

Otimização do planejamento hierárquico da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético

Rafael Piatti Oiticica de Paiva^a, Reinaldo Morabito^{b*}

^arafael_paiva@hotmail.com, Usina Santa Clotilde S/A, Brasil

^{b*}morabito@ufscar.br, UFSCar, Brasil

Resumo

Neste trabalho apresenta-se um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético. Esta modelagem considera a relação hierárquica existente entre o planejamento anual da cooperativa e o planejamento tático de safra das usinas cooperadas. No nível de decisão da cooperativa, o modelo indica a meta de produção de cada usina e define a política de estocagem e de atendimento da demanda. No nível de decisão de uma usina cooperada, o modelo possibilita definir a quantidade de cana-de-açúcar colhida, a quantidade transportada por prestador de serviço, a seleção dos processos de produção de açúcar, álcool, melaço e energia elétrica. Para resolver os modelos de programação linear e programação inteira mista envolvidos, utilizou-se uma linguagem de modelagem algébrica e um *software* de última geração de programação matemática. Resultados computacionais obtidos em estudo de caso são apresentados como forma de ilustrar e validar a aplicação.

Palavras-chave

Planejamento agregado de safra. Planejamento hierárquico da produção. Programação linear inteira mista. Setor sucroenergético.

1. Introdução

Uma das consequências do processo de redirecionamento estratégico vivido pelo setor sucroenergético nas últimas duas décadas é o aumento da complexidade das atividades de planejamento e controle da produção (PCP) das empresas, em especial na adequação da programação dos processos de produção industriais à logística de cana, açúcar, álcool, melaço e à cogeração de energia elétrica (BELIK; VIAN, 2002; VIAN, 2003; PAIVA, 2009). Essa maior complexidade decorre do crescente número de produtos comercializados (diversificação), da maior quantidade de cana processada por unidade produtora (crescimento da escala), do maior número de usinas pertencentes ao mesmo grupo empresarial (concentração) e da incorporação de outras etapas da cadeia produtiva (verticalização).

Considerando esse cenário enfrentado pelo PCP das usinas, apresenta-se neste artigo um modelo de otimização matemática aplicado ao planejamento agregado de safra de um grupo de usinas cooperadas que busca maximizar a margem de contribuição

do sistema. O modelo adota um horizonte de planejamento de médio prazo (período de um ano) e auxilia 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 auxilia 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 cooperada.

Para tanto, o modelo leva em conta a melhor utilização dos recursos produtivos, os fatores de mercado e, principalmente, o melhor aproveitamento da matéria-prima, de forma a que o planejamento da produção efetivamente apóie as estratégias competitivas adotadas pela empresa. Para atingir este objetivo, propõe-se uma extensão do modelo de seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção – SPDL/PU2, proposto nos estudos anteriores para usinas autônomas diversificadas em Paiva (2006) e Paiva e Morabito (2007, 2009). Outros

trabalhos relacionados com usinas autônomas podem ser encontrados, por exemplo, em Silva (2009) e Carvalho (2009).

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na seção 2, detalha-se o estudo de caso; na seção 3, discute-se a modelagem conceitual adotada; na seção 4, detalha-se o modelo matemático proposto baseado em programação linear (PL) e programação inteira mista (PIM); na seção 5, apresentam-se os resultados computacionais obtidos com a aplicação do modelo no estudo de caso; e, na seção 6, apresentam-se as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2. Estudo de caso

O estudo de caso deste trabalho está baseado em duas organizações, CRPAAA (Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas) e USC (Usinas Santa Clotilde), que compõem um único problema de planejamento hierárquico. A CRPAAA é composta por dez usinas em operação, localizadas no estado de Alagoas, ou seja, na sub-região N/N (Figura 1). Na safra 2007/2008 a soma da cana moída pelas usinas que fazem parte da CRPAAA foi de 11,249 milhões de toneladas (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 (*Very High Polarization*), VHP+ (*Very High Polarization Plus*) e VHPe (*Very High*

Polarization especial); os alcoóis anidro (AEAC), hidratado (AEHC) e hidratado neutro (AEN) e o coproduto melaço. Em termos logísticos, a CRPAAA possui um armazém para açúcar granel, localizado no município de Marechal Deodoro (MD01), que comporta 100 mil toneladas de açúcar, além de 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 m³ de capacidade de armazenagem.

Toda a logística de distribuição de álcool da CRPAAA é administrada pelo *pool* de álcool do estado de Alagoas. Essa 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. Dessa forma, a CRPAAA é responsável pela prospecção do mercado, venda dos produtos, 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 nessas atividades da CRPAAA.

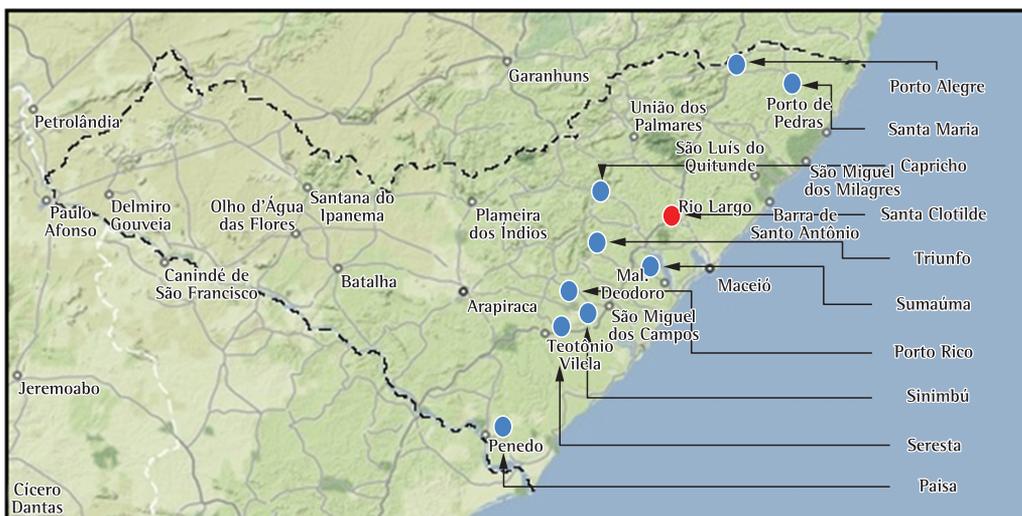


Figura 1. Mapa de localização das usinas da CRPAAA.

Este planejamento é executado com base no histórico de produção das usinas, nas informações do mercado de açúcar e álcool e na relação comparativa entre o preço dos produtos pertencentes ao mix da cooperativa. 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 coproduto melaço e de 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.

Tendo como base a classificação apresentada por Paiva e Morabito (2007), pode-se dizer que a USC é uma usina classe d (usina cooperada diversificada). 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. Entende-se que, apesar do modelo deste estudo 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 a agregação proposta e sobre as características das empresas estudadas podem ser encontrados em Paiva (2009).

3. Modelagem conceitual

Paiva e Morabito (2007, 2009) apresentaram um modelo de otimização de PIM aplicado ao planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. Esse 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. A abordagem do presente estudo desenvolve-se a partir da abordagem de Paiva e Morabito (2007, 2009). A principal diferença entre a presente abordagem e a abordagem anterior é que a anterior não considera o planejamento de uma usina cooperada dependente do planejamento da cooperativa e das outras usinas cooperadas.

O primeiro nível da estratégia de planejamento hierárquico da produção adotada neste estudo corresponde ao planejamento agregado de safra da

cooperativa, considerando todas as usinas cooperadas. O segundo nível corresponde ao planejamento agregado de safra de uma usina desse sistema cooperado em função das decisões do primeiro nível. Dessa forma, enquanto a abordagem anterior pode ser aplicada para usinas não cooperadas e com produção diversificada, a abordagem proposta neste trabalho é apropriada para usinas cooperadas, em particular para usinas que fazem parte da CRPAAA, organização onde o estudo de caso deste trabalho foi realizado. Outra diferença da presente abordagem em relação à anterior é a incorporação da 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.

