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31					
								sem32	31																
Dezembro								Abril								Agosto									
seg	ter	qua	qui	sex	Sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom			
sem14						1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49					1	2	3			
sem15	3 ^U	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10		
sem16	10	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17		
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24		
sem18	24 ^U	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30				sem53	25	26	27	28	29	30	31			
sem19	31 ^U																								

Tabela 60. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Sinimbu (SIN)

Setembro								Janeiro								Maio								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem1 ^T						1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11	
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18	
sem4	17	18 ^O	19	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25	
sem5	24	25	26	27	28	29	30	sem23	28 ^O	29	30	31				sem40	26	27	28	29	30	31		
Outubro								Fevereiro								Junho								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem6	1 ^O	2	3	4	5	6	7	sem23					1	2	3	sem40							1	
sem7	8	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^O	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8	
sem8	15 ^O	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15	
sem9	22	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24 ^T	sem43	16	17	18	19	20	21	22	
sem10	29 ^O	30	31					sem27	25	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29	
Novembro								Março								Julho								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem10				1	2	3	4	sem27						1	2	sem45			1	2	3	4	5	6
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13	
sem12	12 ^O	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11 ^T	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20	
sem13	19	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27	
sem14	26 ^O	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31				
								sem32	31															
Dezembro								Abril								Agosto								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem14						1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49						1	2	3	
sem15	3	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10	
sem16	10 ^O	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17	
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24	
sem18	24	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30					sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^O																							

Tabela 61. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Sumaúma (USU)

Setembro								Janeiro								Maio							
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem1 ^T						1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4		
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18
sem4	17	18	19	20	21	22	23	sem22	21 ^U	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25
sem5	24	25 ^U	26	27	28	29	30	sem23	28	29	30	31			sem40	26	27	28	29	30	31		
Outubro								Fevereiro								Junho							
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem6	1	2	3	4	5	6	7	sem23				1	2	3	sem40							1	
sem7	8 ^U	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8
sem8	15	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15
sem9	22	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22
sem10	29 ^U	30	31					sem27	25 ^U	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29
Novembro								Março								Julho							
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem10				1	2	3	4	sem27					1	2	sem45	1	2	3	4	5	6		
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7 ^T	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13
sem12	12	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20
sem13	19 ^U	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27
sem14	26	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31			
								sem32	31														
Dezembro								Abril								Agosto							
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom	
sem14					1	2		sem32	1	2	3 ^T	4	5	6	sem49				1	2	3		
sem15	3	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10
sem16	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24
sem18	24	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30				sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^U																						

Tabela 62. Calendário da safra 2007/2008 da Usina Triunfo (TRI)

Setembro								Janeiro								Maio								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem1 ^T						1	2	sem19	1 ^U	2	3	4	5	6	sem36			1	2	3	4			
sem2	3	4	5	6	7	8	9	sem20	7	8	9	10	11	12	13	sem37	5	6	7	8	9	10	11	
sem3	10	11	12	13	14	15	16	sem21	14 ^U	15	16	17	18	19	20	sem38	12	13	14	15	16	17	18	
sem4	17	18	19	20	21	22	23	sem22	21	22	23	24	25	26	27	sem39	19	20	21	22	23	24	25	
sem5	24	25 ^J	26	27	28	29	30	sem23	28 ^U	29	30	31				sem40	26	27	28	29	30	31		
Outubro								Fevereiro								Junho								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem6	1	2	3	4	5	6	7	sem23					1	2	3	sem40							1	
sem7	8	9	10	11	12	13	14	sem24	4	5	6 ^U	7	8	9	10	sem41	2	3	4	5	6	7	8	
sem8	15 ^U	16	17	18	19	20	21	sem25	11	12	13	14	15	16	17	sem42	9	10	11	12	13	14	15	
sem9	22	23	24	25	26	27	28	sem26	18	19	20	21	22	23	24	sem43	16	17	18	19	20	21	22	
sem10	29 ^U	30	31					sem27	25 ^U	26	27	28	29			sem44	23	24	25	26	27	28	29	
Novembro								Março								Julho								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem10				1	2	3	4	sem27						1	2	sem45			1	2	3	4	5	6
sem11	5	6	7	8	9	10	11	sem28	3	4	5	6	7	8	9	sem46	7	8	9	10	11	12	13	
sem12	12 ^U	13	14	15	16	17	18	sem29	10	11	12	13 ^T	14	15	16	sem47	14	15	16	17	18	19	20	
sem13	19	20	21	22	23	24	25	sem30	17	18	19	20	21	22	23	sem48	21	22	23	24	25	26	27	
sem14	26 ^U	27	28	29	30			sem31	24	25	26	27	28	29	30	sem49	28	29	30	31				
								sem32	31															
Dezembro								Abril								Agosto								
seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		seg	ter	qua	qui	sex	sab	dom		
sem14						1	2	sem32	1	2	3	4	5	6	sem49						1	2	3	
sem15	3	4	5	6	7	8	9	sem33	7	8	9	10	11	12	13	sem50	4	5	6	7	8	9	10	
sem16	10 ^U	11	12	13	14	15	16	sem34	14	15	16	17 ^L	18	19	20	sem51	11	12	13	14	15	16	17	
sem17	17	18	19	20	21	22	23	sem35	21	22	23	24	25	26	27	sem52	18	19	20	21	22	23	24	
sem18	24 ^U	25	26	27	28	29	30	sem36	28	29	30					sem53	25	26	27	28	29	30	31	
sem19	31 ^U																							

