

Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool

Rafael Piatti Oititica de Paiva

Reinaldo Morabito



Resumo

Neste trabalho apresentamos um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção de usinas de açúcar e álcool. Este modelo se baseia nos modelos clássicos de seleção de processos e dimensionamento de lotes para representar o sistema de produção de açúcar, álcool e melação, incluindo decisões da etapa agrícola, das fases de corte, carregamento e transporte de cana e, principalmente, decisões de moagem, escolha do processo produtivo e estoque dos produtos finais. As decisões são tomadas em períodos semanais e o horizonte de planejamento são as semanas de safra. Para resolver o modelo de programação linear inteira mista resultante, utilizamos a linguagem de modelagem GAMS e o solver CPLEX. Um estudo de caso foi realizado em uma usina de açúcar e álcool do estado de Alagoas. Neste estudo foi possível verificar a adequação do modelo proposto quando aplicado para auxiliar nas decisões envolvidas no planejamento agregado da produção de empresas deste tipo. Resultados computacionais são apresentados resolvendo um exemplo com dados de uma safra típica.

Palavras-chave: Planejamento agregado da produção. Seleção de processos. Dimensionamento de lotes de produção. Otimização linear inteira mista. Usinas de açúcar e álcool.

1 Introdução

Após um longo período de controle estatal sobre o mercado de açúcar e álcool, o setor canavieiro enfrenta as conseqüências do processo de desregulamentação ocorrido ao longo de toda a década passada. Esta desregulamentação provocou modificações importantes na dinâmica deste setor, tendo, como algumas de suas conseqüências, a diminuição da competitividade das empresas do nordeste em relação às empresas do centro/sul do Brasil (LIMA; SICSÚ, 2001; MORAES, 2002), o crescimento acelerado do volume de cana processada no Brasil (UNICA, 2005) e a modificação das estratégias competitivas adotadas pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira. Dentre estas modificações, podemos destacar: o aprofundamento da especialização na produção de açúcar e álcool; a busca por diferenciação de produto; a diversificação produtiva; a concentração do setor por meio de fusões e aquisições; e a formação de grupos de comercialização (ou *pools*) de açúcar e álcool (BELIK; VIAN, 2002; VIAN, 2003).

Outra conseqüência deste processo de re-direcionamento estratégico das empresas do setor sucroalcooleiro

é a crescente dificuldade que os profissionais de planejamento e controle da produção (PCP) estão tendo para programar os processos de produção das usinas e destilarias. Esta dificuldade decorre do aumento da complexidade na programação dos processos que são utilizados para a produção de um maior conjunto de produtos, fazendo com que as novas estratégias não sejam adotadas da melhor forma possível, ou sejam até mesmo desconsideradas.

Neste artigo apresentamos um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção, que pretende apoiar parte das principais decisões do PCP de uma usina. Para atingir este objetivo, utilizamos uma combinação de modelos de dimensionamento de lotes monoestágio e seleção de processos de produção, que pode ser visto como um modelo de dimensionamento de “lotes de processos”. Esta combinação permite modelar empresas que possuam processos com produção simultânea de múltiplos produtos, como é o caso das usinas de açúcar e álcool. Outro exemplo aparece em fábricas de grãos eletrofundidos, onde os processos considerados combinam britagem, moagem e classificação dos grãos

em função das várias faixas granulométricas (LUCHE; MORABITO, 2005).

O modelo aqui proposto pretende ajudar a responder questões no médio prazo, tais como: quanto obter de matéria-prima, como transportar esta matéria-prima, quanto e quando produzir de cada produto, quais processos utilizar em cada período e qual política de estoque adotar de forma que a empresa maximize sua margem de contribuição agroindustrial. Apesar deste artigo apresentar resultados obtidos em um estudo de caso de uma usina de açúcar e álcool particular, entendemos que, a semelhança dos processos produtivos das usinas e a flexibilidade do modelo para tratar destas variações fazem com que este modelo seja suficientemente genérico para aplicações em outras empresas.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 apresentamos uma breve revisão sobre a utilização de modelos e métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira; na seção 3 discutimos resumidamente o processo de produção de açúcar, álcool, melão e subprodutos, incluindo uma classificação das usinas em função de suas estratégias de comercialização; na seção 4 descrevemos o modelo de programação linear inteira mista, baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes de produção; na seção 5 detalhamos os resultados computacionais obtidos com a aplicação do modelo no estudo de caso; e, finalmente, na seção 6 analisamos as conclusões do trabalho.

2 Revisão sobre a utilização de métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira

No Brasil, a partir da década de 1990, podemos perceber o surgimento de algumas contribuições sobre a utilização de métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira. Por exemplo, Barata (1992) utilizou programação linear para desenvolver um modelo de avaliação técnico-econômica aplicado às questões relacionadas ao corte e a 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 do tempo de viagem de caminhões utilizados no transporte de cana-de-açúcar. Yoshizaki et al. (1996) aplicaram programação linear para modelar o problema da distribuição centralizada de álcool no sudeste do Brasil. Yamada (1999) utilizou redes Petri atemporizadas para modelar todas as etapas de produção de açúcar e álcool, procurando validar a utilização desta técnica tanto para as etapas discretas quanto para as etapas contínuas desse processo produtivo. Colin et al. (1999) apresentaram um modelo de programação linear para otimização do sistema logístico de distribuição e

armazenamento de açúcar, considerando um depósito central e diversos depósitos secundários. Iannoni e Morabito (2006) estudaram o sistema de recepção de cana de uma usina, utilizando simulação discreta para analisar a logística de transporte de cana. Kawamura et al. (2005) apresentaram um modelo de programação linear, multi-período, para tratar decisões de transporte e estocagem dos produtos de uma cooperativa de comercialização de açúcar e álcool.

Em outros países produtores de cana-de-açúcar (p.ex. Austrália, Cuba, Colômbia), a utilização de modelos e métodos quantitativos aplicados aos problemas da indústria sucroalcooleira já aparece reportada em trabalhos menos recentes. Por exemplo, Whan et al. (1976) 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 transporte ferroviário. Mathew e Rajendran (1993) utilizaram simulação para analisar a programação das atividades de manutenção de uma usina açucareira, onde se pretendeu determinar um bom intervalo entre as paradas para manutenção da usina. Higgins et al. (1998) aplicaram um modelo de programação matemática para a determinação da programação da colheita de cana-de-açúcar ao longo de uma safra. Cock et al. (2000) apresentaram uma metodologia para escolha de variedades de cana por meio da análise do custo total de processamento das variedades. Higgins e Davies (2005) aplicaram simulação computacional para planejar a capacidade do sistema de transporte de cana-de-açúcar. Além destes trabalhos, outros mais recentes apresentam modelos e métodos de otimização matemática aplicados à programação e integração do corte de cana com o transporte desta matéria-prima até a usina (p.ex., HIGGINS et al., 2004; MILAN et al., 2005; HIGGINS, 2006).

Analisando estas publicações, percebemos que existe um esforço crescente em desenvolver e aplicar modelos e métodos quantitativos para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro. O destaque é para 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 corte carregamento e transporte (CCT) e estoque de produtos finais.

Na etapa industrial, os esforços que vêm sendo empregados para modelar o processo de produção de açúcar, álcool e subprodutos estão mais restritos às áreas da 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; VAN WISSEN et al., 2005). Por outro lado, modelos e métodos quantitativos aplicados ao planejamento das atividades da etapa industrial das usinas de açúcar e álcool não estão disponíveis na literatura. Tendo isso em vista e destacando que esta etapa do sistema agroindustrial canavieiro envolve decisões importantes, entendemos que modelos deste tipo também deveriam ser contemplados.

Dentro desta percepção e considerando a crescente tendência de utilização de uma estratégia de diversificação produtiva nas usinas de açúcar e álcool, percebemos a importância de se desenvolver e aplicar modelos quantitativos de planejamento da produção de forma que se possa atingir, da melhor forma possível, os objetivos estratégicos e comerciais da empresa. A Figura 1 ilustra como os vários modelos referidos nesta seção podem ser integrados para proporcionar uma análise completa de todo o processo de produção.

3 Processo de produção de açúcar, álcool, melão e subprodutos

Tendo como base os estudos de Hugot (1977), Payne (1989), ICIDCA (1999), Castro et al. (2002), Fernandes (2003) e Medeiros (2005), podemos subdividir o processo agroindustrial de produção de açúcar, álcool, melão e subprodutos em três etapas principais: etapa agrícola, etapa CCT e etapa industrial. Restringimos a discussão desta seção apenas à etapa industrial, principal foco do modelo proposto. Para maiores detalhes sobre este processo de produção consultar Paiva (2006).