O modelo PASUC (planejamento agregado de safra em usinas cooperadas), apresentado neste artigo, pode ser caracterizado como um modelo hierárquico de dois níveis. No primeiro nível (planejamento da CRPAAA para o ano safra), tem-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 sequenciamento de lotes para o atendimento das metas do primeiro nível hierárquico.

Além disso, no segundo nível entende-se que os tempos e custos de *setup* são de segunda ordem em relação ao período de análise e, desta forma, podem ser desconsiderados. Assim, adota-se uma visão *tudo ou nada* de produção em períodos de análise semanal. A agregação aqui proposta 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 (para diferentes alternativas de agregação, veja, e.g., Nahmias (2009)).

Existe uma distinção entre o conceito de planejamento hierárquico adotado no modelo PASUC e os clássicos modelos de planejamento hierárquico existentes na literatura (HAX; CANDEA, 1984). Neste artigo, 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 2). Dessa 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. Essa primeira etapa do processo de decisão é convertida em metas de produção de cada produto, para cada uma das

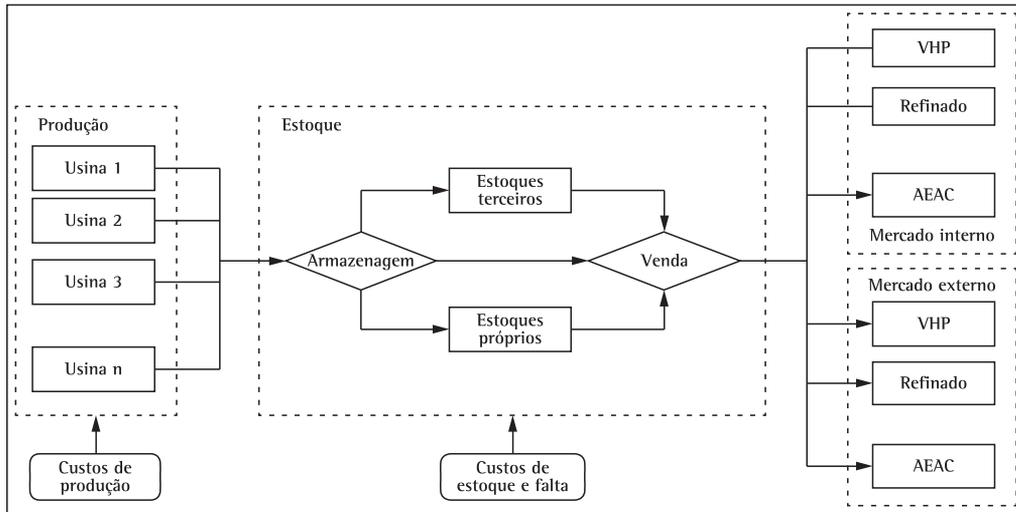


Figura 2. Fluxo de material do primeiro nível de decisão do modelo PASUC.

usinas, em todos os meses de safra. Vale ressaltar que os custos de 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 como despesa de comercialização e, portanto, descontado do valor bruto de venda dos produtos.

No caso das usinas cooperadas (segundo nível de decisão), 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 essa agregação proposta não se reflete nas metas de produção repassadas para o segundo nível de planejamento. A Figura 3 ilustra o fluxo de decisão entre o primeiro e o segundo nível do modelo PASUC.

No segundo nível (tático) do modelo de planejamento agregado, o horizonte passa a ser o período de safra ou um subperíodo dele, dividido em períodos semanais, e existe uma menor agregação com relação ao nível de análise dos processos produtivos da empresa. Nesse nível, o modelo deve selecionar os processos que devem ser utilizados na usina em cada semana de safra e definir o ritmo de moagem considerando questões agrônômicas, questões relativas à capacidade de corte, carregamento e transporte (CCT) e questões industriais, de forma que a melhor margem de contribuição seja alcançada pela usina. Nesse 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 (PAIVA; MORABITO, 2007). Fato que se justifica pelos crescentes níveis de investimento em energia limpa e 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.

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 (turbobombas), na geração de energia (turbogeradores) e no 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 o bombeamento 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).

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). Por outro lado, o consumo de vapor direto apresenta variação em função da moagem de cana. Dessa forma a modelagem da inter-relação entre a moagem, os processos de produção de açúcar, álcool e melaço, 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 4 ilustra de forma simplificada a inter-relação 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 neste artigo, ou seja, todos os custos envolvidos são fixos em função da quantidade de energia cogorada. Dessa forma, o consumo de biomassa (bagaço) é a única variação significativa para a obtenção da receita marginal com a energia elétrica.

4. Modelagem matemática proposta

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

Este modelo determina a quantidade e o mix de produção (PU_{put}) das usinas, a política de estoque

(I_{pet}) e a política de atendimento da demanda (D_{pt}) da CRPAAA. Essas variáveis devem ser calculadas de forma que a margem de contribuição do grupo seja maximizada e as restrições de mercado, previsão de safra, capacidade de transporte das frota e capacidade de estoque sejam respeitadas.

4.1.1. Índices do modelo PASUC/N1

u → Unidades de produção: usinas cooperadas ($u = cap, pai, pal, pri, usc, usm, ser, sim, usu, trñ$);

t → Períodos: meses do ano safra na região nordeste ($t = set, out, nov, dez, jan, fev, mar, abr, maio, jun, jul, ago$);

p → Produtos: produtos/coprodutos da fábrica de açúcar e da destilaria de álcool ($p = Standard, Superior, Especial, Extra, Refinado, VHP, VHP+, VHPe, Melaço, AEHC, AEHCren, AEAC$). Esses produtos são subdivididos 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 coprodutos da fábrica de açúcar ($pm = Melaço$);

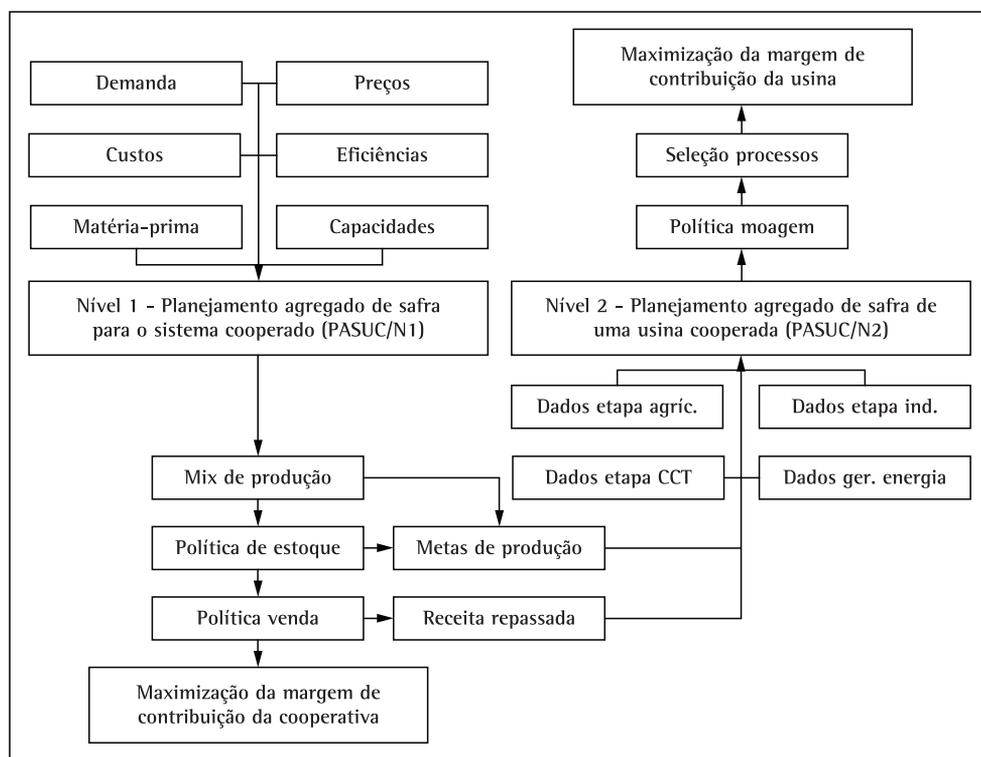


Figura 3. Fluxograma de relacionamento entre os dois níveis do planejamento hierárquico.