ANEXO D – Dados relacionados com a capacidade das usinas cooperadas

Tabela 63. Moagem de cana por mês na safra 2007/2008

Usinas	set	out	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai
CAP		93.320	113.954	117.017	113.576	99.147	63.171	63.425	
PAI	58.087	145.046	142.412	139.857	133.729	78.494			
PAL	59.523	107.274	126.265	117.003	102.803	93.555	64.649	82.197	20.782
PRI	78.230	299.807	300.280	289.483	305.140	254.608	47.482		
USC	75.185	187.950	198.130	195.808	206.369	181.000	60.860	144.162	
USM	67.868	169.786	179.943	176.680	176.561	148.670	91.549	34.106	
SER	115.330	195.710	189.400	198.350	191.250	167.500	51.172		
SIM	100.787	251.900	259.581	261.628	254.043	236.896	84.040		
USU	29.564	171.281	152.711	172.415	160.278	149.125	122.616	13.158	
TRI	45.298	266.992	275.946	271.464	267.675	248.845	192.438	146.566	
Total	629.872	1.889.066	1.938.622	1.939.705	1.911.424	1.657.840	777.977	483.614	20.782

Tabela 64. Dados de previsão de moagem e capacidade de moagem das usinas

Usinas	Moagem planejada safra 2007/2008	Moagem real safra 2007/2008	Moagem diária mínima	Moagem diária máxima
CAP	640.000	663.610	3.000	3.800
PAI	630.000	697.625	4.100	5.100
PAL	660.000	774.051	3.000	3.800
PRI	1.400.000	1.575.030	8.700	10.800
USC	1.150.000	1.249.464	6.500	8.000
USM	880.000	1.045.163	5.000	6.200
SER	1.000.000	1.108.712	5.700	7.400
SIM	1.300.000	1.448.875	7.300	9.000
USU	870.000	971.148	4.900	6.000
TRI	1.530.000	1.715.224	8.100	10.000
Total	10.060.000	11.248.902	56.300	70.100

Tabela 65. Produção máxima em sacos de açúcar ou litros de álcool por dia

Usinas	Cristal	Extra	Refinado	VHP	Açúcar total	Anidro	Hidratado	Álcool total	Melaço	
	Sacos de 50 kg					litros			Toneladas	ART
CAP				10437,43	10437,4	50839,14	52411,49	103250,6	7901,49	663,38
PAI	9875,42	9775,42		9997,5	29648,3	152571,4	157290	309861,4	0	0
PAL					0,0		354505,9	354505,9	0	0
PRI				21213	21213,0	167496,4	391142,9	558639,3	0	0
USC	14000	14000		15000	43000,0	120000	210000	330000,0	0	0
USM				11480	11480,0	193000	199094,4	392094,4	0	0
SER				14560	14560,0	100142,9	174285,7	274428,6	0	0
SIM	18000	13745,85		19603,28	51349,1	221702,9	300000	521702,9	0	0
USU				13500,14	13500,1	111911	132372	244283,0	0	0
TRI	20585	20285	13368,28	21000	75238,3	296212,9	304000	600212,9	0	0
Total	62460,4	57806,3	13368,3	136791,4	270426,3	1413876,5	2275102,3	3688978,9	7901,5	663,4

Tabela 66. Produção diária máxima em toneladas de açúcar ou metros cúbicos de álcool

Usinas	Cristal	Extra	Refinado	VHP	Açúcar total	Anidro	Hidratado	Álcool total	Melaço	
	Toneladas					m ³			Toneladas	ART
CAP	0	0	0	522	522	51	52	103	7901	663
PAI	494	489	0	500	1482	153	157	310	0	0
PAL	0	0	0	0	0	0	355	355	0	0
PRI	0	0	0	1061	1061	167	391	559	0	0
USC	700	700	0	750	2150	120	210	330	0	0
USM	0	0	0	574	574	193	199	392	0	0
SER	0	0	0	728	728	100	174	274	0	0
SIM	900	687	0	980	2567	222	300	522	0	0
USU	0	0	0	675	675	112	132	244	0	0
TRI	1029	1014	668	1050	3762	296	304	600	0	0
Total	3123	2890	668	6840	13521	1414	2275	3689	7901	663

