

MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO EM USINAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Autor(es):

Camilla Miguel Carrara LAZZARINI
Lucas Fernandes de OLIVEIRA
Luiz Paulo Borges MIRANDA

Orientadora:

Sezimária F. Pereira SARAMAGO

O Brasil é atualmente o maior produtor de açúcar e álcool do mundo e, também, o maior exportador destes produtos. Segundo dados UNICA - União da Agroindústria Canavieira de São Paulo - (2010), o setor canavieiro processou na safra 2008/2009 o equivalente a 569,1 milhões de toneladas de cana, com produção de 31,0 milhões de toneladas de açúcar e 27,5 bilhões de litros de álcool.

O álcool brasileiro é um produto que tradicionalmente é consumido pelo mercado interno. Porém, nestes últimos anos, vem ganhando também o mercado externo. Dados da UNICA (2010) indicam que as exportações de álcool alcançaram a marca de 4,7 bilhões de litros na safra 2008/2009, sendo nossos maiores importadores os Estados Unidos, com 32,18% do total exportado desta mesma safra. Este valor corresponde a 17,2% da produção nacional e coloca o Brasil como maior exportador de álcool do mundo. Além das exportações, o consumo de álcool combustível também vem crescendo no mercado interno devido ao advento dos carros flexíveis.

Outro produto que deve ser incorporado definitivamente no escopo da indústria canavieira é a energia elétrica proveniente da utilização do bagaço como combustível de centrais termoeletricas de biomassa.

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

A adoção destas estratégias implica em um processo de melhoria dos departamentos agrícola, industrial e de marketing das empresas. Para isso, deve-se levar em consideração o melhor uso dos recursos produtivos, dos fatores de mercado e, especialmente, o melhor aproveitamento da matéria-prima, de modo que o planejamento da produção efetivamente apoie as estratégias competitivas adotadas.

Aliado às mudanças das estratégias competitivas, o aumento nos níveis de concorrência e as exigências do mercado nacional e internacional, devido à crise econômica mundial e seu impacto sobre a economia sucroalcooleira, demonstra a importância de investimento em pesquisas de novas tecnologias no setor.

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

A etapa do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar envolve decisões importantes e, portanto, apresenta uma crescente tendência do uso de uma estratégia de diversificação da produção nas usinas de açúcar e álcool. Estas características justificam a importância em desenvolver e aplicar modelos quantitativos de planejamento de produção de forma que se possa atingir, da melhor forma possível, os objetivos estratégicos e comerciais da empresa.

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

O planejamento e controle do processo de produção em usinas de cana-de-açúcar envolve a interação de todos os elementos, desde o setor agrícola até o industrial. Componentes externos são fatores importantes que influenciam o comportamento das etapas de produção.

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

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

A diversificação e diferenciação dos produtos fabricados pelas usinas originam um problema adicional para o planejamento e controle da produção (PCP) na área industrial das usinas de açúcar e álcool. Esta dificuldade adicional deriva do aumento da complexidade na seleção dos processos que serão utilizados para a produção de um maior número de produtos.

O principal objetivo do planejamento e controle da produção (PCP) é propiciar informações adequadas para que os administradores possam gerenciar e controlar as atividades da operação produtiva e satisfazer continuamente a demanda do consumidor.

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

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

Para auxiliar no planejamento da produção da safra das usinas uma alternativa é a utilização de técnicas de Pesquisa Operacional (PO). De acordo com Paiva (2006), estas técnicas podem apoiar diversas decisões importantes que são consideradas no planejamento e controle da produção (PCP) das usinas, em particular, com respeito à quantidade de cana que deve ser colhida e comprada dos fornecedores, à logística de transporte de cana a partir das frentes de corte até as usinas, à determinação da moagem semanal, à seleção dos processos de produção utilizados em cada semana, além da política de estoque de produtos acabados.

A simulação computacional é uma linha de atuação da Pesquisa Operacional (PO) que pode ser utilizada pela gerência das usinas para auxiliar a tomada de decisão. Esta técnica permite a análise dinâmica da interação entre os elementos do sistema. Ao longo dos anos, o volume e a velocidade com que novos dados são gerados é diretamente proporcional à importância e risco das decisões tomadas por gestores em organizações empresariais.