Para ilustrar toda a etapa industrial de produção de açúcar, álcool, melão e subprodutos apresentamos a Figura 2, que representa esquematicamente a planta industrial da Usina Santa Clotilde. Nesta figura podemos

perceber as macro-operações envolvidas no processo de produção de uma usina (pesagem, estocagem, lavagem, preparo/moagem, clarificação do caldo, evaporação, cozimento/turbinação) e de uma destilaria (fermentação/centrifugação, destilação). Também podemos perceber as macro-perdas envolvidas na produção de açúcar e álcool (perdas na água de lavagem, no bagaço, na torta, na fermentação, na vinhaça e perdas indeterminadas), bem como o local onde estas perdas são geradas, entretanto, o mais importante na Figura 2 é perceber o local onde as mudanças de processo podem acontecer, ou seja, os pontos TS 1, TS 2, TM, SJM, 1-SJM, que referem-se aos desvios de fluxo dos produtos semi-acabados no processo. Estes desvios fazem com que os diversos tipos de açúcares, méis e álcoois sejam produzidos por uma combinação de processos, envolvendo estes e outros parâmetros considerados nesta modelagem.

3.1 Classificação das usinas em função de sua estratégia de comercialização

Antes de apresentarmos o modelo de programação matemática, é interessante definir quais tipos de usinas de açúcar estão sendo contempladas por este modelo. Para isso, definimos uma classificação das usinas de acordo com a variedade de produtos e as parcerias estabelecidas com fins de comercialização. Esta classificação está baseada na classificação apresentada por Waack et al. (1998) e em entrevistas realizadas durante visitas a diversas unidades produtoras e empresas de comercialização. No trabalho de Waack et al. (1998), destacamos as categorias analisadas sob a ótica do “marketing” e das “parcerias e criação de consórcios”, como contribuições para a classificação apresentada a seguir (para mais detalhes sobre esta classificação, veja Paiva, 2006):

- a) Usinas autônomas não diversificadas: são usinas que produzem uma pequena variedade de produtos e comercializam de forma independente;

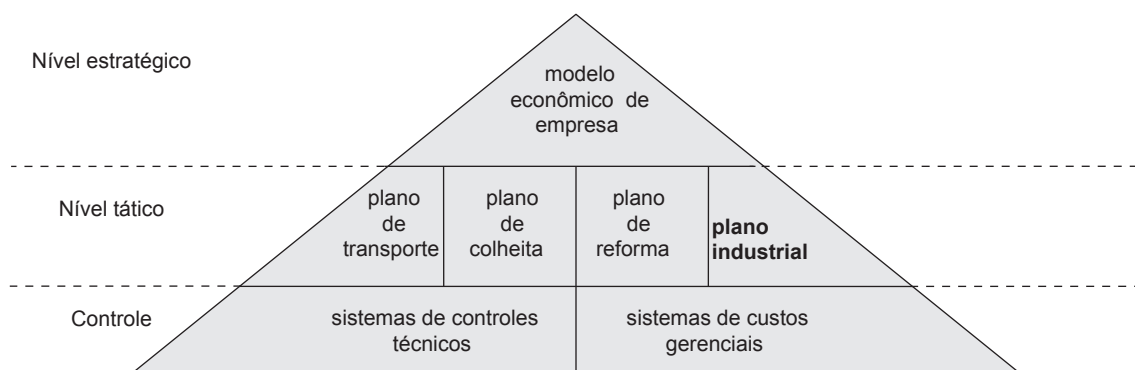


Figura 1. Relação entre modelos e níveis de PCP. Fonte: Brunstein e Tomiya, 1995.

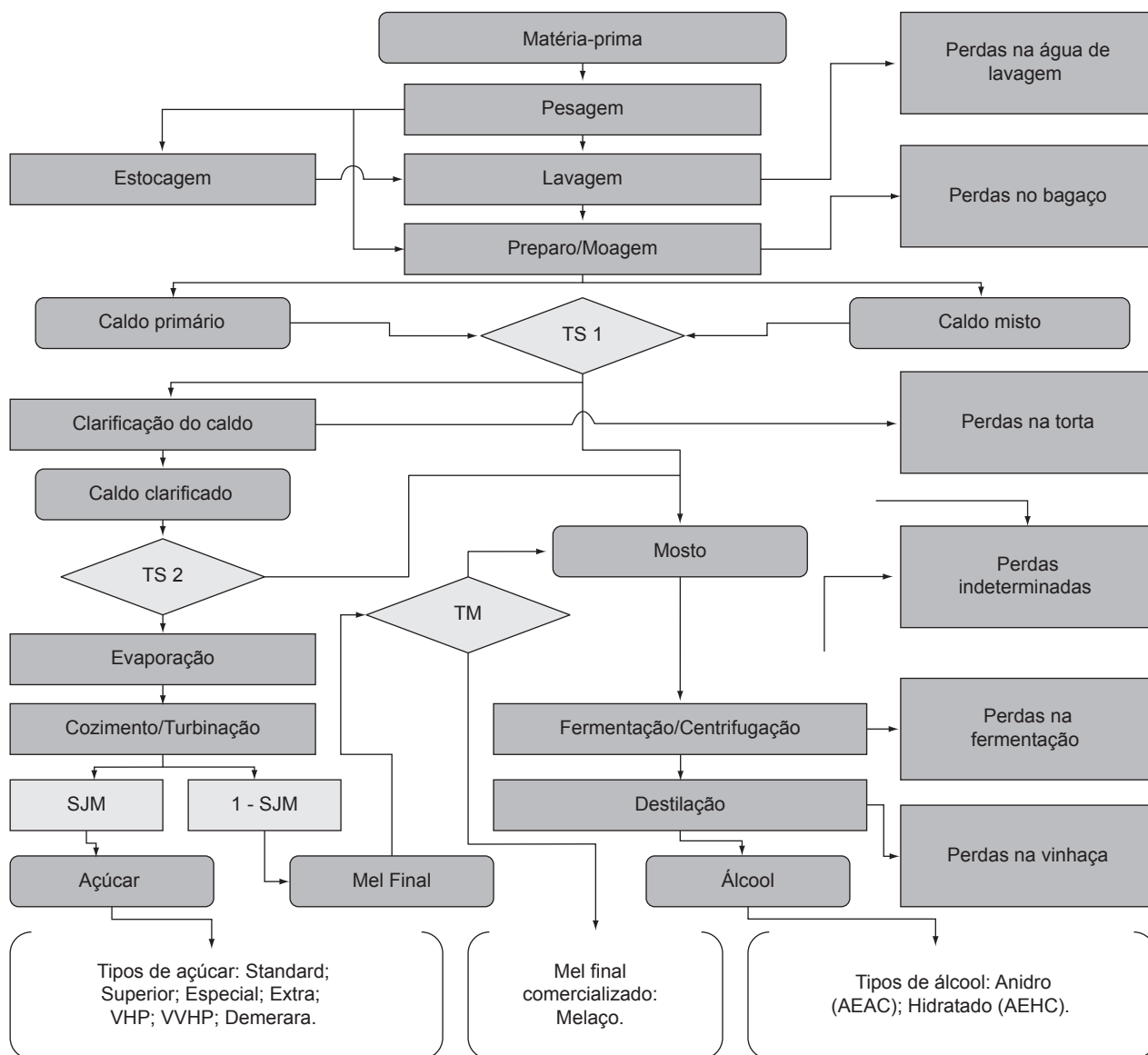


Figura 2. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço.

- b) Usinas autônomas diversificadas: são usinas que produzem uma grande variedade de produtos e comercializam de forma independente;
- c) Usinas cooperadas não diversificadas: são usinas que produzem uma pequena variedade de produtos e comercializam por meio de *pools* ou cooperativas;
- d) Usinas cooperadas diversificadas: são usinas que produzem uma grande variedade de produtos e que comercializam por meio de *pools* ou cooperativas;

Para um melhor entendimento desta classificação, faz-se importante uma distinção sobre o estabelecimento da demanda nestas classes. 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, sob o risco de sofrerem penalidades, ou até mesmo perderem a venda. Para as empresas cooperadas, a demanda é estabelecida por uma meta para todo o período de safra, sendo de responsabilidade das cooperativas a realização da venda e o cumprimento dos prazos de entrega. Esta diferença faz com que o planejamento agregado da produção das usinas cooperadas seja bem mais flexível quanto à exigência de atendimento da demanda.

A classificação apresentada neste artigo propicia uma análise mais específica do sistema de PCP das usinas. Seguindo a classificação dos sistemas produtivos de MacCarthy e Fernandes (2000), 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 da classe **b** e **d** utilizarem estoques intermediários de produtos semi-acabados, para poderem postergar a decisão do *mix* de produção a ser adotado. Podemos citar os estoques de álcool hidratado (AEHC) para posterior conversão em álcool anidro (AEAC) ou em álcool neutro (AEN), estoques de açúcar bruto (p.ex., VHP ou demerara) para conversão em açúcar extra, ou estoques de melaço para conversão em álcool. Com base nas estratégias de comercialização e nos sistemas de PCP característicos de cada uma das classes, o modelo proposto a seguir é mais adequado para auxiliar o tomador de decisão em usinas das classes **b** e **d**, sendo especialmente importante para usinas na classe **b**.