ANEXO F – Planilhas de rendimentos e fluxograma de balanço de vapor e energia

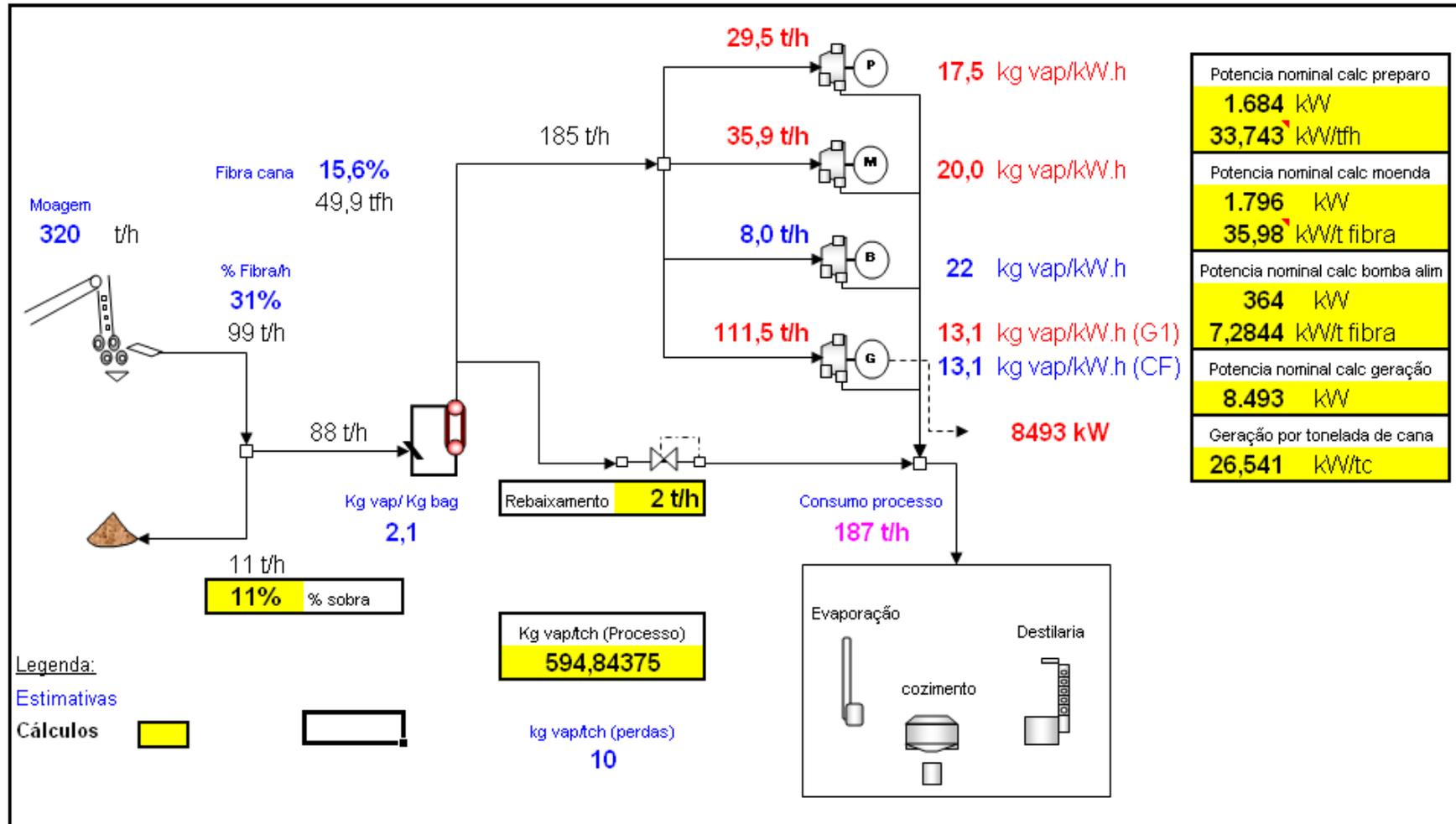


Figura 40. Exemplo de cálculo do balanço de vapor e energia da USC

ANEXO G – Resultados obtidos no cenário do modelo estratégico da CRPAA

Resultados obtidos ao rodar o modelo PASUC/N1 com os dados do primeiro planejamento apresentados na seção 5.1.1.

```

S O L V E      S U M M A R Y

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS      17      SINGLE EQUATIONS      3,887
BLOCKS OF VARIABLES      7      SINGLE VARIABLES      3,121
NON ZERO ELEMENTS      13,581

MODEL      Nivel1      OBJECTIVE      z
TYPE      LP      DIRECTION      MAXIMIZE
SOLVER      CPLEX      FROM LINE      430

**** SOLVER STATUS      1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS      1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE      97794883.4254

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.168      10000.000
ITERATION COUNT, LIMIT      633      50000

---- 431 VARIABLE M1.L Variavel de decisao de quantidade de cana por fonte d
e suprimento nos periodos de safra

           sete           out           nov           dez           jan           fev
cana.cap           92639.70      104611.84      113082.94      111166.28      107332.96
cana.pai      50833.26      146624.49      144180.75      146624.49      141737.01
cana.pal      38812.36      98610.29      105607.97      107428.79      105607.97      101966.31
cana.pri      54193.56      295285.09      300148.96      305323.94      300148.96      144899.50
cana.usc      71635.17      183759.78      206449.99      226165.88      222332.56      182156.82
cana.usm      76666.40      164606.65      172307.73      175278.56      172307.73      118832.92
cana.ser      95593.42      163874.43      179346.97      209203.44      206603.08      145378.66
cana.sin      88191.72      254436.61      250124.13      258749.10      250124.13      198374.31
cana.usu      25826.99      140874.51      162800.38      172499.40      169624.41      163874.43
cana.tri      42693.60      265435.65      277915.70      282707.35      277915.70      268332.40

+           mar

cana.cap      111166.28
cana.pal      101966.31
cana.usc      57499.80
cana.usu      34499.88
cana.tri      114999.60

---- 431 VARIABLE C.L variavel de disponibilidade de cana para ser processad
a nos proximos periodos de safra

           sete           out           nov           dez           jan           fev
cana.cap      640000.00      640000.00      547360.30      442748.46      329665.52      218499.24
cana.pai      630000.00      579166.74      432542.25      288361.50      141737.01