Conforme Silva (2006) a simulação permite a avaliação comparativa de sistemas retratando cenários reais sem a necessidade de implementá-los. Assim, é possível atingir os objetivos de desempenho (qualidade, custo, confiabilidade, rapidez e flexibilidade) do sistema de corte, carregamento e transporte (CCT) e do planejamento e controle da produção (PCP).

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

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

Para atingir este objetivo, nesta pesquisa o planejamento agregado da produção na indústria sucroalcooleira é escrito como um problema de otimização linear e o código computacional Linprog do Matlab é aplicado para obter soluções ótimas.

O modelo de simulação desenvolvido contempla a modelagem das principais decisões envolvidas no planejamento e controle da produção (PCP) de uma usina de açúcar e álcool. A formulação pode ser usada como uma ferramenta de gestão de forma a auxiliar a geração de planos de produção eficazes para o período de safra de usinas de açúcar e álcool.

A modelagem de otimização matemática consiste na representação de um sistema real por meio do uso de lógica e de ferramentas matemáticas, de forma que as melhores condições de operação do sistema possam ser determinadas.

Os modelos determinísticos aplicados ao planejamento e controle da produção (PCP) são as mais tradicionais ferramentas utilizadas da Pesquisa Operacional (PO). Entre esses modelos destacam-se a utilização da programação linear (PL), devido à sua adequação aos diversos problemas práticos e da possibilidade de conversão dos modelos não-lineares em lineares.

Neste trabalho a modelagem foi escrita de forma genérica, por isso, é adaptável à necessidade de análise de vários estudos, onde o número de processos, produtos produzidos, períodos de análise, fontes de fornecimento de matéria-prima, tipo de transporte e tipo de estoque podem ser alterados.

O objetivo é apoiar as principais decisões envolvidas no planejamento e controle do processo de produção (PCP) de uma usina de açúcar e álcool e apresentar o planejamento agregado da produção na indústria sucroalcooleira de forma a auxiliar a geração de planos de produção eficazes para o período de safra de usinas de açúcar e álcool.

As decisões de planejamento e controle do processo de produção devem auxiliar no planejamento da moagem semanal, na escolha dos processos produtivos, orientar a política de produção e de armazenamento dos produtos finais. Assim, este estudo considera as restrições de disponibilidade de matéria-prima, a previsão de colheita, a capacidade de transporte, a capacidade de armazenamento, fluxo de caixa positivo, margem de contribuição e atendimento da demanda por produto.

Para atingir estes objetivos, utilizou-se uma combinação entre um modelo de seleção de processos e de dimensionamento de lotes de produção, de acordo com Paiva e Morabito (2007).

Vale ressaltar que o modelo permite estabelecer o quanto de cana processar em cada período de análise, quanto de cana obter de cada fonte de fornecimento, que fornecedor de serviço de transporte utilizar para transportar esta matéria-prima, que processo utilizar para produzir cada produto demandado, qual a política de estoque, qual a política financeira e, finalmente, qual é a melhor política de comercialização e estocagem, de forma que a maioria dos objetivos sejam alcançados, simultaneamente.

O modelo de simulação desenvolvido considera como horizonte de planejamento as semanas de safra e decisões são tomadas em períodos semanais.

O desenvolvimento da modelagem baseia-se nos métodos clássicos de seleção de processos e dimensionamento de lotes, representando o sistema de produção de açúcar, álcool, melaço e derivados. Este problema pode ser caracterizado como monoestágio, multiproduto (ou multiprocesso) e dinâmico.

O foco é o *trade-off* entre aproveitamento do potencial da matéria-prima, cumprimento das exigências dos contratos de venda e aproveitamento das oportunidades do mercado. Estes pontos são analisados juntamente com as restrições de disponibilidade de matéria-prima, capacidade produtiva, capacidade de estoque, fluxo de caixa positivo e intolerância ao atraso nos pedidos. O objetivo é procurar alcançar uma melhor rentabilidade para a empresa.

A agregação proposta neste trabalho está relacionada com a influência de alguns parâmetros e decisões da etapa agrícola (planejamento de corte, carregamento e transporte) e da etapa industrial.

O modelo proposto pretende apoiar de forma agregada as decisões táticas do planejamento de safra. O enfoque principal é a etapa industrial do processo de produção de açúcar e álcool, considerando a influência de alguns parâmetros e decisões da etapa agrícola e de corte, carregamento e transporte (CCT) no planejamento da etapa industrial.