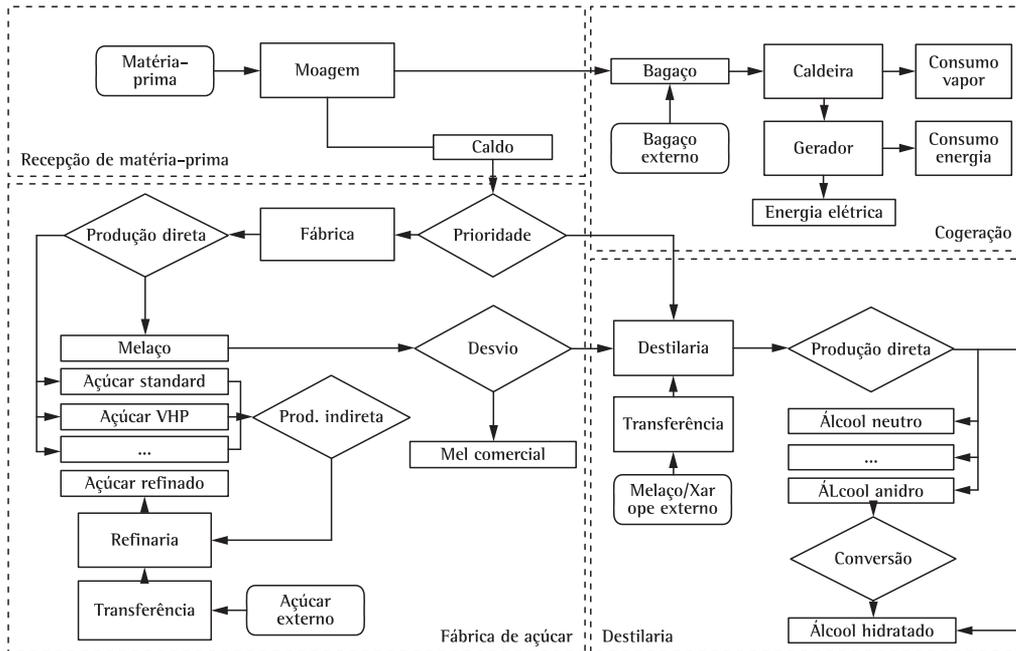


Figura 4. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e energia elétrica.

e → Depósitos: conjunto de depósitos (tanques e armazéns) próprios e de terceiros ($e = tab, jar, MD1, empat, Aterc, usinas, tpetro, Eterc$).

4.1.2. 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 (%);

$\theta_{pa,t}$ → Melado obtido por unidade de açúcar pa produzido na usina u (%);

$Matr_u$ → ATR (açúcares totais recuperáveis) 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);

$Emax_{pe}$ → 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 m³);

CE_{pe} → Custo de estocagem do produto p no depósito e (\$/t ou m³);

CA → Penalização por atraso na entrega da demanda (\$/t ou m³);

$Dmin_{pt}$ → Demanda mínima para o produto p no período t (t ou m³);

$Dmax_p$ → Demanda máxima para o produto p durante todo o ano (t ou m³);

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

C_{uo} → 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 m³);

EP_p → Estoque de passagem de safra do produto p (t ou m³).

4.1.3. Variáveis do modelo PASUC/N1

M_{ut} → Quantidade de cana moída na usina u , no período t (t);

I_{pet}^+ → Estoque do produto p , no depósito e , no final do período t (t ou m³);

I_{pt}^- → Atraso na entrega do produto p , no final do período t (t ou m³);

PU_{put} → Produção do produto p , na usina u , no período t (t ou m³);

D_{pt} → Atendimento da demanda (venda) do produto p , no período t (t ou m³).

4.1.4. Função objetivo e restrições do modelo PASUC/N1

$$\max Z = \left(\sum_t \sum_p VP_{pt} \cdot D_{pt} \right) - \left(\sum_t \sum_u \sum_p CP_{pu} PU_{put} + \sum_t \sum_p \sum_e CE_{pe} J_{pet}^+ + \sum_p \sum_t CA \cdot J_{pt}^- \right) \quad (1)$$

$$\sum_e J_{pet}^+ = \sum_e I_{p,e,t-1}^+ + \sum_u PU_{put} - D_{pt} + I_{pt}^- - I_{p,t-1}^-; \forall p, t \quad (2)$$

$$D_{pt} \geq Dmin_{pt}; \forall p, t \quad (3)$$

$$Dmax_p \geq \sum_t D_{pt}; \forall p \quad (4)$$

$$C_{u0} = \sum_t M_{ut}; \forall u \quad (5)$$

$$Mmin_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut} \leq M_{ut} \leq Mmax_u \cdot n_{ut} \cdot \varphi_{ut}; \forall u, t \quad (6)$$

$$I_{pet}^+ \leq Emax_{pe}; \forall p, e, t \quad (7)$$

$$\sum_e I_{pe}^+ \cdot T'' \geq EP_p; I_{p,T}^- = 0; \forall p \quad (8)$$

$$PU_{put} \leq CPmax_{pu} \cdot n_{ut}; \forall p, u, t \quad (9)$$

$$\sum_{pa} PU_{pa,u,t} \leq CFmax_u \cdot n_{ut}; \forall u, t \quad (10)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \leq CDmax_u \cdot n_{ut}; \forall u, t \quad (11)$$

$$\frac{M_{ut} \cdot ATR_{ut} \cdot Eatr_{ut}}{1000} = \sum_p PU_{put} \cdot Patr_p; \forall u, t \quad (12)$$

$$\sum_{pe} PU_{pe,u,t} \cdot Patr_{pe} + \sum_{pm} PU_{pm,u,t} \cdot Matr_u \geq \sum_{pa} PU_{pa,u,t} \cdot \theta_{pa,u} \cdot Matr_u; \forall u, t \quad (13)$$

$$M_{ut} \geq 0; I_{pet}^+ \geq 0; I_{pt}^- \geq 0; PU_{put} \geq 0; D_{pt} \geq 0; \forall p, e, u, t \quad (14)$$

A função objetivo 1 do modelo estratégico CRPAAA maximiza 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).

A Equação 2 representa o balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t , considerando a possibilidade de atraso na entrega de cada produto. A Inequação 3 é a restrição que

determina o atendimento da demanda mínima do produto p , no período t . Na Restrição 4, a venda do produto p para toda a safra é limitada ao valor de demanda máxima ($Dmax_p$). Esse 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. A Equação 5 é a restrição de utilização de toda a cana disponível na safra, para cada usina u . A Inequação 6 é a restrição de moagem em cada usina u , para cada período t . A Inequação 7 é a restrição de capacidade máxima ($Emax_{pe}$) de estoque para cada produto p , em cada depósito e , nos períodos t . As Inequações 8 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.

As Restrições 9, 10 e 11 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 . A Restrição 12 representa o balanceamento de açúcares totais recuperáveis (ATR) para cada usina u , em cada período t . A Inequação 13 delimita a utilização do melaço produzido como coproduto da fábrica de açúcar, na destilaria anexa da usina u , no período t , ou para venda no mesmo período t . Por fim, em 14 são descritas as restrições de domínio das variáveis do modelo. Note que o modelo PASUC/N1 envolve 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. Mais detalhes sobre o modelo PASUC/N1 podem ser encontrados em Paiva (2009).