cana.pal      660000.00      621187.64      522577.35      416969.38      309540.59      203932.62
cana.pri      1400000.00      1345806.44      1050521.35      750372.39      445048.45      144899.50
cana.usc      1150000.00      1078364.83      894605.06      712448.23      486282.35      263949.79
cana.usm      880000.00      803333.60      638726.95      466419.21      291140.65      118832.92
cana.ser      1000000.00      904406.58      740532.15      561185.18      351981.74      145378.66
cana.sin      1300000.00      1211808.28      957371.67      707247.54      448498.44      198374.31
cana.usu      870000.00      844173.01      703298.50      540498.12      367998.72      198374.31
cana.tri      1530000.00      1487306.40      1221870.75      943955.05      661247.70      383332.00

+           mar

cana.cap      111166.28
cana.pal      101966.31
cana.usc      57499.80
cana.usu      34499.88
cana.tri      114999.60

```


AEHC	.usu	110.00	600.00	590.00	600.00	590.00
AEHC	.tri	1672.00	9120.00	232.00	236.00	232.00
AEAC	.cap		1249.50	1479.00	1504.50	1479.00
AEAC	.pai	1548.50		4513.50	4590.00	4437.00
AEAC	.pri	1085.50	2390.50	4843.00	4926.50	4843.00
AEAC	.usc			3480.00	3540.00	3480.00
AEAC	.usm			5597.00	5693.50	5597.00
AEAC	.ser	1750.00	3000.00	2950.00	2950.00	2950.00
AEAC	.sin			5956.00	6660.00	6438.00
AEAC	.usu	616.00	3360.00	3304.00	3360.00	3304.00
AEAC	.tri			8584.00	8732.00	8584.00
AEHren	.ser			2183.00	2183.00	434.00

+ fev mar

Standard	.sin	1000.00	
Superior	.sin	2455.69	
Especial	.usc	9154.95	
Extra	.tri	2576.60	
Refinado	.tri	17553.75	
VHP	.cap	10666.31	11021.16
VHP	.pri	11857.02	
VHP	.usc	11845.05	5625.00
VHP	.usm	9534.90	
VHP	.ser	14574.58	
VHP	.sin	15855.58	
VHP	.usu	17347.04	3355.31
VHP	.tri		8318.03
melaco	.cap	763.97	778.12
AEHC	.cap	28.00	29.00
AEHC	.pal	7902.99	8117.95
AEHC	.pri	3136.00	
AEHC	.usc	9.10	409.92
AEHC	.usm	120.00	
AEHC	.ser	1517.00	
AEHC	.usu	570.00	120.00
AEHC	.tri	224.00	96.00
AEAC	.cap	1428.00	1479.00
AEAC	.pri	2338.00	
AEAC	.usc	3360.00	900.00
AEAC	.usm	3860.00	
AEAC	.ser	2050.00	
AEAC	.sin	5106.00	
AEAC	.usu	3192.00	672.00
AEAC	.tri	8288.00	3552.00

---- 431 VARIABLE D.L Variavel de atendimento da demanda no periodo

	sete	out	nov	dez	jan	fev
Standard				1000.00		
Superior	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00
Especial	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00
Extra				15000.00	15000.00	15000.00
Refinado	1890.80	9000.00	9000.00	9000.00	9000.00	9000.00
VHP		80000.00		80000.00		80000.00
VHPe						1000.00
melaco			565.20	1450.51	1164.09	763.97
AEHC	21215.55	53784.45	8000.00	8000.00	8000.00	8000.00
AEAC	10000.00	10000.00	10000.00	10000.00	10000.00	10000.00
AEHren						4800.00