Adotou-se que a seleção de processos é um dado de entrada e a matriz de produção é uma saída do programa. Considerou-se também que o tempo de *setup* pode ser desconsiderado

dentro do período tomado para análise, assim as atividades de preparação dos processos não são consideradas na modelagem do problema.

Nesta modelagem, processo de produção tudo ou nada, em diferentes períodos de análise semanais, é adotado. A consideração de produção tudo ou nada está baseada na necessidade de um período considerável de tempo (p.ex., uma semana) para que o processo de produção alcance índices de produtividade elevados. Então, tentando evitar a perda de eficiência e, conseqüentemente, perda de rentabilidade para a empresa, somente um processo produtivo em cada semana é utilizado.

Usinas autônomas diversificadas são usinas que produzem uma grande variedade de produtos e comercializam de forma independente. Estas empresas normalmente utilizam várias estratégias de comercialização (mercado *spot*, mercado varejista, mercado futuro, contrato de longo prazo e exportação utilizando *tradings*). Neste tipo de empresa, o planejamento de safra deve ser avaliado constantemente para que se possa aproveitar melhor as oportunidades de mercado.

O modelo de planejamento agregado da produção desenvolvido neste estudo é capaz de auxiliar o tomador de decisão no estabelecimento e no controle do processo produtivo de uma usina de açúcar e álcool. Neste caso, a usina é classificada como autônoma diversificada de acordo com os objetivos estratégicos adotados pela empresa com relação ao seu mercado consumidor e, conseqüentemente, com o estabelecimento da demanda.

As usinas de açúcar e álcool operam de forma ininterrupta durante o período de safra, entretanto, podem ocorrer tempos de inatividade devido a falhas em diferentes elementos, por isso considerou-se um parâmetro modelo para computar o tempo efetivo de produção durante cada semana. Entretanto, o tempo de *setup* pode ser entendido como incluído no percentual de tempo de produção aproveitado durante cada semana.

O capital disponível para rodar a safra foi distribuído uniformemente ao longo de cada semana.

Neste trabalho, possíveis não-linearidades nos parâmetros de rendimento e custos de produção foram desconsideradas para o nível de análise desejado.

É importante destacar, também, que os custos considerados no modelo proposto são custos variáveis e as receitas são valores líquidos (desconsiderando impostos e custos de comercialização).

Outra consideração importante é com relação à adoção de limites de compatibilidade entre as variáveis diretamente dependentes, de forma a estabelecer parâmetros reais para as mesmas. Normalmente, esses parâmetros referem-se à perda de matéria-prima da etapa agrícola até a etapa industrial, podendo chegar a 30% do total de cana-de-açúcar disponível. Logo, segundo informações obtidas em campo, de toda a cana disponível nas frentes de corte, cerca de 70% desse valor costuma ser processado para obter os produtos finais.

Para aplicar esta modelagem em outra usina pode ser necessário adaptar algumas considerações adotadas para a realidade operacional da mesma.

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

$$\max F = Fr - Fc \quad (1)$$

onde,

$$Fr = \sum_t \left(\sum_{ps} \sum_k VPS_{ps,t} \left(\frac{RIS_{ps,k,t}}{1000} \right) XM_{ps,t} \right) + \sum_t \left(\sum_{ph} \sum_k VPH_{ph,t} \left(\frac{RIH_{ph,k,t}}{1000} \right) XM_{ph,t} \right) + \sum_t \left(\sum_{pa} \sum_k VPA_{pa,t} \left(\frac{RIA_{pa,k,t}}{1000} \right) XM_{pa,t} \right) \quad (2)$$

e

$$Fc = \sum_t \left[\sum_m MCA_{mt} XC_{mt} + \sum_s CCCT_{st} XT_{st} + \sum_k MCI_{kt} XK_{kt} + \sum_{p,e} CE_{pet} XE_{pet} \right] \quad (3)$$