4 Modelagem do problema

Nesta seção apresentamos o modelo combinado de Seleção de Processos e Dimensionamento de Lotes para Produção em Usinas (segunda versão), denominado SPDL/PU2. Nos modelos de seleção de processos, as demandas dos produtos são fixadas ao longo de um horizonte de planejamento. Cada produto pode ser produzido por diferentes processos alternativos. Os custos de produção e os recursos utilizados dependem do processo escolhido. Os recursos têm limites de disponibilidade no período e vários produtos competem por estes recursos, de acordo com o processo de produção escolhido. O problema consiste em determinar o quanto produzir de cada produto em cada processo, de maneira a minimizar os custos de produção, sujeito às restrições de limitação de recursos e atendimento da demanda. Os modelos de dimensionamento de lotes de produção, de forma geral, procuram definir a quantidade de itens a ser produzida em cada período ao longo de um horizonte de tempo finito, de modo a atender à demanda e otimizar um critério, por exemplo, minimizar custos ou maximizar a contribuição ao lucro. Resolver modelos de dimensionamento de lotes torna-se, em geral, bem mais difícil, se considerarmos tempos e custos de preparação (*setup*) de máquinas (problema NP-difícil na teoria de complexidade). Para aplicações de modelos de dimensionamento de lotes em fundições e empresas de nutrição animal, veja, por exemplo, Araújo et al. (2004) e Toso e Morabito (2005). Para mais detalhes dos modelos de seleção de processos e dimensionamento de lotes, veja, por exemplo, Johnson e Montgomery (1974), Hax e Candea (1984), Nahmias (1995), Drexel e Kimms (1997) e Karimi et al. (2003).

Conforme mencionado na seção 1, o modelo combinado SPDL/PU2 pode ser visto como um modelo de dimensionamento de lotes que, em vez de “lotes de produtos”, utiliza “lotes de processos” capazes de produzir simultaneamente um conjunto de produtos. Este modelo determina a moagem semanal (M_i) e os

processos de produção (X_{it}), de forma que a margem de contribuição ao lucro seja maximizada e as restrições de mercado, de previsão de safra, capacidade de transporte das frotas, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e utilização de um e somente um processo por semana, sejam satisfeitas. Este modelo pode ser caracterizado como monoestágio, multi-produto, multi-processo e multi-período (dinâmico). Consideramos que os tempos de preparação (*setup*) são de segunda ordem se comparados com o período adotado e, desta forma, podem ser desconsiderados.

No presente contexto, *setup* são todas as atividades necessárias para efetuar uma troca entre processos de produção. Estas atividades podem ser um simples fechamento e/ou abertura de válvulas, podem ser a troca de um sistema de duas massas para um de três massas ou o início da operação de uma coluna de desidratação. De uma forma geral estas atividades de preparação não apresentam custos nem tempos representativos, dado o período adotado. Por outro lado, sabemos 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). Sendo assim, o tempo de *setup* pode ser incorporado ao percentual de tempo aproveitado durante cada semana e, desta forma, ser retirado do modelo.

Adotamos uma visão “tudo ou nada” de produção em períodos semanais. Esta consideração está baseada na necessidade de um período considerável de tempo para que o processo produtivo atinja índices de produtividade elevados. Desta forma, um grande número de trocas de processos durante um período menor que uma semana pode acarretar em perda de eficiência e, conseqüentemente, perda de rentabilidade da empresa. Portanto, utilizamos um e somente um processo produtivo em cada semana.

Estamos desconsiderando possíveis não-linearidades nos custos de produção (p.ex., quanto maior a qualidade da cana fornecida, menores são os custos dos produtos químicos), nos rendimentos dos processos (p.ex., quanto maior a qualidade da cana fornecida, maiores são os rendimentos dos processos) e na mistura de melaço e caldo para formar o mosto da fermentação do álcool (p.ex., a fermentação alcoólica possui um rendimento um pouco menor quando trabalhamos com mel esgotado no lugar do mel rico).

4.1 Cálculos preliminares do modelo

O cálculo dos rendimentos de cada processo da etapa industrial não é um cálculo imediato. Para estabelecer estes rendimentos é necessário conhecer vários parâmetros que estão relacionados com a qualidade

da matéria-prima, com as eficiências industriais e com a configuração estabelecida para o funcionamento da usina (processos de produção). Isto se deve ao fato de tratarmos de um sistema agroindustrial e, portanto, fortemente dependente de variáveis climáticas, sazonais e de manejo de campo, que influenciam diretamente nas características da matéria-prima e, conseqüentemente, no rendimento industrial obtido.

O próprio setor sucroalcooleiro brasileiro leva em consideração estas peculiaridades no momento de determinar o valor a ser pago pela matéria-prima. Atualmente, o sistema CONSECANA (Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool) sugere a remuneração do fornecedor, por meio do valor do ATR (Açúcares Totais Recuperáveis), levando em consideração o *mix* de produção adotado pelas usinas, o valor médio obtido pela venda dos produtos finais, a qualidade da matéria-prima obtida e a eficiência industrial padrão das usinas da região (CONSECANA-SP, 2005).

No modelo SPDL/PU2, utilizamos a literatura de tecnologia açucareira e alcooleira (HUGOT, 1977; CASTRO et al., 2002; FERNANDES, 2003; MEDEIROS, 2005) e as recomendações do CONSECANA (CONSECANA-SP, 2005; CONSECANA-AL, 2005) como base para definir a formulação dos elementos da matriz de rendimentos (A_{pkt}), que são os parâmetros que determinam a quantidade de produto (açúcares, álcoois e melação), obtida pela utilização de cada processo, em cada período de produção.

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

4.2 Modelo matemático proposto

Tendo discutido o processo de produção de açúcar, álcool, melação e subprodutos, apresentado a classificação das usinas em função de sua estratégia de comercialização, apontado as principais questões de modelagem do problema, passamos a descrever uma série de parâmetros, os quais assumimos lineares em razão do nível de análise desejado.

4.2.1 Índices

- k Processos dentro da fábrica: determinados de acordo com os parâmetros tecnológicos adotados na usina de açúcar e na destilaria de álcool ($k = 1, 2, \dots, 252$);
- t Períodos: determinados pelo planejamento agrícola, estes períodos indicam o início e o final da colheita de cana-de-açúcar ($t = 1, 2, \dots, 23$);
- p Produtos fabricados: produtos que podem ser produzidos pela empresa, tanto na fábrica

de açúcar quanto na destilaria de álcool ($p = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara, Melação, AEHC, AEAC$). 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 ps , pa , px , mostrados a seguir:

- ps Subconjunto de produtos da fábrica de açúcar ($ps = Standard, Superior, Especial, Extra, VHP, VVHP, Demerara$);
- pa Subconjunto de produtos da destilaria ($pa = AEHC, AEAC$);
- px Subconjunto de resíduos da usina ($px = Melação$);
- m Matérias-primas: determinadas de acordo com o tipo de fornecedor (ou fonte de suprimento) da qual a cana provém ($m = cana própria - prop$, cana arrendada - *arr*, cana acionistas - *caci*, cana fornecedor - *cforn*). 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
- e Locais de estoque: determinados de acordo com o local do estoque ($e = estoque próprio - Eprop$, estoque terceirizado - *Eterc*).