4.2. Nível 2 – Planejamento tático de safra de uma usina cooperada incorporando cogeração de energia (PASUC/N2)

O modelo PASUC/N2 pretende determinar a moagem semanal por tipo de fonte de suprimento m (M_{mt}^m), tipo serviço de transporte f (M_{rt}^f) e por processo k (M_{kt}^k), 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 é obter um plano tático de safra que proporcione a máxima margem de contribuição, respeitando as restrições de previsão de safra, capacidade de transporte, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e necessidade de energia térmica e elétrica nos processos industriais.

4.2.1. Índices do modelo PASUC/N2

k → Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e destilaria de álcool ($k = proc1, proc2, \dots, proc252$);

t → Períodos: semanas de safra que indicam o início e o final da moagem ($t = sem1, sem2, \dots, sem25$);

p → Produtos: produtos/coprodutos que podem ser produzidos pela usina ($p = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VHP+, VHPe, Melaço, AEHC, AEAC$). A subdivisão adotada no modelo PASUC/N1 (seção 4.1) também é adotada neste segundo nível de análise (subíndices pa, pe, pm);

m → Matérias-primas: tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) do qual a cana provém ($Mprop$ – cana própria, $Mforn$ – cana de fornecedores). Para

algumas restrições, adota-se o subconjunto das matérias-primas próprias mp ($Mprop$);

f → Frota: determinado de acordo com o tipo de solução de CCT empregada. Neste trabalho, adota-se uma postura simplificada de análise, diferenciando apenas o tipo de prestador de serviço de transporte de cana que está sendo utilizado ($Fprop$ – frota própria de transporte de cana, $Fterc$ – frota terceirizada de transporte de cana).

4.2.2. 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_{rt} → Disponibilidade para transporte dos caminhões da frota f , no período t (%);

CF_{rt} → Custo de corte, carregamento e transporte pela frota f , no período t (\$/t);

CA → Penalização por atraso na entrega da demanda (\$/t ou m³);

$Gfixo$ → 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_{rt} → Gastos variáveis por tipo de frota f , no período t (\$);

$Giro_o$ → Saldo de caixa inicial da empresa (\$);

RCa_p → Repasse CRPAAA – adiantamento da cooperativa pela produção do produto p , no período t (\$/t ou m³);

RCb → Repasse CRPAAA – adiantamento da cooperativa pelo ATR equivalente produzido (\$/kg de ATR);

RCc_t → Repasse CRPAAA – adiantamento extra obtido no período t (\$/sem);

$C_{o→}$ 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);

Ib_o → 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 m^3);

$VAPmax$ → Produção diária máxima de vapor (t/dia);

$EGmax$ → Geração diária máxima de energia (MWh/dia);

VE → Valor da energia vendida (\$/MWh).

Além desses parâmetros, utilizam-se dados calculados pelo método de geração de parâmetros (seção 4.3), que são: $RecA$ (Receita açúcares CRPAAA),

$RecE$ (Receita alcoóis CRPAAA), $RecM$ (Receita melão CRPAAA), $ProdA$ (Produção equivalente açúcares CRPAAA), $ProdE$ (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).

4.2.3. Variáveis do modelo PASUC/N2

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

M_t Quantidade de cana moída no período t (t);

M'_{mt} → Quantidade de cana colhida em cada fornecedor m , no período t (t);

M''_{ft} → Quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte f , no período t (t);

M'''_{kt} → Quantidade de cana moída pelo processo k , no período t (t);

C_{mt} → Quantidade de cana disponível para colheita por tipo de matéria-prima m , no período t (t);

S_t → Quantidade de capital disponível para giro financeiro no período t (\$);

I_{pt}^- → Atraso no atendimento da demanda do produto p , no período t (t ou m^3);

Ib_t → Estoque de bagaço para geração de energia no período t (t);

Mb_t → Quantidade de bagaço consumido para geração de vapor no período t (t);

VAP_t → Quantidade de vapor produzido no período t (t);

EG_t → Quantidade de energia produzida no período t (MWh);

EE_t → Quantidade de energia exportada no período t (MWh).

4.2.4. Função objetivo e restrições do modelo PASUC/N2

$$\max Z = \sum_t \left[\sum_k \left(\sum_{pa} \frac{A_{pa,k,t} M'''_{kt} ConvA_{pa}^{CRPAAA}}{ProdA} RecA + \sum_{pe} \frac{A_{pe,k,t} M'''_{kt} ConvE_{pe}^{CRPAAA}}{ProdE} RecE + \sum_{pm} \frac{A_{pm,k,t} M'''_{kt} Matr_{USC}}{ProdM} RecM \right) + EE_t VE - \left(\sum_m CM_{mt} M'_{mt} + \sum_f CF_{ft} M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} M'''_{kt} + CA \sum_p I_{pt}^- \right) \right] \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^{t'} \sum_k A_{pkt} \cdot M'''_{kt} + I_{pt'}^- \geq \sum_{t=1}^{t'} Meta_{pt}; \quad \forall p, t' \quad (16)$$

$$\sum_m M'_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t; \quad \forall t \quad (17)$$

$$C_{mt} = C_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt}; \quad \forall m, t \quad (18)$$

$$\sum_m C_{m0} = \sum_t \sum_m M'_{mt} \quad (19)$$

$$\sum_{mp} C_{mp,t} \leq Disp_t; \forall t \quad (20)$$

$$\sum_{mf} M'_{mf,t} \leq \alpha_t \cdot M_t; \forall t \quad (21)$$

$$Mmin \cdot n_t \cdot \varphi_t \leq M_t \leq Mmax \cdot n_t \cdot \varphi_t; \forall t \quad (22)$$

$$S_t = S_{t-1} + \left[\sum_p \sum_k (RCa_p + Patr_p RCb) \times A_{pkt} M'''_{kt} (+RCc_t) \right] - \left(\sum_m GM_{mt} M'_{mt} + \sum_f GF_{ft} M''_{ft} + \sum_k GK_{kt} M'''_{kt} + Gfixo \right); \forall t \quad (23)$$

$$M''_{ft} \leq Fmax_f \cdot n_t \cdot \beta_{ft}; \forall f, t \quad (24)$$

$$\sum_k A_{pkt} \cdot M'''_{kt} \leq CPmax_p \cdot n_t; \forall p, t \quad (25)$$

$$\sum_{pa} \sum_k A_{pa,k,t} \cdot M'''_{kt} \leq CFMax \cdot n_t; \forall t \quad (26)$$

$$\sum_{pe} \sum_k A_{pe,k,t} \cdot M'''_{kt} \leq CDMax \cdot n_t; \forall t \quad (27)$$

$$\sum_k X_{kt} = 1; \forall t \quad (28)$$

$$M'''_{kt} \leq G \cdot X_{kt}; \forall k, t \quad (29)$$

$$Ib_t = Ib_{t-1} + \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1 - UB_t} \right) - Mb_t; \forall t \quad (30)$$

$$Ib_t \geq \sum_m \left(M'_{mt} \frac{Fibra_{mt}}{1 - UB_t} \right) \cdot EB; \forall t \quad (31)$$

$$Ib_{T^+} \geq EPb; \forall t \quad (32)$$

$$Mb_t \cdot RC = VAP_t; \forall t \quad (33)$$

$$VAP_t \geq \sum_k M'''_{kt} \cdot CFVAP + \frac{EG_t}{RCF} \geq \sum_k \sum_p CVAP_p \cdot A_{pkt} \cdot M'''_{kt}; \forall t \quad (34)$$

$$EG_t - \left(\sum_k CFE \cdot M'''_{kt} + \sum_k \sum_p CVE_p \cdot A_{pkt} \cdot M'''_{kt} \right) = EE_t; \forall t \quad (35)$$

$$VAP_t \leq VAPMax \cdot n_t; \forall t \quad (36)$$

$$EG_t \leq EGMax \cdot n_t; \forall t \quad (37)$$

$$X_{kt} \in \{0, 1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; C_{mt} \geq 0; \\ I_{pt}^- \geq 0; S_t \geq 0; Ib_t \geq 0; Mb_t \geq 0; VAP_t \geq 0; EG_t \geq 0; EE_t \geq 0; \forall k, m, f, p, t \quad (38)$$

A função objetivo 15 do modelo PASUC/N2 maximiza 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 , em todos os períodos t , considerando a remuneração decorrente da participação percentual do resultado obtido pela CRPAAA e incluindo a receita de energia exportada.