Sujeito a

$$XC_{mt} \geq 0 \quad (4)$$

$$XM_{pt} \geq 0 \quad (5)$$

$$XT_{st} \geq 0 \quad (6)$$

$$XK_{kt} \geq 0 \quad (7)$$

$$XD_{mt} \geq 0 \quad (8)$$

$$XE_{pet} \geq 0 \quad (9)$$

$$\sum_p XM_{pt} \geq \left(MMIC \frac{TEM_t}{100} \right) \quad (10)$$

$$\sum_p XM_{pt} \leq \left(MMAC \frac{TEM_t}{100} \right) \quad (11)$$

$$XE_{pet} \leq CEAT_{pet} \quad (12)$$

$$XT_{st} \leq \left(\frac{DFP_t}{100} \frac{TEM_t}{100} CTFP \right) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & - \sum_{ps} \sum_k RIS_{ps,k,t} VAC_{ps,t} XM_{ps,t} - \sum_{ph} \sum_k RIH_{ph,k,t} VAC_{ph,t} XM_{ph,t} - \\ & \sum_{pa} \sum_k RIA_{pa,k,t} VAC_{pa,t} XM_{pa,t} + \sum_m MCA_{mt} XC_{mt} + \sum_s CCCT_{st} XT_{st} + \\ & \sum_k MCI_{kt} XK_{kt} + \sum_{p,e} CE_{pe} XE_{pet} \leq CG \end{aligned} \quad (14)$$

$$XC_{forn,t} + XC_{acio,t} \leq PCF_t \left(\sum_p XM_{pt} \right) \quad (15)$$

$$XK_{kt} \leq MMAC SP_{kt} \quad (16)$$

$$XD_{mt} - XC_{mt} \geq 0 \quad (17)$$

$$\sum_p \sum_t XM_{pt} \geq 0,75 \quad \sum_m \sum_t XD_{mt} \quad (18.1)$$

$$\sum_p \sum_t XM_{pt} \leq 0,90 \quad \sum_m \sum_t XD_{mt} \quad (18.2)$$

$$\sum_p XM_{pt} \geq 0,75 \sum_s XT_{st} \quad (19.1)$$

$$\sum_p XM_{pt} \leq 0,80 \sum_s XT_{st} \quad (19.2)$$

$$\sum_p XM_{pt} \geq 0,75 \sum_m XC_{mt} \quad (20.1)$$

$$\sum_p XM_{pt} \leq 0,90 \sum_m XC_{mt} \quad (20.2)$$

$$\sum_k XK_{kt} \leq \sum_p XM_{pt} \quad (21.1)$$

$$\sum_k XK_{kt} \geq 0,95 \sum_p XM_{pt} \quad (21.2)$$

$$XC_{m,t-1} \geq 0,75(XD_{m,t} - XD_{m,t-1}) \quad (22.1)$$

$$XC_{m,t-1} \leq 0,90(XD_{m,t} - XD_{m,t-1}) \quad (22.2)$$

$$\sum_p \left(\frac{RIS_{ps,k,t}}{1000} + \frac{RIH_{ph,k,t}}{1000} + \frac{RIA_{pa,k,t}}{1000} \right) XM_{pt} - \sum_e XE_{pet} + \sum_e XE_{p,e,t-1} \geq DP_{pt} \quad (23.1)$$

$$\sum_p \left(\frac{RIS_{ps,k,t}}{1000} + \frac{RIH_{ph,k,t}}{1000} + \frac{RIA_{pa,k,t}}{1000} \right) XM_{pt} - \sum_e XE_{pet} + \sum_e XE_{p,e,t-1} \leq 1,05 DP_{pt} \quad (23.2)$$

$$\sum_s XT_{st} \geq 0,95 \sum_m XC_{mt} \quad (24.1)$$

$$\sum_s XT_{st} \leq \sum_m XC_{mt} \quad (24.2)$$

A Eq. (1) apresenta a função objetivo que estabelece a margem de contribuição agroindustrial de produção dos produtos p , por meio dos processos k , da matéria prima m , do tipo de transporte da matéria prima s e do tipo de estoque e , nos períodos t .

O cálculo da receita obtida com a venda de cada produto p , gerado pelo processo k , em cada período t é representado na Equação (2). Enquanto a Eq. (3) representa a soma de todos os custos de produção, calculados em todos os períodos t , que é obtido pela soma dos seguintes componentes: o custo de obtenção da matéria prima m (MCA_{mt}), o custo de transporte da matéria prima s ($CCCT_{st}$), o custo de utilização de cada processo k (MCI_{kt}) e o custo de estocagem para cada produto p em cada tipo de estoque e (CE_{pe}).

Equações (4), (5), (6), (7), (8) e (9) representam os limites de domínio das variáveis de decisão (restrições laterais) XC_{mt} , XM_{pt} , XT_{st} , XK_{kt} , XD_{mt} , XE_{pet} deste modelo, respectivamente.