4.2.2 Geração de parâmetros do modelo

4.2.2.1 Parâmetros e cálculos dos elementos da matriz de rendimentos (A_{pkt})

- BMF Brix do mel final adotado pela fábrica ($^{\circ}$ Brix);
- $PzaM$ Meta de pureza do mel final adotada na fábrica (%);
- TM_k Desvio de melação para a destilaria em cada processo k (valor unitarizado);
- TS_k Determinação do desvio de caldo para a fábrica em cada processo k (valor unitarizado);
- Pol_k Polarização dos açúcares produzidos em cada processo k ($^{\circ}$ Z);
- $Umid_k$ Umidade dos açúcares produzidos em cada processo k (%);
- R_{pa} Rendimento estequiométrico dos álcoois pa (l/100 kg ART);
- $MAP_{pa,k}$ Percentual dos álcoois pa produzidos em cada processo k (%);

$MSP_{ps,k}$	Percentual dos açúcares ps 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 (%); e
AR_t	Açúcares redutores contidos na cana em cada semana t (%):

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

$$PzaS_k = \frac{Pol_k}{\left(1 - \frac{Umid_k}{100}\right)}, k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$SJM_{kt} = \frac{PzaS_k (PzaJ_t - PzaM)}{PzaJ_t (PzaS_k - PzaM)}, \quad (3)$$

$$k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T$$

$$SMF = \frac{BMF \cdot PzaM}{100} \quad (4)$$

$$RD_{pa,t} = \frac{R_{pa} \cdot Efd_t}{100}, pa = AEHC, AEAC; t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$RS_{ps,k,t} = pc_t \cdot 10 \left(\frac{Elbti_t}{100} \right) SJM_{kt} \cdot TS_k \cdot MSP_{k,ps}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} ps = standard, \dots, demerara; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases}$$

$$RM_{px,k,t} = \frac{pc_t \cdot Elbti_t (1 - SJM_{kt}) \cdot TS_k \cdot 100 (1 - TM_k)}{10 \cdot SMF}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} px = Melaço \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases}$$

$$RA_{pa,k,t} = \quad (8)$$

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

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

$$A_{pkt} = \frac{RS_{ps,k,t} + RM_{px,k,t} + RA_{pa,k,t}}{1000}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} p = standard, \dots, AEAC; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases}$$

A Equação 1 calcula a pureza do caldo misto em cada semana t (%); a Equação 2 calcula a pureza dos açúcares produzidos em cada processo k (%); a Equação 3 calcula

a recuperação de açúcares em cada processo k e em cada período t (%); a Equação 4 calcula quantidade de sacarose existente no melaço (%); a Equação 5 calcula a recuperação teórica da destilaria para os álcoois pa , em cada período t (%); a Equação 6 calcula o rendimento industrial obtido na produção dos açúcares ps , pelos processos k , nos períodos t (kg); a Equação 7 calcula o rendimento industrial obtido na produção do melaço px , pelos processos k , nos períodos t (kg); a Equação 8 calcula o rendimento industrial obtido na produção dos álcoois pa , pelos processos k , nos períodos t ; a Equação 9 determina os coeficientes da matriz de rendimento industrial de cada produto p , em cada processos k , nos períodos t (t ou m³, para o caso dos açúcares ou dos álcoois, respectivamente).

4.2.2.2 Parâmetros e cálculos dos elementos da matriz de custos industrial (CK_{kt})

$cproc$ Custo de produção de cada kg ART em cada processo da USC (u.m./kg ART);

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

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

$$ConvS_{ps,k,t} = RS_{ps,k,t} \cdot \left(\frac{pol_k}{100} \right) \left(1 - \left(\frac{Umid_k}{100} \right) \right) \cdot MSP_{k,ps}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} ps = standard, \dots, demerara; \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases}$$

$$ConvM_{px,k,t} = \left(\frac{RM_{px,k,t} \cdot \left(\frac{SMF}{100} \right)}{0,95} \right) + \quad (11)$$

$$RM_{px,k,t} \cdot \frac{ARm}{100}, \begin{cases} px = Melaço \\ k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \end{cases}$$

$$ConvA_{pa,k,t} = RA_{pa,k,t} \cdot Fator_{pa} \cdot MAP_{k,pa}, \quad (12)$$

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

$$ARTproc_{kt} = \sum_p \left(\frac{ConvS_{pkt}}{0,95} + ConvM_{pkt} + \frac{ConvA_{pkt}}{0,6475} \right), \quad (13)$$

$$k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T$$

$$CK_{kt} = ARTproc_{kt} \cdot Cproc, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (14)$$

A Equação 10 apresenta o cálculo do parâmetro de conversão de açúcares ps em sacarose equivalente, para cada processo k e durante todos os períodos t (kg Sacarose); a Equação 11 apresenta o cálculo do parâmetro de conversão do melaço px , em ART equivalente, para cada processo k e durante todos os períodos t . (kg ART); a Equação 12 calcula o parâmetro de conversão de álcoois pa , em etanol absoluto, para cada processo k e durante

todos os períodos t (L Etanol); a Equação 13 apresenta o somatório de todo o ART produzido, em cada processo k e em cada período t por todos os produtos p (kg ART); a Equação 14 é a determinação do custo de cada processo k , em cada período t , baseado no custo de produção de cada kg de ART (u.m./tc).

4.2.2.3 Parâmetros e cálculos dos elementos da matriz de custos agrícolas (C_m)

$carr$ Custo médio dos contratos de arrendamento (t de cana/ha);

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

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

ATR_t ATR contido na cana (kg/t);

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

$proda_{mp,t}$ Produtividade agrícola de cada tipo de cana mp em cada período t (t/ha);

$$VTCarr_t = ATRarr \cdot pATR_t, t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$VTC_t = ATR_t \cdot pATR_t, t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$C_{\text{"prop"}t} = VTC_t + \delta_{\text{"prop"}t}, m = prop; t = 1, \dots, T \quad (17)$$

$$C_{arrt} = \quad (18)$$

$$VTC_t + \delta_{arrt} + \frac{carr \cdot VTCarr_t}{proda_{carrRt}}, m = arr; t = 1, \dots, T$$

$$C_{\text{"caci"}t} = C_{\text{"cforn"}t} = VTC_t + \delta_{mt}, m = caci, \quad (19)$$

$$cforn; t = 1, \dots, T$$

A Equação 15 apresenta o cálculo do valor da cana arrendada para cada período t (u.m./t); a Equação 16 calcula o valor da cana para cada período t , calculada pelo sistema CONSECANA (u.m./t); a Equação 17 calcula o custo agrícola da cana própria, em cada período t ; a Equação 18 calcula o custo agrícola da cana arrendada, em cada período t ; a Equação 19 calcula o custo agrícola da cana dos acionistas ($C_{\text{"caci"}t}$) e da cana dos fornecedores ($C_{\text{"cforn"}t}$), em cada t . Para mais detalhes dos parâmetros e cálculos anteriores, veja Paiva (2006).

4.2.3 Modelo matemático proposto (SPDL/PU2)

4.2.3.1 Parâmetros do modelo SPDL/PU2

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

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

$Cgiro$ Capital de giro disponível para rodar a safra (u.m.);

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

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

β_{ft} Disponibilidade da frota própria em cada período t (%);

ϕ_t Tempo aproveitado na indústria durante um período t (%);

γ_t Tempo efetivo de moagem durante um período t (%);

$Cest_{pe}$ Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques (t ou m^3) no período t ;

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

h_{pe} Custo variável de estocagem do produto p , por local de estoque e (u.m./t ou m^3);

hs_{pe} Estoque do produto p , por local de estoque e no período de entre safra (u.m./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 (u.m./t ou m^3);

VC_{pt} Adiantamento líquido da CRPAAA pelo produto p , em cada período t (u.m./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 processos k , nos períodos t (t ou m^3);

CK_{kt} Elementos da matriz de custos industrial de cada processo k , nos períodos t (u.m./t de cana);

C_{mt} Elementos da matriz de custos agrícola de cada fonte m , nos períodos t (u.m./t de cana);

4.2.3.2 Variáveis

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

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 ;

4.2.3.3 Função objetivo

$$\max Z = \sum_t \left(\begin{aligned} & \left(\sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) - \\ & \left(\sum_m C_{mt} \cdot M_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} \right) + \\ & \left(\sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e h_{s_{pe}} \cdot I_{pe} \text{sem}23 \right) \end{aligned} \right) \quad (20)$$

Na Equação 20 apresentamos a função objetivo do modelo SPDL/PU2, nela procuramos 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 .

4.2.3.4 Restrições

$$\sum_e I_{pet} = \sum_e I_{p,e,t-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DS_{pt}, \quad (21)$$

$p = Standard, \dots, AEAC; t = 1, \dots, T$

$$\sum_k X_{kt} = 1, t = 1, \dots, T \quad (22)$$

$$\sum_m M_{mt} = \sum_f M''_{ft} = \sum_k M'''_{kt} = M_t, t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$Disp_{mt} = Disp_{m,t-1} - M'_{m,t-1} \geq M'_{mt}, m = prop, \dots, cform, t = 1, \dots, T \quad (24)$$

$$\sum_m Disp_{m1} = \sum_t M_t \quad (25)$$

$$M^{\min} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \leq M_t \leq \quad (26)$$

$$M^{\max} \cdot \frac{\varphi_t}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100}, t = 1, \dots, T$$

$$\sum_p \sum_k VC_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t + C_{giro} \geq \quad (27)$$

$$\left(\begin{aligned} & \sum_m C_{mt} \cdot M_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} \\ & + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} \end{aligned} \right), t = 1, \dots, T$$

$$M'_{cform't} + M'_{caci't} + M'_{cout't} \leq \alpha_t \cdot M_t, t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$M''_{ft} \leq \frac{\beta_{ft}}{100} \cdot \frac{\gamma_t}{100} \cdot CT_f, f = \quad (29)$$

$$F_{prop}, \dots, F_{terc}; t = 1, \dots, T$$

$$I_{pet} \leq Cest_{pe}, p = Standard, \dots, AEAC; \quad (30)$$

$e = Eprop, Eterc; t = 1, \dots, T$

$$M'''_{kt} \leq M^{\max} \cdot X_{kt}, k = 1, \dots, K; t = 1, \dots, T \quad (31)$$

$$X_{kt} \in \{0, 1\}; M_t \geq 0; M'_{mt} \geq M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0; \quad (32)$$