A Restrição 16 representa o atendimento da meta de produção acumulada de todos os produtos p , até o período t . A Equação 17 é a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana colhida (M_{mt}^i), a quantidade de cana transportada (M_{ft}^r), a quantidade de cana por processo (M_{kt}^m) e a quantidade de cana moída (M), em todos os períodos t da safra. A Equação 18 é a restrição de disponibilidade de cana do tipo m no início de cada período de análise t (quantidade de cana no campo). A Equação 19 é a restrição de utilização de toda a cana disponível para colheita de cada tipo de cana m . A Inequação 20 é a restrição de controle de quantidade de cana própria disponível em um período t . A Inequação 21 é a restrição de percentual de cana de fornecedor em toda a cana processada no período t . A Inequação 22 é a restrição de moagem em cada período t . A Equação 23 representa o balanceamento do saldo financeiro em cada período t . A Inequação 24 é a restrição de capacidade de transporte da frota f , em cada período t . As Restrições 25, 26 e 27 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 . A Equação 28 é a restrição de utilização de apenas um processo por período t .

A Restrição 29 determina, em todos os períodos t , que a quantidade de cana por processo (M_{kt}^m) seja nula sempre que o processo k equivalente não esteja sendo utilizado ($X_{kt} = 0$). A Equação 30 representa o balanceamento de estoque de bagaço em cada período t . A Inequação 31 é a restrição de estoque de segurança de bagaço em um período t . A Inequação 32 regula o estoque de passagem de bagaço, ou seja, estoque mínimo de bagaço no último período de safra. A Equação 33 modela a produção de vapor de acordo com a quantidade de bagaço consumido em cada período t . As Equações 34 apresentam o balanço de vapor de alta e baixa pressão de toda a planta industrial no período t . A Equação 35 modela a quantidade de energia excedente que pode ser comercializada em cada período t . As Inequações 36 e 37 são, respectivamente, restrições de capacidade de produção de vapor e energia elétrica, em cada período t . Por fim, em 38 estão descritas as restrições de domínio das variáveis de decisão do modelo PASUC/N2. Note que esse modelo envolve 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 K, T são binárias, e $T(2P+2M+F+K+20)+2$ restrições. Mais detalhes sobre o modelo PASUC/N2 podem ser encontrados em Paiva (2009).

4.3. Geração de parâmetros do modelo PASUC/N2

4.3.1. 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, a CRPAAA). Esse fato faz com que seja necessário modelar o planejamento de safra das duas empresas e também a inter-relação existente. Considerando a modelagem proposta nas seções 4.1 e 4.2, entende-se que esta hierarquia 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. A seguir, são apresentados os cálculos dos parâmetros utilizados no modelo PASUC/N2, que são obtidos por meio dos resultados do modelo PASUC/N1. Os índices u, t, p (pa, pe, pm), e utilizados aqui são os mesmos do modelo PASUC/N1 e apenas os parâmetros que ainda não foram definidos anteriormente são declarados.

4.3.2. 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);

PU_{put}^* → Valor ótimo encontrado pelo modelo PASUC/N1 para a variável PU_{put} ;

D_{pt}^* → Valor ótimo encontrado pelo modelo PASUC/N1 para a variável D_{pt} ;

$RecA$ → 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 melão 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 .

4.3.3. Cálculos de saída do modelo PASUC/N1

$$RecA = \sum_t \sum_{pa} VP_{pa,t} \cdot D_{pa,t}^* \quad (39)$$

$$RecE = \sum_t \sum_{pe} VP_{pe,t} \cdot D_{pe,t}^* \quad (40)$$

$$RecM = \sum_t \sum_{pm} VP_{pm,t} \cdot D_{pm,t}^* \quad (41)$$

$$ProdA = \sum_t \sum_u \sum_{pa} PU_{pa,u,t}^* \cdot ConvA_{pa}^{CRPAAA} \quad (42)$$

$$ProdE = \sum_t \sum_u \sum_{pe} PU_{pe,u,t}^* \cdot ConvE_{pe}^{CRPAAA} \quad (43)$$

$$ProdM = \sum_t \sum_u \sum_{pm} PU_{pm,u,t}^* \cdot Matr_u \quad (44)$$

$$Meta_{p^{sem2}} = PU_{p,^{USC};^{set}}^* \quad (45)$$

As Equações 39, 40 e 41 fornecem, respectivamente, as receitas ótimas da CRPAAA decorrentes da comercialização dos açúcares pa , dos alcoóis pe , e dos melaços pm em toda a safra. As Equações 42, 43 e 44 fornecem, respectivamente, as produções ótimas 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. Na Equação 45 adotou-se um exemplo para apresentar a correlação entre a produção mensal ótima de cada produto p , por cada usina u , no período t ($PU_{pu,t}^*$), com as metas de produção acumulada de cada produto p até uma determinada semana t ($Meta_{pt}$). Neste exemplo [Equação 45], 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).

4.3.4. Parâmetros da matriz de rendimentos industriais

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; ANDRADE; ALBUQUERQUE, 2002; FERNANDES, 2003; ALBUQUERQUE, 2009), os trabalhos de Paiva (2006, 2009), Paiva e Morabito (2007, 2009) e as recomendações do sistema CONSECANA (CONSELHO..., 2008) como base para definir a formulação da matriz de rendimentos industriais (A_{pkt}). É importante notar que esses cálculos não consideram a energia elétrica por se tratar especificamente do balanço de massa dos processos industriais. O conceito de processo de produção adotado neste artigo é o mesmo conceito apresentado no trabalho de Paiva e Morabito (2007). 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 e apenas os parâmetros que ainda não foram definidos anteriormente são declarados.

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

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

Unidade de medida de sólidos solúveis em uma solução açucarada;

$PzaM$ → Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%);

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

TS_k → Determinação do desvio de caldo para a fábrica em cada processo k (valor unitarizado). Inclui a destinação do caldo primário (TS_1), caldo embebido (TS_2), caldo misto (TS_3), caldo clarificado (TS_4) apresentados na Figura 4;

Pol_k → Polarização dos açúcares produzidos em cada processo k (°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 (%);

$Elbt_t$ → Eficiência da parte comum do processo de fabricação de açúcar e álcool em cada semana t (%);

Efd_t → Eficiência de fermentação/centrifugação e destilação na produção de álcool em cada semana t (%);

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 (%).

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 esses 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). Esse 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 o estudo de caso deste artigo.