A restrição dada pela Eq. (10) considera a moagem mínima em cada período t . A quantidade de moagem mínima ($MMIC$) se deve ao estabelecimento de um balanço térmico adequado para a usina. Assim, a moenda deve fornecer uma quantidade mínima de combustível (bagaço de cana) para que a usina não tenha problemas de pressão de vapor das caldeiras.

Similarmente, a Eq. (11) representa a restrição de moagem máxima em cada período t . A quantidade de moagem máxima ($MMAC$) se deve à regulamentação, estabelecida no início da safra, que considera a abertura e velocidade de rotação dos rolos da moenda.

A restrição de capacidade de estoque para cada produto p em cada tipo de estoque e considerando os diferentes períodos de análise t é exibida na Eq. (12).

Equação (13) apresenta a restrição de capacidade de transporte com frota própria em cada período de análise t . Esta restrição indica a quantidade de cana que a frota própria da usina é capaz de transportar em cada período t considerado. O parâmetro (DFP_t) pode ser utilizado, por exemplo, para indicar uma diminuição da disponibilidade da frota própria devido a problemas mecânicos nos caminhões no decorrer da safra.

Equação (14) representa a restrição de fluxo de caixa em cada período t . Esta restrição estabelece que a receita líquida deve ser maior ou igual aos custos de produção e de estocagem em cada período t . O lucro líquido é calculado pela adição do adiantamento repassado pela cooperativa para a usina (devido à produção de p em cada período t) com o capital de giro que a empresa está disposta a disponibilizar para cada período t .

Equação (15) representa a restrição de quantidade de cana não administrada (cana fornecida ($XC_{forn,t}$) e cana de acionistas ($XC_{acio,t}$)) em cada período t . Esta restrição determina um limite máximo para a moagem de cana não administrada em cada período t . Este limite é definido por meio de um valor percentual (PCF_t) arbitrado pelos tomadores de decisão e por meio da quantidade de cana processada no período.

Equação (16) é uma restrição auxiliar para que não seja necessário utilizar a variável XK_{kt} na função objetivo. Usando esta restrição, evita-se que o modelo se torne um problema não-linear.

Equações (17), (22.1) e (22.2) determinam a disponibilidade de cada tipo m de matéria-prima no início de cada período de análise t .

A restrição dada pelas Eq. (18.1) e (18.2) determina que a cana disponível para toda a safra deve ser inteiramente processada durante a mesma.

A restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana transportada (XT_{st}) e a quantidade de cana moída (XM_{pt}) em todos os períodos t da safra é calculada nas Eq. (19.1) e (19.2). Da mesma forma, as Eq. (20.1) e (20.2) representam a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana colhida (XC_{mt}) e a quantidade de cana moída (XM_{pt}) em todos os períodos t da safra.

Igualmente, as Eq. (21.1) e (21.2) representam a restrição de compatibilidade entre a quantidade de cana nos processos (XK_{kt}) e a quantidade de cana moída (XM_{pt}) em todos os períodos t da safra.

Equações (23.1) e (23.2) representam a restrição de balanceamento de estoque para cada produto p em cada período t . Neste modelo, o balanceamento de estoque é feito em termos do produto p e do tipo de estoque e que está sendo utilizado.

As Eq. (24.1) e (24.2) também estabelecem uma restrição de compatibilidade, porém, entre a quantidade de cana transportada (XT_{st}) e a quantidade de cana colhida (XC_{mt}) em todos os períodos t da safra.

Note que as restrições dadas pelas Eq. (19.1), (19.2), (20.1), (20.2), (21.1), (21.2), (24.1) e (24.2) afirmam que este modelo é monoestágio.

É interessante notar que as Eq. (22.1), (22.2) e (4) restringem a quantidade de cana colhida do tipo m em todos os períodos t (XC_{mt}) para um valor menor ou igual à disponibilidade de cana m no início do período t (XD_{mt}).

O modelo apresentado neste artigo considera a produção de $p = 1, \dots, P$ produtos, através de $k = 1, \dots, K$ processos, $m = 1, \dots, M$ fontes de suprimento de matéria-prima, $s = 1, \dots, S$ tipos de transporte de matéria-prima, $e = 1, \dots, E$ tipos de estoque, em todos os $t = 1, \dots, T$ períodos.