+ mar abr mai jun jul ago

Standard		1000.00				1000.00
Superior	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00
Especial	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	1500.00	37000.00
Extra	20000.00	15000.00				
Refinado	14259.95	9000.00	9000.00	9000.00	9000.00	
VHP		80000.00		80000.00		80000.00
VHP+	40000.00		40000.00			
VHPe			500.00			
melaco	777.12					
AEHC	8000.00	8000.00	8000.00	8000.00	8000.00	8000.00
AEAC	10000.00	10000.00	9000.00	9000.00	9000.00	73000.00

---- 363 VARIABLE At.L Variavel de folga para atraso na entrega da demanda

(ALL 0.00)

```

---- 458 PARAMETER MargemCRPAAA = 97794883.43 Margem de contribuica
o desconsiderando as
penalizacoes do model
o
PARAMETER R1 = 7.178117E+8 receita total CRPAAA
PARAMETER R2 = 3.947075E+8 receita acucares CRPA
AA
PARAMETER R3 = 3.225849E+8 receita alcoois CRPAA
A
PARAMETER R4 = 519299.81 receita melaco CRPAAA
PARAMETER P1 = 1435335.96 producao total CRPAAA
(ATR equivalente)
PARAMETER P2 = 788547.96 producao acucares CRP
AAA (cristal equivale
nte)
PARAMETER P3 = 323329.36 producao alcoois CRPA
AA (anidro equivalent
e)
PARAMETER P4 = 2709.43 producao melaco CRPAA
A (ATR equivalente)

```

```

---- 458 PARAMETER PUcrpaaaTempo Producao total da crpaaa por produto no te
mpo

```

	Standard	Superior	Especial	Extra	Refinado	VHP
sete		2022.71	500.00		1390.80	10486.98
out		977.29	1500.00	10995.34	19083.34	68513.02
nov		6579.86	1500.00	9074.52	19372.00	72218.80
dez			19545.05	19801.26	19706.00	117480.05
jan		5964.45	20300.00	37552.28	19372.00	90301.16
fev	1000.00	2455.69	9154.95	2576.60	17553.75	91680.49
mar						28319.51
+	VHP+	VHPe	melaco	AEHC	AEAC	AEHren
sete	4465.77			16215.55	5000.00	
out	24725.07			53784.45	10000.00	
nov	50809.16		565.20	16110.57	40706.50	2183.00
dez			1450.51	21707.10	41956.50	2183.00
jan		1500.00	1164.09	19902.38	41112.00	434.00
fev			763.97	13507.09	29622.00	
mar			778.12	8772.87	6603.00	

```

---- 458 PARAMETER PUAcucarSafra Producao total por tipo de acucar e por usi
na (sacos)

```

	Standard	Superior	Especial	Extra	Refinado	VHP
cap						1291976.24
pai		191597.20	10000.00	845208.59		
pri						1345232.93
usc			1040000.00			954582.61
usm						1367444.65
ser						1308865.35
sin	20000.00	168402.80		398460.00		1729442.29
usu						1416095.22
tri				356331.41	1929558.04	166360.69
+	VHP+	VHPe				
pai		30000.00				
pri	732651.69					
ser	454685.90					
sin	89315.33					
usu	323347.07					

```

---- 458 PARAMETER PUALcoolSafra Producao total por tipo de alcool e por usi
na (m3)