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

$$PzaJ_t = PzaC_t - 1; \forall t \quad (46)$$

$$PzaS_k = \frac{Pol_k}{1 - \frac{Umid_k}{100}}; \forall k \quad (47)$$

$$SJM_{kt} = \frac{PzaS_k (PzaJ_t - PzaM)}{PzaJ_t (PzaS_k - PzaM)}; \forall k, t \quad (48)$$

$$SMF = \frac{BMF \cdot PzaM}{100} \quad (49)$$

$$RD_{pe,t} = \frac{R_{pe} \cdot Efd_t}{100}; \forall pe, t \quad (50)$$

$$RA_{pa,k,t} = pc_t \cdot 10 \left(\frac{Elbti_t}{100} \right) SJM_{kt} \cdot TS_k \cdot MAP_{pa,k}; \forall pa, k, t \quad (51)$$

$$RM_{px,k,t} = \frac{pc_t \cdot Elbti_t (1 - SJM_{kt}) TS_k \cdot 100 (1 - TM_k)}{10 \cdot SMF_k}; \forall px, k, t \quad (52)$$

$$RE_{pe,k,t} = \left(\left(\frac{Elbti_t}{10} \right) \left(\frac{RD_{pe,t}}{100} \right) \left(\frac{pc_t}{0,95} (1 - SJM_{kt}) + AR_t \right) TS_k TM_k + \left(\frac{pc_t}{0,95} + AR_t \right) (1 - TS_k) \right) MEP_{pe,k}; \forall pe, k, t \quad (53)$$

$$A_{pkt} = \frac{RA_{pa,k,t} + RM_{px,k,t} + RE_{pe,k,t}}{1000}; \forall p, k, t \quad (54)$$

A Equação 46 (CASTRO; ANDRADE; ALBUQUERQUE, 2002; FERNANDES, 2003) calcula a pureza do caldo misto ($PzaJ$) em cada semana t (%). A Equação 47 (HUGOT, 1977; ALBUQUERQUE, 2009) calcula a pureza dos açúcares produzidos ($PzaS_k$) em cada processo k (%). A Equação 48 (HUGOT, 1977; ALBUQUERQUE, 2009; CASTRO; ANDRADE;

ALBUQUERQUE, 2002; FERNANDES, 2003) calcula a recuperação de açúcares (SJM_{kt}) em cada processo k (%) e em cada período t . A Equação 49 (HUGOT, 1977; ALBUQUERQUE, 2009; CASTRO; ANDRADE; ALBUQUERQUE, 2002; FERNANDES, 2003) determina a quantidade de sacarose (SMF) existente no melaço (%). A Equação 50 (FERNANDES, 2003; CONSELHO...

2008) determina a recuperação teórica da destilaria ($RD_{pa,t}$) para os alcoóis pe , em cada período t (%). A Equação 51 (adaptada de FERNANDES, 2003) determina o rendimento industrial ($RA_{pa,k,t}$) obtido na produção do açúcar pa , pelo processo k , no período t .

A Equação 52 (adaptada de FERNANDES, 2003) determina o rendimento industrial ($RM_{px,k,t}$) obtido na produção do melão px , pelo processo k , no período t . Essa equação é complementar à Equação 53, para os casos em que $TM_k = 0$. A partir dos valores obtidos, tem-se a quantidade de melão px (valores em kg) que será produzida por qualquer processo k em qualquer período t , propiciando a geração de parâmetros de produção do melão. A Equação 53 (adaptada de FERNANDES, 2003) determina o rendimento industrial ($RE_{pe,k,t}$) obtido na produção do álcool pe , pelo processo k , no período t . A Equação 54 determina o rendimento (A_{pkt}) de cada produto p , em cada processo k , no período t . Essa equação é obtida por meio da junção dos rendimentos obtidos nas Equações 51, 52, 53 convertidos para uma unidade

apropriada (t ou m³, para o caso dos açúcares ou alcoóis, respectivamente).

4.3.7. Parâmetros de custo industrial e custo agrícola

A seguir são brevemente descritos os parâmetros e os cálculos para determinar os custos industriais (CK_{kt}) e os custos agrícolas (CM_{mt}); para mais detalhes o leitor pode consultar Paiva (2009).

$cproc$ → Custo de produção de cada kg ART (açúcares redutores totais) em cada processo da USC (\$/kg ART);

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

$Fator_{pa}$ → Fator de conversão de cada álcool pa em etanol absoluto (adimensional);

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

$vATR_t$ → Valor do ATR no período t de fornecimento (\$/kg);

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

$$ConvA_{pa,k,t} = RA_{pa,k,t} \left(\frac{pol_k}{100} \right) \left(1 - \frac{Umid_k}{100} \right) MAP_{k,pa}; \forall pa,k,t \quad (55)$$

$$ConvM_{pm,k,t} = \frac{RM_{pm,k,t} \left(\frac{SMF}{100} \right)}{0,95} + RM_{pm,k,t} \frac{ARm}{100}; \forall pm,k,t \quad (56)$$

$$ConvE_{pe,k,t} = RE_{pe,k,t} \cdot Fator_{pe} \cdot MEP_{k,pe}; \forall pe,k,t \quad (57)$$

$$ARTproc_{kt} = \sum_p \left(\frac{ConvA_{pkt}}{0,95} + ConvM_{pkt} + \frac{ConvE_{pkt}}{0,6475} \right); \forall k,t \quad (58)$$

$$CK_{kt} = ARTproc_{kt} cproc; \forall k,t \quad (59)$$

$$CM_{mt} = ATR_{mt} \cdot vATR_{mt} + \delta_{mt}; \forall m,t \quad (60)$$

5. Resultados computacionais do estudo de caso

5.1. Resultados do modelo PASUC/N1

O estudo de caso desenvolvido centrou-se na aplicação do modelo PASUC aos dados coletados na CRPAAA e na USC relativos à safra 2007/2008. A implementação e solução computacional do modelo PASUC [Equações 1-38], juntamente com toda a

geração de parâmetros apresentada nesta seção [Equações 39-60], foi desenvolvida por meio da linguagem de modelagem GAMS, versão 22.7, com solver CPLEX 11 em um computador Pentium 4, 3, 2 GHz e 2 GB de memória RAM. Os dados utilizados nesse estudo estão detalhados em Paiva (2009).

Na Tabela 1 é possível comparar a produção total de todas as usinas cooperadas na safra 2007/2008 com o resultado obtido pelo modelo PASUC/N1 para este mesmo dado. Nesta tabela também é apresentada a variação existente entre a alocação de produção

do modelo PASUC/N1 e a produção real da safra 2007/2008 da CRPAAA, sendo possível verificar que existem diferenças no mix de produção sugerido pelo modelo e no mix de produção realmente praticado. Nesse ponto é interessante destacar que a meta de produção total encontrada pelo modelo (coluna [a]) está sendo comparada nesta tabela com a produção real da CRPAAA na safra 2007/2008 (coluna [b]). Essa comparação deve ser vista como ilustrativa, dado 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. Essas modificações não foram incorporadas no modelo PASUC/N1, pois os dados utilizados referem-se ao planejamento e à

projeção da produção executados em agosto de 2007, portanto, antes do término da safra que ocorreu em abril de 2008.

O resultado obtido para a variável de atendimento da demanda (D_{pt}) é apresentado na Tabela 2, onde é interessante destacar a coluna de saldo de demanda, ou seja, quantidade que ainda é possível destinar para venda. Nessa coluna percebe-se que os açúcares Especial, Extra e os alcoóis AEAC e AEHC estão com saldo nulo, que são os produtos que propiciam a maior margem de contribuição para o cenário analisado. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre a receita e a margem de contribuição obtidas pelo planejamento de safra da CRPAAA e pelo modelo. Os resultados apresentados para esse comparativo são obtidos

Tabela 1. 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.			
Standard	-	-	-	-	1.000	-	-	1.000	1.670	-40
Superior	2.023	977	6.580	-	5.964	2.456	-	18.000	20.510	-12
Especial	500	1.500	1.500	19.545	20.300	9.155	-	52.500	47.447	11
Extra		10.995	9.075	19.801	37.552	2.577	-	80.000	76.003	5
Refinado	1.391	19.083	19.372	19.706	19.372	17.554	-	96.478	90.593	6
VHP	10.487	68.513	72.219	117.480	90.301	91.680	28.320	479.000	530.110	-10
VHP+	4.466	24.725	50.809	-	-	-	-	80.000	80.000	0
VHPe	-	-	-	-	1.500	-	-	1.500	1.500	0
Melaço	-	-	565	1.451	1.164	764	778	4.722	7.901	-40
AEHC	16.216	53.784	16.111	21.707	19.902	13.507	8.773	150.000	145.168	3
AEAC	5.000	10.000	40.707	41.957	41.112	29.622	6.603	175.000	175.599	0
AEHren	-	-	-	2.183	2.183	434	-	4.800	4.800	0

Tabela 2. Resultados de atendimento da demanda por produto (t ou m³) – PASUC-N1.