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

A Restrição 21 representa o balanceamento de estoque de cada produto p , em cada período t ; a Equação 22 é a restrição de utilização de apenas um processo por período t ; a Equação 23 é a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana colhida (M'_t), 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 24 é a restrição disponibilidade de cana tipo m no início de cada período de análise t ; a Equação 25 é a restrição utilização total da cana disponível; a Inequação 26 é a restrição de moagem em cada período t ; a Inequação 27 é a restrição de fluxo de caixa em cada período t ; a Inequação 28 é a restrição de quantidade de cana não administrada ($cform, caci$) em cada período t ; a Inequação 29 é a restrição de capacidade de transporte com frota própria em cada período t ; a Inequação 30 é a restrição de capacidade de estoque para cada produto p , em cada local de estoque e , nos períodos t ; a Restrição 31 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 ($X_{kt} = 0$); na Equação 32 estão descritas as restrições de domínio das variáveis de decisão do modelo. Para mais detalhes destas restrições, veja Paiva (2006).

Neste modelo temos P produtos, K processos, M matérias-primas, F tipos de transporte, E tipos de estoque e T períodos. No total temos, $T(P \cdot E + F + 2M + 2K) + 1$ variáveis, onde $K \cdot T$ são binárias, e $T(2M + P \cdot E + P + K + F + 7) + 2$ 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.

5 Estudo de caso e resultados computacionais

A Usina Santa Clotilde (USC) está situada no município de Rio Largo-AL, onde atua na fabricação de açúcar *standard*, superior, especial, extra, demerara, VHP, VVHP, álcool anidro (AEAC), álcool hidratado (AEHC) e melação, além de subprodutos como torta de filtro, bagaço, vinhaça e óleo fúsel. Sua produção de açúcar é vendida no mercado interno de consumo direto, e também exportada para ser refinada. Na safra 2004/2005, a USC processou pouco mais de 1 milhão de toneladas de

cana, com uma moagem média de 320 toneladas de cana por hora, o que totalizou uma produção de 100 mil toneladas de açúcar e 19 mil m³ de álcool. Esta empresa faz parte da Cooperativa Regional dos Produtores de Açúcar e Álcool do estado de Alagoas (CRPAAA) e, portanto, pode ser considerada uma empresa situada na classe **d** quanto à sua estratégia de comercialização (seção 3.1). 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.

O estudo de caso desenvolvido centrou-se na aplicação do modelo SPDL/PU2 aos dados coletados na USC durante a safra 2004/2005. A intenção foi verificar a adequação do modelo e verificar o tempo computacional requerido para sua solução, quando utilizamos dados com ordem de grandeza equivalente aos problemas encontrados na prática. Para essa aplicação foi utilizado um computador pessoal com processador INTEL Pentium IV 3GHz, com 2GB de memória RAM e sistema operacional Windows XP versão 2002 com *service pack 2*. O *software* utilizado foi o GAMS 19.6 aplicando o *solver* CPLEX 7.0. Os dados de entrada utilizados são os parâmetros que estão descritos na apresentação do modelo; os valores adotados para estes parâmetros estão detalhados em Paiva (2006). A seguir apresentamos os resultados do estudo de caso.

Analisando a variação do estoque de produtos acabados durante os períodos de safra (I_{pet}), notamos que só foi

necessário utilizar o estoque terceirizado nas semanas 8, 9 e 10 (Figura 3). Este fato está de acordo com o observado na safra 2004/2005 na USC, onde também foi necessário utilizar o estoque terceirizado para o produto VHP, gerando inclusive uma modificação do processo produtivo por causa da restrição de espaço de estocagem.

Observando a variável de disponibilidade de cana ($Disp_{mi}$) por período, verificamos que toda a cana foi processada durante as 23 semanas que formaram a safra. Na Tabela 1, ilustramos esta afirmação ao apresentarmos que o valor de cana disponível na semana 23 é igual a quantidade de cana moída por cada fonte de fornecimento na semana 23.

Ao avaliarmos o resultado obtido para a variável de quantidade de cana por fonte de fornecimento (M'_{mi}), na Figura 4, constatamos que toda a colheita de cana de fornecedores e acionistas foram executadas entre as semanas 4 e 20, fato que corresponde a realidade da USC nas últimas safras. Outra observação interessante deste

Tabela 1. Disponibilidade de cana e moagem por fonte de fornecimento na semana 23.

Disponibilidade (m, "sem23")		Moagem (m, "sem23")	
Própria	28080 t	Própria	28080 t
Arrendada	0 t	Arrendada	0 t
Acionistas	0 t	Acionistas	0 t
Fornecedores	0 t	Fornecedores	0 t

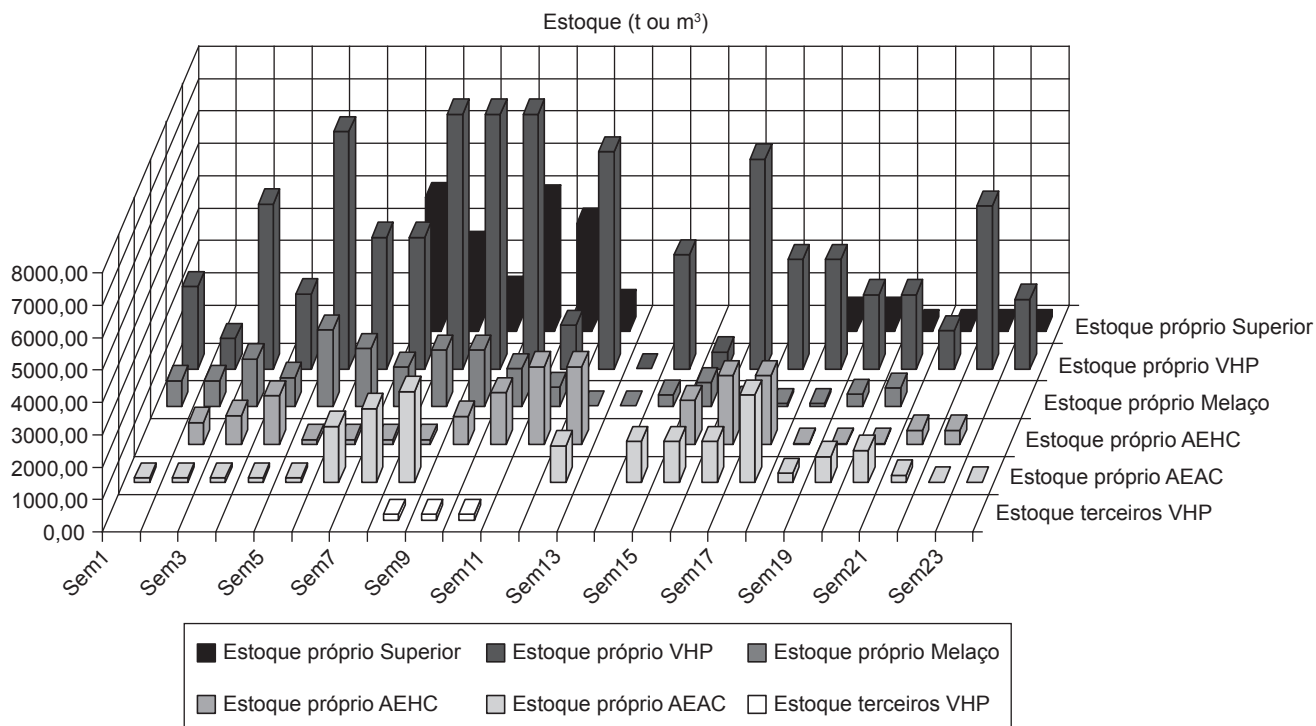


Figura 3. Esquema gráfico da evolução do estoque próprio e terceirizado.