```

AEHC	AEAC	AEHren
------	------	--------

ANEXO H – Resultados obtidos no cenário do modelo tático da USC

Resultados obtidos ao rodar o modelo PASUC/N2 com os dados do primeiro planejamento apresentados na seção 5.1.2.

```

                                S O L V E      S U M M A R Y

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS           30      SINGLE EQUATIONS           1,628
BLOCKS OF VARIABLES           15      SINGLE VARIABLES           1,776
NON ZERO ELEMENTS             12,210  DISCRETE VARIABLES           600

      MODEL   Nivel2           OBJECTIVE   w
      TYPE    MIP              DIRECTION  MAXIMIZE
      SOLVER   CPLEX           FROM LINE  972

**** SOLVER STATUS           1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS           1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE         13794646.5498

RESOURCE USAGE, LIMIT         192.915   100000.000
ITERATION COUNT, LIMIT       1167585   500000

----  973 VARIABLE X2.L  variavel de escolha de processos

      sem1      sem2      sem3      sem4      sem5      sem6

proc3      1.00
proc12
proc19
proc24
+      sem7      sem8      sem9      sem10     sem11     sem12

proc9
proc12      1.00
proc13
proc15
+      sem13     sem14     sem15     sem16     sem17     sem18

proc7
proc9
proc13      1.00      1.00      1.00      1.00
+      sem19     sem20     sem21     sem22     sem23     sem24

proc4      1.00
proc7
proc9
proc13
+      sem25

proc6      1.00

----  973 VARIABLE M02.L  Variavel de quantidade de cana moida na semana

sem1 30763.51,   sem2 50633.69,   sem3 45298.99,   sem4 47854.42
sem5 44175.30,   sem6 53666.48,   sem7 49833.16,   sem8 53468.11
sem9 49588.25,   sem10 52744.99,  sem11 40489.44,  sem12 51194.31
sem13 47326.26,  sem14 50368.68,  sem15 46770.91,  sem16 43604.01
sem17 40489.44,  sem18 49877.29,  sem19 42046.17,  sem20 48679.66
sem21 44108.95,  sem22 43604.01,  sem23 40489.44,  sem24 43604.01
sem25 39320.50

----  973 VARIABLE M12.L  Variavel de decisao de quantidade de cana por fonte
                                de suprimento

      sem1      sem2      sem3      sem4      sem5      sem6

Mprop      30763.51  50633.69  45298.99  47854.42  17670.12  53666.48

```

Mforn					26505.18	
+	sem7	sem8	sem9	sem10	sem11	sem12
Mprop	19933.26	21387.25	49588.25	34120.93	16195.78	51194.31
Mforn	29899.90	32080.87		18624.06	24293.67	
+	sem13	sem14	sem15	sem16	sem17	sem18
Mprop	18930.50	20147.47	46770.91	17441.61	40489.44	19950.92
Mforn	28395.76	30221.21		26162.41		29926.38
+	sem19	sem20	sem21	sem22	sem23	sem24
Mprop	42046.17	19471.86	44108.95	34883.21	32391.55	43604.01
Mforn		29207.80		8720.80	8097.89	
+	sem25					
Mprop	31456.40					
Mforn	7864.10					
----	973 VARIABLE M22.L Variavel de decisao de quantidade de cana transportada					
	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	sem6
Fprop	28350.00	44100.00	40950.00	44100.00	40950.00	44100.00
Fterc	2413.51	6533.69	4348.99	3754.42	3225.30	9566.48
+	sem7	sem8	sem9	sem10	sem11	sem12
Fprop	40950.00	44100.00	40950.00	44100.00	40489.44	44100.00
Fterc	8883.16	9368.11	8638.25	8644.99		7094.31
+	sem13	sem14	sem15	sem16	sem17	sem18
Fprop	40950.00	44100.00	40950.00	43604.01	40489.44	41650.00
Fterc	6376.26	6268.68	5820.91			8227.29
+	sem19	sem20	sem21	sem22	sem23	sem24
Fprop	38675.00	41650.00	38675.00	41650.00	38675.00	41650.00
Fterc	3371.17	7029.66	5433.95	1954.01	1814.44	1954.01
+	sem25					
Fprop	35700.00					
Fterc	3620.50					
----	973 VARIABLE M32.L Variavel de decisao de quantidade de cana por processo					
	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5	sem6
proc3	30763.51					
proc12						53666.48
proc19		50633.69	45298.99	47854.42		
proc24					44175.30	
+	sem7	sem8	sem9	sem10	sem11	sem12
proc9					40489.44	
proc12	49833.16					
proc13						51194.31
proc15		53468.11	49588.25	52744.99		
+	sem13	sem14	sem15	sem16	sem17	sem18
proc7					40489.44	
proc9				43604.01		
proc13	47326.26	50368.68	46770.91			49877.29
+	sem19	sem20	sem21	sem22	sem23	sem24
proc4	42046.17		44108.95			
proc7				43604.01		

```

proc9                                40489.44    43604.01
proc13                               48679.66

+      sem25

proc6    39320.50

----  973 VARIABLE PU2.L  Variavel de substituicao para eliminar dependencia e
      m kk

      sem1      sem2      sem3      sem4      sem5

EspecialUSC      3029.09    2859.71    3081.46
VHPUSC      2449.80
AEHCUSC      1470.00    1365.00    1470.00    2897.13
AEACUSC      770.57

+      sem6      sem7      sem8      sem9      sem10

VHPUSC      4719.09    4449.42    4399.42    4166.48    4496.89
AEHCUSC      1118.36    1051.23    640.15    594.43    640.15
AEACUSC      829.85    770.57    829.85

+      sem11     sem12     sem13     sem14     sem15

EspecialUSC      4545.43    4214.76    4548.01    4223.16
VHPUSC      3944.57
AEHCUSC      640.15    594.43    640.15    594.43
AEACUSC      780.00    829.85    770.57    829.85

+      sem16     sem17     sem18     sem19     sem20

EspecialUSC      4078.16    4345.43    4550.00    4095.73
VHPUSC      4440.73
AEHCUSC      640.15    302.74    640.15
AEACUSC      840.00    780.00    829.85    392.45    829.85

+      sem21     sem22     sem23     sem24     sem25

EspecialUSC      4550.00    3964.01
VHPUSC      3586.05    3776.72    4404.37
AEHCUSC      335.23    369.31
AEACUSC      434.57    840.00    780.00    840.00    478.75

----  973 VARIABLE C2.L  variavel de disponibilidade de cana para ser processa
      da nos proximos periodos

      sem1      sem2      sem3      sem4      sem5      sem6

Mprop  850000.00    819236.49    768602.81    723303.81    675449.39    657779.27
Mforn  300000.00    300000.00    300000.00    300000.00    300000.00    273494.82

+      sem7      sem8      sem9      sem10     sem11     sem12

Mprop  604112.79    584179.52    562792.28    513204.02    479083.09    462887.31
Mforn  273494.82    243594.92    211514.06    211514.06    192890.00    168596.33

+      sem13     sem14     sem15     sem16     sem17     sem18

Mprop  411693.01    392762.50    372615.03    325844.12    308402.51    267913.07
Mforn  168596.33    140200.58    109979.37    109979.37    83816.96    83816.96

+      sem19     sem20     sem21     sem22     sem23     sem24

Mprop  247962.15    205915.99    186444.13    142335.18    107451.97    75060.41
Mforn  53890.59    53890.59    24682.79    24682.79    15961.99    7864.10

+      sem25

Mprop  31456.40
Mforn  7864.10

----  973 VARIABLE S2.L  Variavel de saldo financeiro para compromissos de saf
      ra

sem1  4430975.23,    sem2  4037309.79,    sem3  3728494.39,    sem4  3446002.22
sem5  2979083.58,    sem6  2766220.21,    sem7  2365769.75,    sem8  2012967.13