A notação adotada neste modelo (Eq.(1) a (24.2)) é descrita abaixo:

- F – Função Objetivo.
- F_c – Função Custo.
- F_r – Função Receita.

- $VPA_{pa,t}$ – Valor líquido do produto pa , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
- $VPH_{ph,t}$ – Valor líquido do produto ph , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
- $VPS_{ps,t}$ – Valor líquido do produto ps , em cada período t (u.m./ton ou m^3). Valor de mercado do produto.
- $VAC_{pa,t}$ – Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto pa em cada período t (u.m./ m^3).
- $VAC_{ph,t}$ – Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto ph em cada período t (u.m./ton).
- $VAC_{ps,t}$ – Valor líquido do adiantamento da cooperativa pago pelo produto ps em cada período t (u.m./ton).
- $RIA_{pa,k,t}$ – Rendimento industrial obtido na produção do álcool pa , pelo processo k , no período t .
- $RIH_{ph,k,t}$ – Rendimento industrial obtido na produção do melaço ph , pelo processo k , no período t .
- $RIS_{ps,k,t}$ – Rendimento industrial obtido na produção do açúcar ps , pelo processo k , no período t .
- XD_{mt} – variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima (ton ou m^3 /sem) – Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período t . ($XD_{mt} \geq 0$).
- $XD_{m,t-1}$ – variável de disponibilidade da fonte de suprimento de matéria prima (ton ou m^3 /sem) – Quantidade disponível para ser colhida de cada tipo de fonte de suprimento de matéria prima m no período $t-1$. ($XD_{m,t-1} \geq 0$).
- XT_{st} – Variável de decisão da quantidade de cana transportada por semana (ton/sem) – Quantidade de cana transportada pelo tipo de transporte s no período t - $XT_{st} \geq 0$.
- XK_{kt} – Variável de decisão da quantidade de cana por processo por semana (ton/sem) – Quantidade de cana moída pelo processo k , no período t - $XK_{kt} \geq 0$.
- XE_{pet} – Variável de estoque (ton ou m^3 /sem) – Quantidade estocada no período t do produto p , pelo estoque tipo e - $XE_{pet} \geq 0$.
- $XE_{p,e,t-1}$ – Variável de estoque (ton ou m^3 /sem) – Quantidade estocada no período $t-1$ do produto p , pelo estoque tipo e - $XE_{p,e,t-1} \geq 0$.
- XC_{mt} – Variável de decisão da quantidade de cana colhida por semana (ton/sem) – Quantidade obtida em cada fonte de suprimento m no período t - $XC_{mt} \geq 0$.
- $XC_{m,t-1}$ – Variável de decisão da quantidade de cana colhida por semana (ton/sem) – Quantidade obtida em cada fonte de suprimento m no período $t-1$ - $XC_{m,t-1} \geq 0$.
- SP_{kt} – Dado de entrada referente a seleção de processos k considerando cada período t (adimensional).
- TEM_t – Porcentagem de tempo efetivo de moagem durante um período de análise t (%).
- $MMIC$ – Moagem mínima de cana (ton/sem).
- $MMAC$ – Moagem máxima de cana (ton/sem).
- MCA_{mt} – Matriz de custos agrícolas de cada fonte de suprimento de matéria prima m nos períodos t (u.m./ton de cana).
- MCI_{kt} – Matriz de custos industriais de cada processo k , nos períodos t (u.m./ton de cana).
- $CCCT_{st}$ – Custo variável de corte, carregamento e transporte da cana pelo tipo de transporte s no período t (u.m./ton de cana).

- CE_{pe} - Custo variável de estocagem do produto p , pelo tipo de estoque e (u.m./ton ou m^3).
- $CEAT_{pet}$ - Capacidade de estocagem dos armazéns e tanques no período t (ton ou m^3).
- CG - Capital de giro disponível para rodar a safra (u.m.).
- CG_t - Capital de giro disponível para cada período t (u.m.).
- DP_{pt} - Demanda do produto p em cada período t (ton ou m^3 /sem).
- XM_{pt} - Variável de decisão de quantidade de cana moída por semana (ton/sem) - Quantidade de cana moída no período t - $XM_{pt} \geq 0$.

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

Para obter os resultados do problema de programação linear utilizou-se o código computacional Linprog.