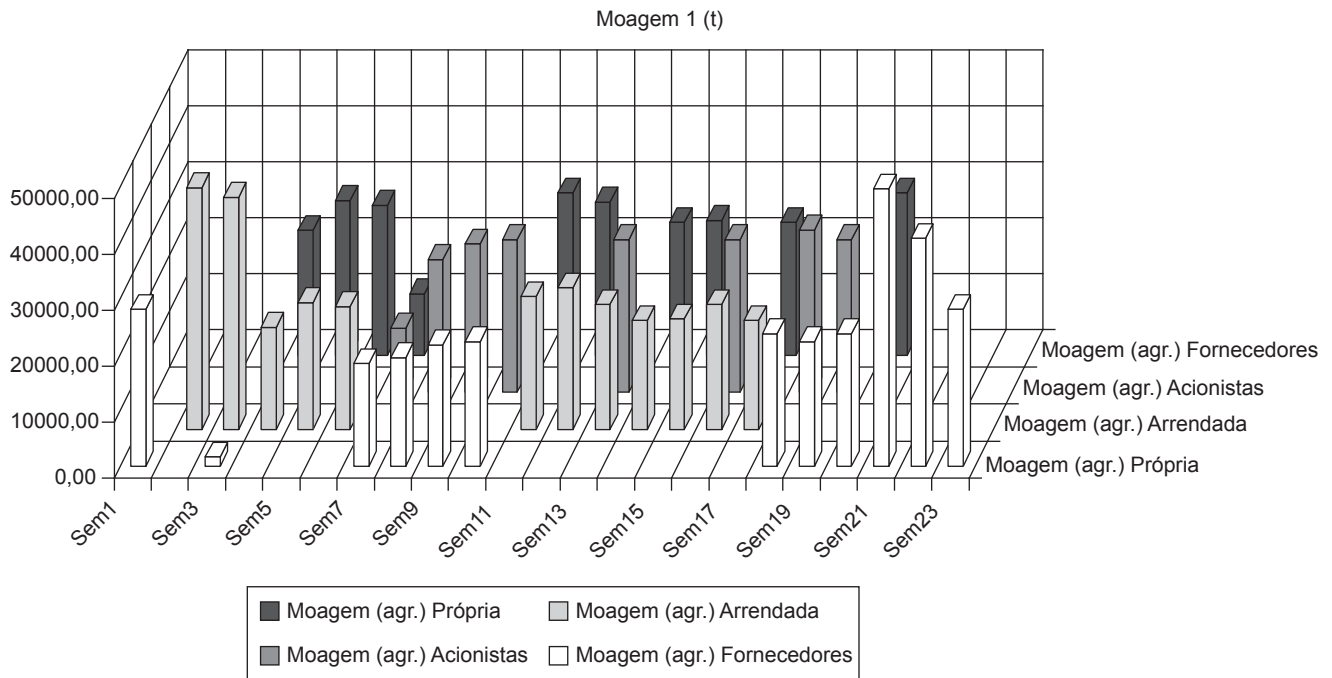


Figura 4. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por fonte de fornecimento.

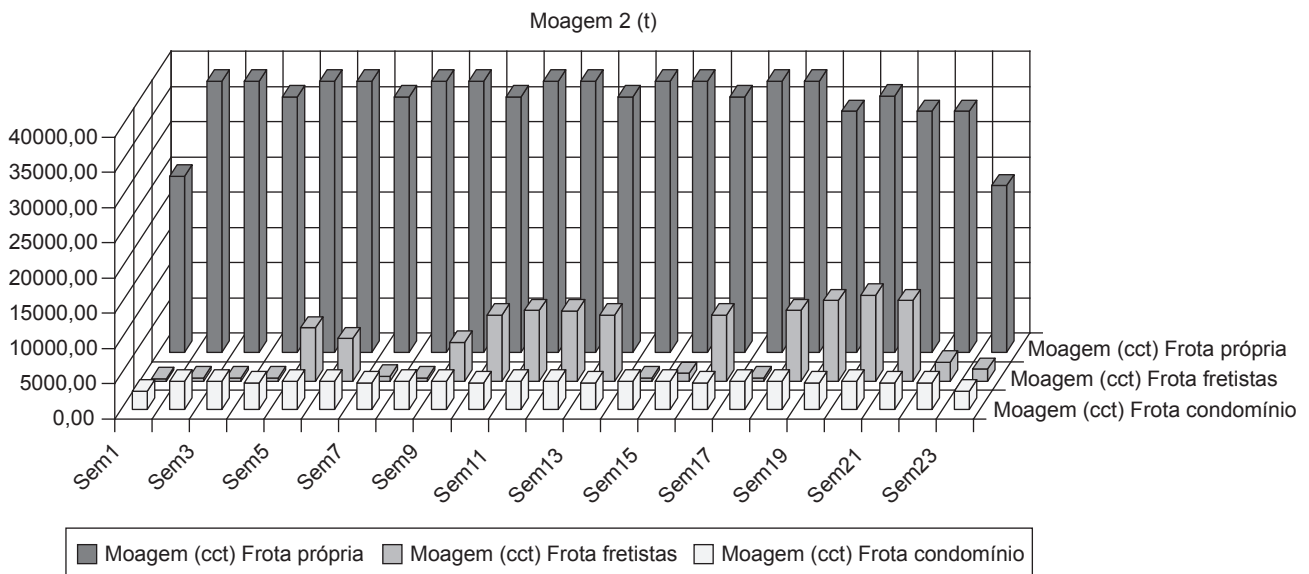


Figura 5. Esquema gráfico da evolução da moagem de cana por serviço de transporte.

resultado é que a colheita da cana de acionistas e da cana de fornecedores não está sendo executada simultaneamente, e o mesmo ocorre com a cana própria e a cana arrendada.

Na análise da variável M''_{ft} , observamos que foi necessário utilizar o frete terceirizado, mesmo com a existência da frota do condomínio (Figura 5). Esta constatação também está de acordo com o acontecido na safra 2004/2005 da USC, onde o custo do transporte terceirizado de cana foi considerado uma dos maiores gastos da safra.

A Figura 6 apresenta a comparação entre a moagem M_t e os dados de moagem real e moagem planejada da USC para a safra 2004/2005. Numa inspeção visual, percebemos que a moagem sugerida pelo modelo tem uma tendência próxima da moagem real da USC, sendo o desvio absoluto médio destas duas séries igual a 6037 toneladas. Este desvio é próximo do desvio absoluto médio do planejamento da USC e da moagem real, que é igual a 6076 toneladas. Esta proximidade e o fato do desvio absoluto médio entre o modelo e o planejamento

da USC ser de 5266 toneladas, mostra que o modelo tem potencial de aplicação prática.

A Figura 7 apresenta o plano de produção encontrado na análise desta safra, ilustrando o comportamento da variável de seleção de processos X_{kt} , e da moagem

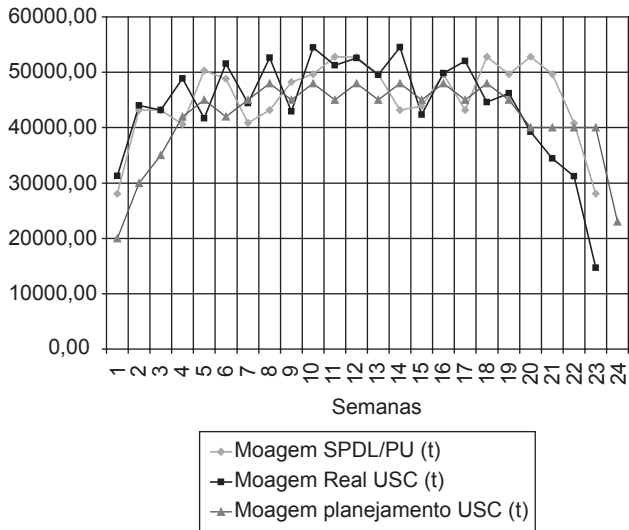


Figura 6. Evolução e comparação da moagem durante a safra

acumulada semanalmente. Nesta figura, percebemos que foram necessários 15 processos diferentes para atender ao plano de moagem. Notamos também que apenas o processo 170 foi utilizado em 3 semanas consecutivas. Em comparação com os processos adotados pela USC, temos que em 7 semanas da safra 2004/2005, o modelo sugere a utilização dos mesmos processos, ou seja, 30% das semanas, o que indica que o plano de produção sugerido pelo modelo é bem diferente do plano executado pela USC.

Na Figura 8 apresentamos a produção de açúcar, álcool e melação em todas as 23 semanas de safra. Analisando esta figura, percebemos que o plano gerado contempla apenas os produtos estabelecidos na demanda (açúcar VHP, açúcar Superior, melação, AEHC e AEAC). Isto indica que a demanda que foi estabelecida utiliza quase toda a totalidade da capacidade da empresa, não restando capacidade excedente para aproveitar as oportunidades do mercado.