```

sem9	1904398.91,	sem10	1698990.15,	sem11	1413355.12,	sem12	1462005.92
sem13	1295940.27,	sem14	1160439.49,	sem15	1216453.21,	sem16	980704.15
sem17	953987.66,	sem18	775459.17,	sem19	787489.22,	sem20	581882.65
sem21	556310.73,	sem22	355728.93,	sem23	81559.71,	sem24	-158601.78
sem25	-139116.65						

---- 973 VARIABLE Ib2.L Variavel de estoque de bagaco por periodo

sem1	2881.66,	sem2	640.67,	sem3	582.42,	sem4	2502.53
sem5	4475.12,	sem6	4922.94,	sem7	3371.10,	sem8	1885.54
sem9	698.28,	sem10	753.50,	sem11	586.68,	sem12	2821.68
sem13	2017.14,	sem14	1243.42,	sem15	715.88,	sem16	676.31
sem17	1604.24,	sem18	1550.11,	sem19	778.81,	sem20	871.61
sem21	720.15,	sem22	711.90,	sem23	4453.13,	sem24	3443.03
sem25	3000.00						

---- 973 VARIABLE Mb2.L Variavel de consumo de bagaco por periodo

sem1	6277.83,	sem2	15054.41,	sem3	11706.57,	sem4	10580.63
sem5	9747.39,	sem6	14009.28,	sem7	15179.68,	sem8	16325.68
sem9	15152.93,	sem10	15014.78,	sem11	11900.49,	sem12	12809.86
sem13	14905.84,	sem14	15987.11,	sem15	14845.17,	sem16	13565.72
sem17	11797.32,	sem18	15933.43,	sem19	14329.05,	sem20	15802.60
sem21	14554.38,	sem22	14246.29,	sem23	9479.81,	sem24	15248.15
sem25	13282.38						

---- 973 VARIABLE VAP2.L Variavel de producao de vapor por periodo

sem1	13183.44,	sem2	31614.26,	sem3	24583.79,	sem4	22219.33
sem5	20469.52,	sem6	29419.48,	sem7	31877.34,	sem8	34283.93
sem9	31821.15,	sem10	31531.04,	sem11	24991.03,	sem12	26900.72
sem13	31302.25,	sem14	33572.92,	sem15	31174.86,	sem16	28488.01
sem17	24774.37,	sem18	33460.20,	sem19	30091.00,	sem20	33185.46
sem21	30564.20,	sem22	29917.21,	sem23	19907.60,	sem24	32021.11
sem25	27892.99						

---- 973 VARIABLE EG2.L Variavel de energia gerada por periodo

sem1	467.44,	sem2	1225.92,	sem3	1082.87,	sem4	857.73
sem5	788.61,	sem6	1305.37,	sem7	1560.00,	sem8	1680.00
sem9	1560.00,	sem10	1482.61,	sem11	1198.12,	sem12	1156.46
sem13	1560.00,	sem14	1680.00,	sem15	1560.00,	sem16	1410.42
sem17	1181.59,	sem18	1680.00,	sem19	1560.00,	sem20	1680.00
sem21	1560.00,	sem22	1519.47,	sem23	810.25,	sem24	1680.00
sem25	1440.00						