Esta simulação numérica considera um sistema de produção que tem quatro fontes de suprimento de cana-de-açúcar: produção própria - (m1), produção arrendada - (m2), produção de fornecedores - (m3) e produção de acionistas - (m4). O transporte é realizado apenas pela frota própria e os produtos finais podem ser armazenados em estoque próprio - (e1) e estoque terceirizado - (e2).

Considerou-se que a usina produz seis diferentes tipos de produtos: açúcar VHP - (p1), açúcar Especial - (p2), açúcar Demerara - (p3), melaço - (p4), álcool etílico hidratado carburante (AEHC) - (p5) e álcool etílico anidro carburante (AEAC) - (p6). Para a fabricação (manufatura) destes produtos considerou-se cinco processos e um horizonte de planejamento de sete semanas. Além disso, adotou-se que a quantidade de cana-de-açúcar disponível nas fontes de suprimento é de 236.742 toneladas para rodar a safra (período considerado).

A demanda por produto para produção está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Demanda para o horizonte de planejamento

DP_{pt}	Semanas						
	1	2	3	4	5	6	7
VHP (ton)	500	1000	0	700	0	100	0
Especial (ton)	200	300	0	0	900	0	200
Demerara (ton)	0	6500	0	0	0	0	0
Melaço (ton)	0	0	0	0	0	0	1000
AEHC (m^3)	650	0	250	300	200	150	500
AEAC (m^3)	0	200	300	0	300	500	0

A capacidade de moagem mínima e máxima de cana-de-açúcar é 12.400 toneladas/semana e 64.000 toneladas/semana, respectivamente. A capacidade de transporte da frota própria é de 41.975 toneladas/semana.

O problema tem 224 variáveis e 604 restrições. Apesar do elevado número de restrições, o tempo computacional requerido para executar cada cenário é muito pequeno, cerca de 10 segundos.

As figuras abaixo mostram os resultados obtidos para a quantidade de cana-de-açúcar disponível, colhida, transportada, moída e processada e da quantidade dos produtos finais estocados durante o horizonte de planejamento considerado na análise e para o tipo de transporte utilizado.

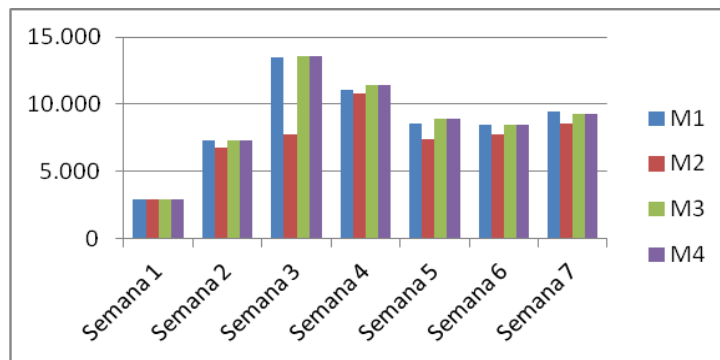


Figura 1: Quantidade de cana disponível

Verifica-se pela Fig. 1 que as fontes de suprimento de cana de fornecedores e de acionistas apresentam uma disponibilidade de matéria-prima superior às demais, e que essa disponibilidade é a mesma para as duas fontes.

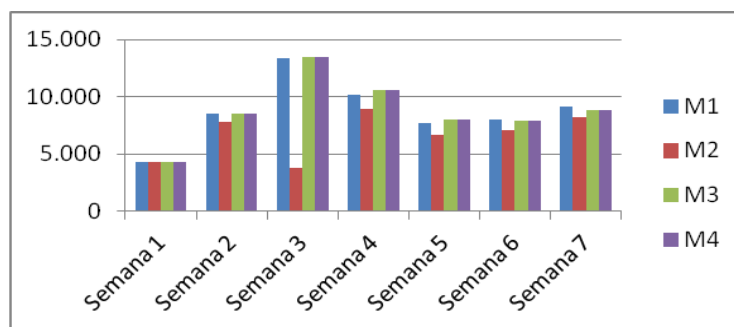


Figura 2: Quantidade de cana colhida

Observa-se pela Fig. 2 que a semana 3 foi o período em que houve uma maior quantidade de cana colhida, fato justificado pela maior disponibilidade de matéria-prima neste período (Fig. 1). As fontes de suprimento de fornecedores (m3) e acionistas (m4) foram as que tiveram uma maior quantidade de cana colhida considerando toda a safra. Percebe-se ainda que a quantidade colhida de matéria-prima em *m3* e *m4* é a mesma.