Ao utilizar o modelo SPDL/PU2 foi estabelecida uma tolerância admissível de 0,5%, entre a solução encontrada e o limitante superior da melhor solução inteira possível. Isto se deve à dificuldade para atingir a solução comprovadamente ótima, uma vez que, tentativas de alcançar

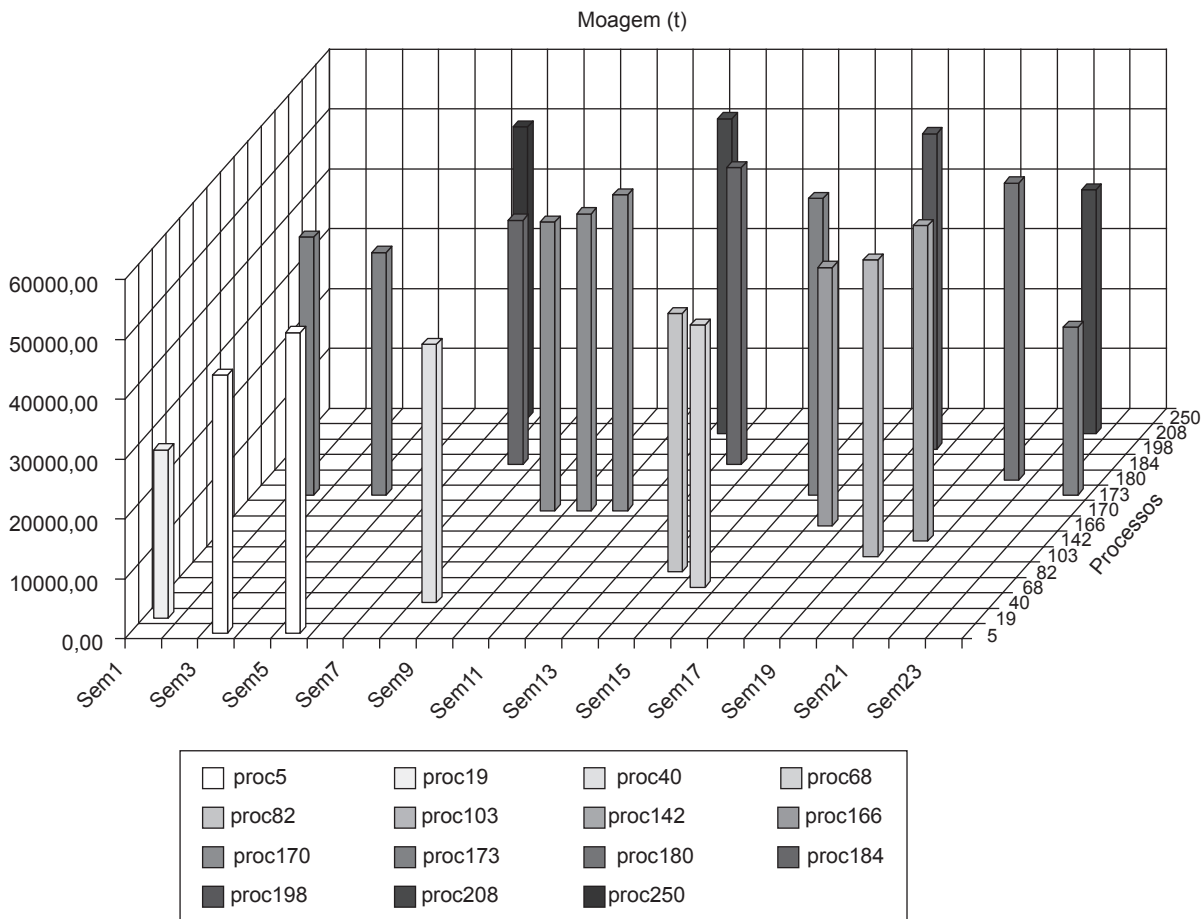


Figura 7. Esquema gráfico do plano de produção.

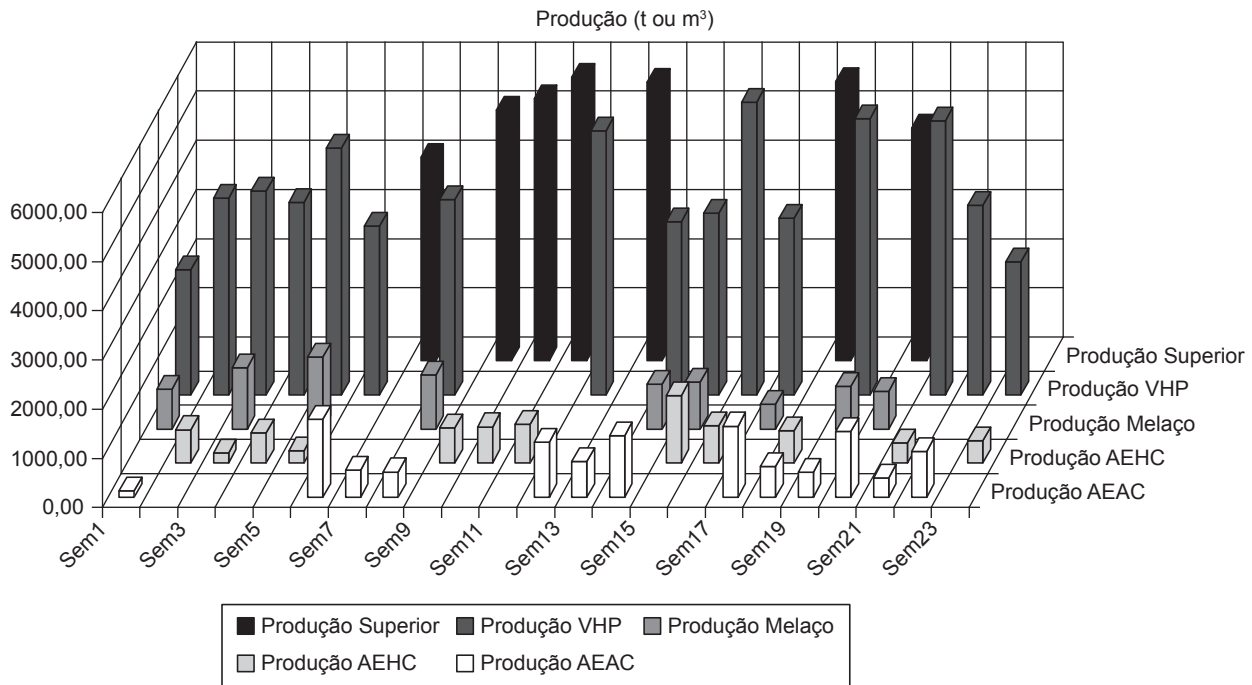


Figura 8. Esquema gráfico de produção.

a otimalidade não obtiveram solução em 12 horas de processamento. Tendo estabelecido esta tolerância, a margem de contribuição encontrada para este cenário final foi de 10,07 milhões de unidades monetárias. Este valor tem um *gap* de 0,33% em relação ao limitante superior da melhor solução inteira possível para este cenário (10,11 milhões de unidades monetárias).

O tempo de processamento computacional requerido para resolver este exemplo com tolerância de 0,5% foi de cerca de 2000 segundos (33 minutos). As primeiras soluções encontradas pelo CPLEX apresentaram resultados com *gap* da ordem de 2,2%, continuando com um avanço rápido até os 200 segundos (*gap* pouco superior a 1,2%) e obtendo uma solução dentro da tolerância (*gap* de 0,33%) com aproximadamente 2000 segundos de processamento.

5.1 Comparação entre os resultados do modelo e os resultados da USC

Para fazer uma comparação adequada dos dados de saída do modelo e os dados da USC na safra 2004/2005, coletamos as decisões adotadas pela USC, que são equivalentes as variáveis de decisão do modelo SPDL/PU2 (X_{kt} , M_t , M'_{mt} , M''_{jt} , M'''_{kt} , $Disp_{mt}$, I_{pet}) e adotamos os mesmos dados de custos e de receita para obter os dados sublinhados da Tabela 2. A intenção é analisar a safra da USC como se o conjunto de decisões que foram tomadas durante a safra fosse um dos possíveis resultados do modelo SPDL/PU2.

Na Tabela 2 apresentamos também os dados de produção total de cada produto, tanto para o modelo

quanto para a USC (SANTA CLOTILDE, 2005). Outro dado interessante de ser observado nesta tabela é o desvio entre os resultados do cenário final e os resultados da USC, apresentados na última coluna. Os dados indicados com as letras maiúsculas e em itálico foram omitidos a pedido da empresa.

Analisando os dados de produção da Tabela 2, percebemos que o modelo indica uma preferência pela produção de açúcar em relação a produção de álcool e melaço, principalmente açúcar VHP (desvio de 4,21%); percebemos também que o AEAC teve preferência em comparação ao AEHC. Em relação à eficiência industrial final, o resultado do modelo SPDL/PU2 foi ligeiramente superior ao resultado obtido pela USC (desvio de 0,10%); a proximidade destes resultados indica que o modelo apresenta potencial de uso na prática.