---- 973 VARIABLE EE2.L Variavel de exportacao de energia por periodo

sem2	330.22,	sem3	274.35,	sem6	382.60,	sem7	700.98,	sem8	729.01
sem9	676.56,	sem10	540.28,	sem11	498.00,	sem12	221.47,	sem13	694.86
sem14	756.53,	sem15	702.49,	sem16	653.56,	sem17	467.23,	sem18	767.05
sem19	824.92,	sem20	788.31,	sem21	789.12,	sem22	757.86,	sem23	115.51
sem24	933.09,	sem25	744.73						

---- 973 VARIABLE At2.L Variavel de folga de atraso na entrega da meta

	sem2	sem7	sem8	sem9	sem20
AEHCUSC	945.00	1540.98	900.82	306.40	96.34
	+	sem24	sem25		
AEACUSC	111.61	532.85			

---- 995 PARAMETER RecUSC2 = 78301976.33 Receita total da USC
PARAMETER RecUSCpCRPAAA2 = 76322908.11 Receita USC pago pela CRPAAA
PARAMETER MargemUSC2 = 18228645.22 Margem de contribuicao da USC

---- 995 PARAMETER ReceitaSemanalCRPAAA2 Fluxo de receita semanal USC

sem1	16570853.70,	sem2	36831128.92,	sem3	34531880.69
sem4	37200727.41,	sem5	34299102.65,	sem6	43678620.79
sem7	41148815.93,	sem8	45591804.25,	sem9	42885204.65
sem10	46251082.78,	sem11	35238002.51,	sem12	47910373.46
sem13	44445884.75,	sem14	47928587.62,	sem15	44505117.08

sem16 39252284.32, sem17 37335728.52, sem18 46498962.39
 sem19 39597099.74, sem20 44736841.04, sem21 40400655.42
 sem22 37188358.10, sem23 32812951.46, sem24 34760792.75
 sem25 38926391.89

---- 995 PARAMETER CompMetaProd2 Comparativo entre a demanda e a producao da USC

	sem1	sem2	sem3	sem4	sem5
EspecialUSC		3029.09	2859.71	3081.46	
VHPUSC	2449.80	-2449.80			2897.13
AEHCUSC		-945.00	1365.00	1470.00	594.43
AEACUSC					770.57
	+ sem6	sem7	sem8	sem9	sem10
EspecialUSC		-1500.00			
VHPUSC	4719.09	-5447.95	4399.42	4166.48	4496.89
AEHCUSC	1118.36	-5143.77	640.15	594.43	640.15
AEACUSC			829.85	770.57	829.85
	+ sem11	sem12	sem13	sem14	sem15
EspecialUSC	-1500.00	4545.43	4214.76	4548.01	-15321.90
VHPUSC	-13092.73				-874.61
AEHCUSC		640.15	594.43	640.15	-2060.57
AEACUSC	-2700.00	829.85	770.57	829.85	-2769.43
	+ sem16	sem17	sem18	sem19	sem20
EspecialUSC		4078.16	4345.43	4550.00	-16204.27
VHPUSC	4440.73				
AEHCUSC			640.15	302.74	-1187.15
AEACUSC	840.00	780.00	829.85	392.45	-2650.15
	+ sem21	sem22	sem23	sem24	sem25
EspecialUSC	4550.00	3964.01		-9154.95	
VHPUSC			3586.05	-8068.34	-1220.63
AEHCUSC	335.23			-9.10	-40.61
AEACUSC	434.57	840.00	780.00	-2520.00	-421.25

---- 995 PARAMETER CompMetaProdTotal2 Comparativo entre a demanda e a producao da USC

EspecialUSC	84.95,	VHPUSC	1.54,	AEHCUSC	189.18
AEACUSC	-532.85				

---- 995 PARAMETER VapTotal = 709247.22 Producao total de vapor

PARAMETER EnergiaProdTotal = 33986.86 Producao total de energia

PARAMETER EnergiaExpTotal = 13648.75 Exportacao total de energia

PARAMETER ProdAcucarUSC2 = 99815.63 Producao total de acucar na safra USC

PARAMETER ProdAlcoolUSC2 = 27927.65 Producao total de alcool na safra USC

PARAMETER ProdAcucarEquiv2 = 1959082.64 Producao Fabrica em sacos de cristal equivalente na safra USC

PARAMETER ProdAlcoolEquiv2 = 27354.97 Producao Destilaria e m m3 de anidro equivalente na safra USC

PARAMETER ProdCristaEquivTotal2 = 2908199.60 Producao total na safra em cristal equivalente

PARAMETER ProdATRequiv2 = 154089.45 Producao total em ATR