Produtos	Demanda mínima ($D_{min_{pt}}$)	Demanda máxima ($D_{max_{pt}}$) [c]	Demanda atendida ($\sum_c D_{pt}$) [d]	Saldo demanda [c-d]	Atraso (Γ_{p-tr})	Estoque inicial ($\sum_{pc} I_0$)
Standard	3.000	53.500	3.000	50.500	0	2.000
Superior	18.000	53.500	18.000	35.500	0	0
Especial	18.000	53.500	53.500	0	0	1.000
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	1.000
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	5.000
AEAC	116.000	180.000	180.000	0	0	5.000
AEHren	4.800	5.000	4.800	200	0	0

Tabela 3. 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

com a fixação das variáveis do modelo PASUC/N1 de acordo com a solução sugerida pelo planejamento da CRPAAA. Dessa forma, pretende-se comparar os dois resultados por meio dos mesmos critérios, parâmetros e restrições. Analisando-se a Tabela 3, percebe-se um resultado com margem de contribuição 6,75% superior ao resultado do planejamento da CRPAAA.

5.2. Resultados do modelo PASUC/N2

Para analisar os dados obtidos para o modelo PASUC/N2 destaca-se inicialmente a Figura 5, 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. Nessa 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 em torno de 40.000 a 50.000 t 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 nesse período e um decréscimo progressivo da moagem semanal nos períodos seguintes (semanas 16 a 25).

Esse comparativo de moagem não permite uma análise conclusiva sobre a tática de moagem imposta pelo modelo PASUC/N2. Esses resultados auxiliam apenas na validação do modelo. 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, 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.

Outro dado interessante é o comparativo planejado/realizado dos valores de energia elétrica média gerada por tonelada de cana processada. A Figura 6 apresenta esse 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. Na Figura 7 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 6). Esses 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.

Outra possibilidade de análise proporcionada pelo modelo PASUC/N2 é a obtenção de uma projeção de saldo financeiro durante o período de análise. A Figura 8 apresenta a projeção obtida para os dados do planejamento da safra 2007/2008 da USC. Para finalizar a análise dos resultados do modelo PASUC/N2, apresentam-se alguns itens que sintetizam valores de

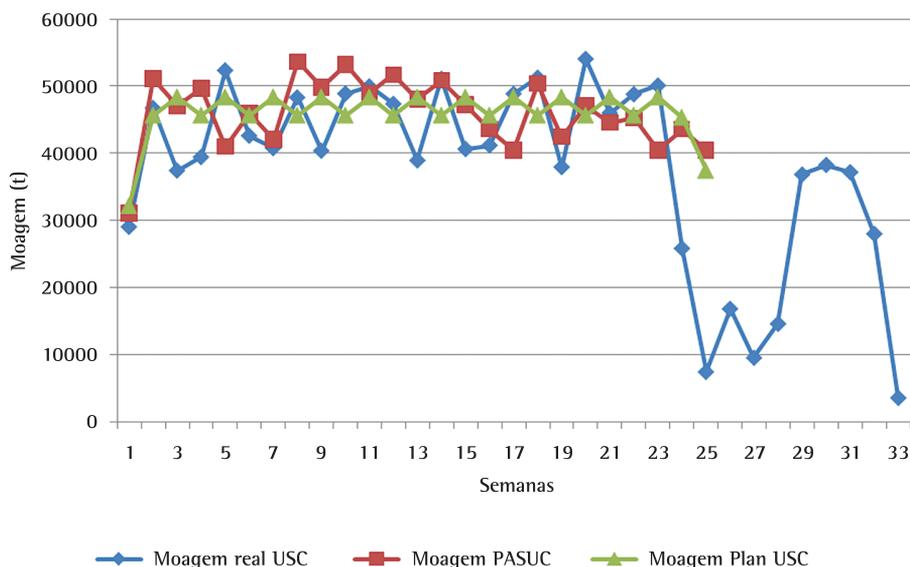


Figura 5. Comparativo moagem modelo PASUC/N2, moagem planejada pela USC e moagem real.

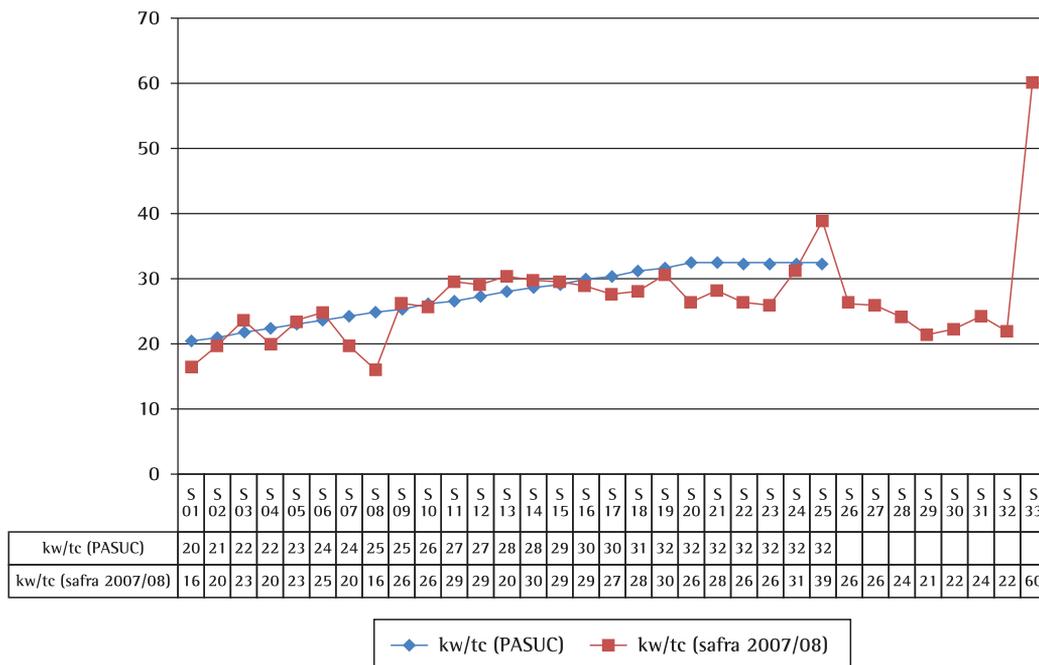


Figura 6. Comparativo de geração de energia por tonelada de cana – PASUC/N2.

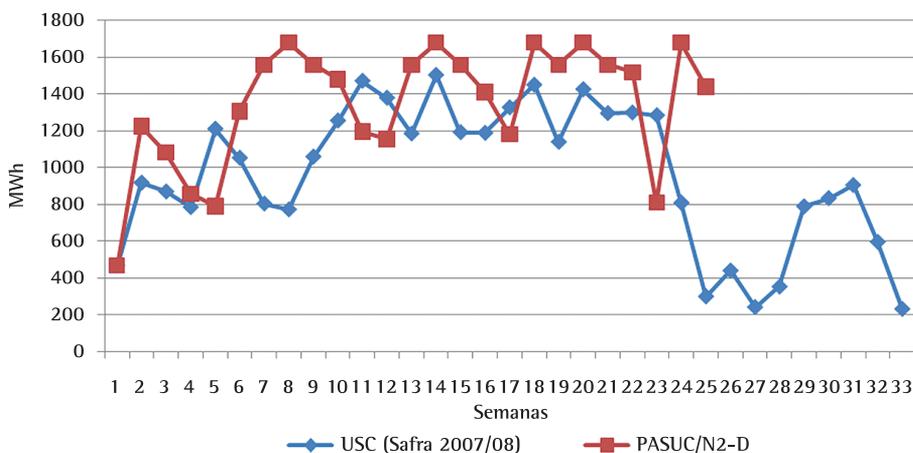


Figura 7. Geração de energia planejada pelo modelo PASUC/N2 e dados da safra 2007/2008.

produção, receita e margem de contribuição tanto para o modelo proposto quanto para o planejamento da USC. Nesse comparativo adotou-se o mesmo critério utilizado 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 4) é o valor da margem de contribuição total da USC (função objetivo do modelo PASUC/N2). Analisando-se esse dado percebe-se que o modelo PASUC/N2 foi capaz de encontrar um resultado com

margem de contribuição 4,98% superior ao resultado planejado pela USC.