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

6 Conclusões

Após os resultados obtidos no processo de validação, podemos afirmar que o modelo proposto pode auxiliar de forma importante no planejamento agregado da produção de usinas, proporcionando agilidade, facilidade e confiabilidade nas análises realizadas, abrindo portas para uma

Tabela 2. Comparação dos resultados globais. Fonte: Paiva (2006) e Santa Clotilde (2005).

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

melhor compreensão das variáveis inerentes ao problema, propiciando análises quantitativas eficazes que apóiam o planejamento de safra e propiciando uma melhoria dos resultados financeiros da empresa.

Dentre as vantagens da utilização de modelos deste tipo, podemos destacar:

- transformar em rotina as considerações e os fatores relevantes no processo de tomada de decisões, inibindo julgamentos subjetivos, incompletos e parciais;
- colocar cada tipo de decisão em seu nível apropriado;
- corrigir rapidamente os erros de previsão e as considerações que foram estabelecidas ao tratar os dados de entrada;
- liberar os decisores para atuarem melhor em problemas incomuns dentro do dia-a-dia da empresa;
- melhorar o processo de tomada de decisões por meio de técnicas de otimização e análise de diversos cenários;
- permitir visões mais claras e objetivas do planejamento e processos produtivos modelados; e
- propiciar a integração da etapa industrial com a etapa agrícola, a etapa de CCT e a etapa de comer-

cialização e distribuição em um único modelo matemático de apoio às decisões do planejamento de safra.

Quanto ao tempo computacional necessário para solucionar os cenários e a tolerância estabelecida para o valor da função objetivo (*gap* de 0,5%), entendemos que ambos são adequados. Na prática, é interessante efetuar uma análise em planejamento rolante com horizonte decrescente, e periodicidade semanal, rodando o modelo após eventual atualização de dados de entrada decorrente dos acontecimentos da semana anterior.

Os resultados encontrados nos experimentos realizados neste trabalho são promissores e encorajam as seguintes investigações:

- incorporar o balanço térmico e a geração de energia elétrica para aumentar a aderência do modelo proposto com a realidade das usinas;
- analisar o efeito de incertezas nos parâmetros do modelo por meio de técnicas de restrições de chances e otimização robusta;
- considerar mais de um objetivo, utilizando programação de metas; e
- utilizar metodologias de pesquisa participativa para analisar as vantagens e desvantagens da utilização deste modelo.

An optimization model for the aggregate production planning in alcohol and sugar mills

Abstract

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

Keywords: Aggregate production planning. Process selection. Lot-sizing. Integer optimization. Sugar and alcohol mills.

Referências bibliográficas

- ABEL, D. J. et al. A routing and scheduling problem for rail system: A case study. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 32, n. 9, p. 767-774, set. 1981.
- ALEGRE, R. M.; RIGO, M.; JOEKES, I. Ethanol fermentation of a diluted molasses medium by *saccharomyces cerevisiae* immobilized on chrysotile. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 46, n. 4, p. 751-757, dez. 2003.
- ALVES, D. M. G. **Fatores que afetam a formação de ácidos orgânicos bem como outros parâmetros da fermentação alcoólica**. 1994. 251 f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- 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, maio/ago. 2004.
- BARATA, M. Q. F. **Otimização econômica do corte e reforma de canaviais**. 1992. 173 f. Dissertação (Mestrado em Economia Agrária) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- 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. (org.). **Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios**. São Paulo: Atlas, 2002.
- BRUNSTEIN, I.; TOMIYA, E. H. Modelo econômico de empresa sucroalcooleira. **Gestão & Produção**, v. 2, n. 3, p. 264-280, set./dez. 1995.
- CASTRO, S. B.; ANDRADE, G. T. C.; ALBUQUERQUE, F. M. Engenharia e processamento do açúcar. **Apostila de treinamento e consultoria**. Maceió, 2002, 126p. Trabalho não publicado.
- 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, ago. 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, maio 1999.
- 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: <<http://www.sindicucar-al.com.br/docs/consecanaAL/cartilhaconsecanaal.swf>>. Acesso em: 16 de agosto de 2005.
- CONSECANA-SP (Conselho dos Produtores de Cana, Açúcar e Alcool de São Paulo). **Manual de instruções Consecana-SP: Regulamento & Normas operacionais**. 4. ed. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/pages/consecana.asp>>. Acesso em: 16 de agosto de 2005.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling – survey and extensions. **European Journal of Operational Research**, v. 99, n. 2, p. 221-235, jun. 1997.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. Piracicaba: EME/STAB, 2003.
- GRISOTTO, M. E. **Otimização do transporte de cana-de-açúcar por caminhões**. 1995. 121f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- ALVES, D. M. G. **Fatores que afetam a formação de ácidos orgânicos bem como outros parâmetros da fermentação alcoólica**. 1994. 251 f.. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- HAX, A. C.; CANDEA, D. **Production and inventory management**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.

- HIGGINS, A. J. 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, maio 2006.
- 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, maio 2005.
- HIGGINS, A. J. et al. 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, maio 1998.
- HIGGINS, A. J. et al. A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. **Agricultural Systems**, v. 82, n. 2, p. 99-115, nov. 2004.
- HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira – volume I e II**. São Paulo: Mestre Jou, 1977.
- IANNONI, A. P.; MORABITO, R. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 42, n. 3, p. 191-210, maio 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.
- KAWAMURA, M. S.; RONCONI, D. P.; YOSHIZAKI, H. Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry. **International Transactions in Operational Research**, v. 13, n. 5, p. 425-439, set. 2006.
- 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, out. 2003.
- LEE, K. S. et al. Model predictive control technique combined with iterative learning for batch processes. **AICHE Journal**, v. 45, n. 10, p. 2175-2187, mar. 1999.
- LIMA, J. P. L.; SICSÚ, A. B. Revisitando o setor sucroalcooleiro do nordeste: o novo contexto e a reestruturação possível. **Estudos Infocus**, Rio de Janeiro, n. 4, out. 2001. Disponível em: <<http://www.nuca.ie.ufrrj.br/infocus/estudos/lima1.pdf>>. Acesso em 25 abril de 2005.
- LOPES, M. B. **Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1995. 143 f.. Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- 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, jan./abr. 2005.
- MacCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multi-dimensional classification of production system for the design and selection of production planning and control systems. **Production Planning & Control**, v. 11, n. 5, p. 481-496, jul. 2000.
- MATHEW, J.; RAJENDRAN, C. Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. **Computers in Industry**, v. 21, n. 3, p. 331-334, abr. 1993.
- MEDEIROS, F. Processo de Fabricação de açúcar. **Apostila de treinamento e consultoria**, Maceió, 89 p. 2005. Trabalho não publicado.
- 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, out., 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.; SHIKIDA, P. F. A. (org.): *Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios*. São Paulo: Atlas, 2002.
- NAHMIAS, S. **Production and operations analysis**. Local: Irwin, Hoewood, IL, 1995.
- PAIVA, R. P. O. **Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool**. 2006. 182 f. Dissertação (Mestrado em Eng. de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel/STAB, 1989.
- RODRIGUES, L. G. S. **Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2005.
- SANTA CLOTILDE. **Relatório geral – safra 2004/2005**. Rio Largo, 2005. Relatório. Trabalho não publicado.
- TOSO, E. A. V.; MORABITO, R. Otimização no dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção: estudo de caso numa fábrica de rações. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 2, p. 203-217, maio/ago. 2005.
- UNICA (União da Agroindústria Canavieira de São Paulo) **Informação UNICA**. Ano 6, n. 51, janeiro/fevereiro de 2003. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/files/informacaounica/unica51.pdf>>. Acesso em: 20 de abril 2005.
- VIAN, C. E. F. **Agroindústria canavieira: estratégias competitivas e modernização**. Campinas: Átomo, 2003.
- WAACK, R. S.; NEVES, M. F.; MORAES, S. Grupos estratégicos nas usinas de açúcar e álcool. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 36., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SOBER, 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, set. 1976.
- VAN WISSEN, M. E. et al. **Discrete event modeling and dynamic optimization of a sugar plant**. Delft: Delft University of Technology, 2005. Relatório técnico.
- YAMADA, M. C. **Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira visando à aplicação em estudos de simulação**. 1999. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- 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, nov./dez. 1996.

Sobre os autores

Rafael Piatti Oititica de Paiva

Usina Santa Clotilde S/A, CEP 57100-000, Rio Largo, AL,
e-mail: rafael_paiva@hotmail.com

Reinaldo Morabito

Departamento de Engenharia de Produção - DEP, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar,
13565-905, São Carlos, SP,
e-mail: morabito@power.ufscar.br

Agradecimentos: Agradecemos aos revisores deste artigo pela valerosa contribuição e à Usina Santa Clotilde pelo apóio financeiro, pelo fornecimento de dados e pela ajuda de todos os funcionários envolvidos na realização desta pesquisa.

Recebido em 29/1/2006
Aceito em 07/12/2006