Os testes reportados consideram um total de 3.121 variáveis e 3.875 restrições para o caso do modelo PASUC/N1 de PL do primeiro nível hierárquico. No modelo PASUC/N2 de PIM do segundo nível de decisão, tem-se um total de 13.176 variáveis, sendo 6.300 binárias, e 7.452 restrições. O tempo computacional para obtenção dos resultados do modelo PASUC/N1 foi menor que 1 segundo, enquanto o tempo computacional para encontrar o ótimo global (*gap* 0%) do modelo PASUC/N2 foi de cerca

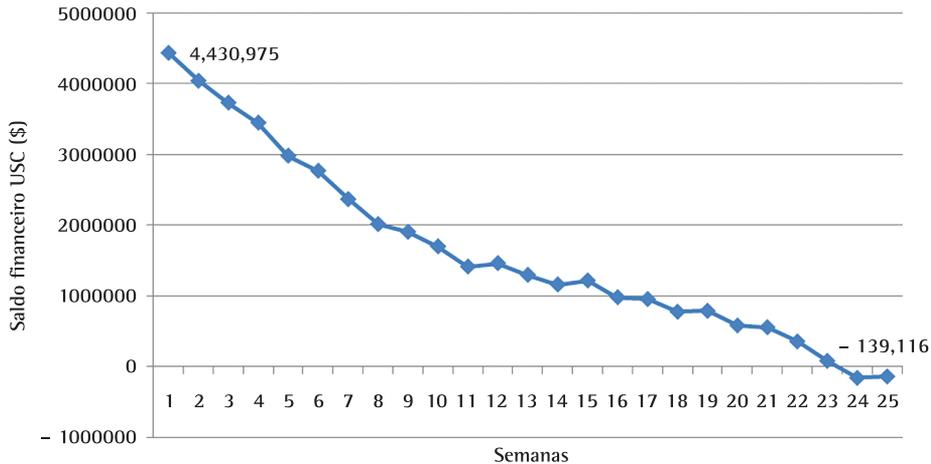


Figura 8. Projeção de saldo financeiro da USC segundo o modelo PASUC/N2.

Tabela 4. 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] (%)
Standard	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
Produção total					
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

de 3 horas. Todos os valores reportados se referem a soluções comprovadamente ótimas pelo CPLEX e o tempo computacional obtido pode ser considerado aceitável para apoiar as decisões práticas inerentes ao planejamento da produção das organizações estudadas.

6. Conclusões

Em função dos resultados da seção 4, pode-se afirmar que o modelo PASUC 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, podem-se destacar os seguintes pontos: a) proporcionar integração entre os níveis de planejamento da cooperativa e da usina; b) transformar em rotina as considerações e os fatores relevantes no processo de tomada de decisão; c) facilitar a geração e

análise de cenários; d) liberar os decisores para atuarem melhor em problemas incomuns dentro do dia a dia da empresa; e) propiciar uma visão mais clara sobre o planejamento e o processo produtivo modelado.

O modelo PASUC 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 estabelecidas 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. Os resultados obtidos com o modelo PASUC/N1 podem ser repassados às usinas para que sejam atualizados os modelos PASUC/N2 de cada unidade e para que o plano de safra seja criticado pelas usinas. Esse processo continua até que o plano de safra convirja para uma solução factível e de boa qualidade para ambas as partes. Além disso, sinergias podem ser atingidas com a adoção de uma estratégia

de safra que incorpore de forma integrada as questões de produção, logística e comercialização dos produtos.

Os resultados encontrados nos experimentos realizados neste trabalho são promissores e encorajam as seguintes investigações futuras: a) avaliar de forma mais ampla a cogeração de energia elétrica, incorporando a utilização de pontas e palhas, que atualmente são queimadas ou deixadas no canal; b) validar o modelo proposto para as condições de balanço térmico com geração de energia elétrica com turbinas de condensação; c) integrar o modelo PASUC e outros modelos que tratam de decisões da área agrícola e CCT; d) adotar a estratégia de pesquisa-ação para validar a utilização do modelo proposto com a estratégia de horizonte rolante, com periodicidade semanal ou quinzenal, rodando novamente o modelo após as atualizações de dados de entrada decorrentes de acontecimentos dos períodos anteriores.

Agradecimentos

Agradecemos aos revisores anônimos deste artigo pela valiosa contribuição, à Usina Santa Clotilde e à Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool de Alagoas pelo apoio e pelo fornecimento de dados na realização desta pesquisa.

Referências

- ALBUQUERQUE, F. M. *Processo de fabricação de açúcar*. Recife: Ed. Universitária UFPE, 2009.
- BELIK, W.; VIAN, C. E. F. *Desregulamentação estatal e novas estratégias competitivas da agroindústria canavieira em São Paulo*. In: MORAES, M. A. F. D.; SHIKIDA, P. F. A. (Orgs.). *Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.
- CARVALHO, M. D. *Proposta de um modelo de planejamento agregado da produção numa usina de açúcar e álcool vinculado à flutuação de preços em mercados à vista e no mercado futuro*. 2009. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- CASTRO, S. B.; ANDRADE, G. T. C.; ALBUQUERQUE, F. M. Engenharia e processamento do açúcar. In: USINA SANTA CLOTILDE. *Apostila de treinamento e consultoria*. USINA SANTA CLOTILDE, 2002.
- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DE ALAGOAS – CONSECANA-AL. *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 ago. 2008.
- FERNANDES, A. C. *Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar*. Piracicaba: EME: STAB, 2003.
- HAX, A. C.; CANDEA, D. *Production and inventory management*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.
- HUGOT, E. *Manual da engenharia açucareira*. v. I e II. São Paulo: Mestre Jou, 1977.
- NAHMIAS, S. *Production and operations analysis*. 6. ed. McGraw-Hill, 2009.
- PAIVA, R. P. O. *Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool*. 2006. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- PAIVA, R. P. O. *Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- 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, p. 25-41, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2007000100004>
- 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*, v. 169, p. 117-130, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-008-0428-9>
- SILVA, A. F. *Modelagem do planejamento agregado da produção de uma usina sucroalcooleira*. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.
- VIAN, C. E. F. *Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização*. Campinas: Átomo, 2003.

Optimization of the hierarchical production planning of a cooperative society of sugarcane milling companies

Abstract

The main concern of this work is related to the presentation of an aggregate production planning model of a cooperative society of sugar and alcohol milling companies. This mathematical model is based on a hierarchical approach between the annual planning problem of the cooperative and the tactical planning horizon of the sugarcane mills. At 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. At the milling companies' level, a process selection model aims at helping the decision makers to determine the following: quantity of sugarcane crushed; selection of sugarcane suppliers; selection of sugarcane transport system; and selection of industrial processes used in sugar, alcohol, molasses and energy production. In order to solve the linear and mixed integer mathematical models involved, a modeling language with an optimization solver was applied. Computational results are presented and analyzed with real data application.

Keywords

Aggregate production planning. Hierarchical planning. Mixed integer linear optimization. Sugarcane mills.