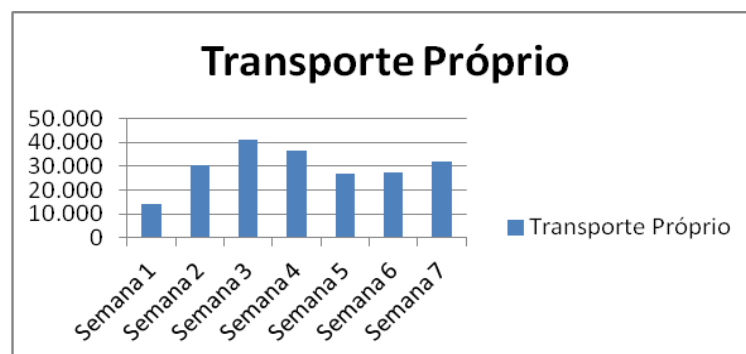


Figura 3: Quantidade de cana transportada

Verifica-se pela Fig. 3 o atendimento à quantidade de cana colhida. Ou seja, a quantidade de cana transportada é proporcional à quantidade de cana colhida. Em todas as semanas, a capacidade de transporte da frota própria considerada foi suficiente para atender ao transporte de matéria-prima das frentes de corte até a usina. Observa-se que somente na semana 3 a capacidade de transporte utilizada aproximou-se da capacidade máxima.

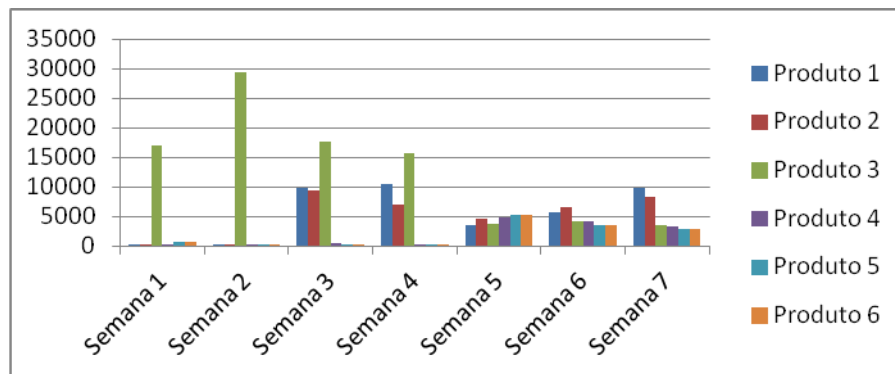


Figura 4: Quantidade de cana moída

Observa-se na Fig. 4 que, nas quatro primeiras semanas do horizonte de planejamento considerado, a maioria da cana-de-açúcar moída foi utilizada para atender a demanda do produto 3 (açúcar Demerara) exigida na semana 2 e que foram necessários um total de aproximadamente 45.000 toneladas de cana moída para cumprir com essa demanda. Percebe-se também que a moagem semanal não atingiu o limitante inferior nem superior da capacidade de moagem da usina.

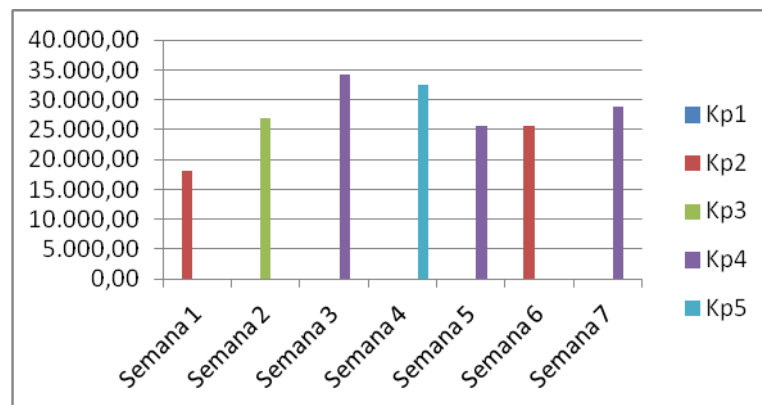


Figura 5: Quantidade de cana processada

Verifica-se pela Fig. 5 que em cada semana apenas um processo foi utilizado, o que é justificado pela produção tudo ou nada. Observa-se ainda que a matriz de escolha dos processos considerada como dado de entrada foi atendida pela modelagem.

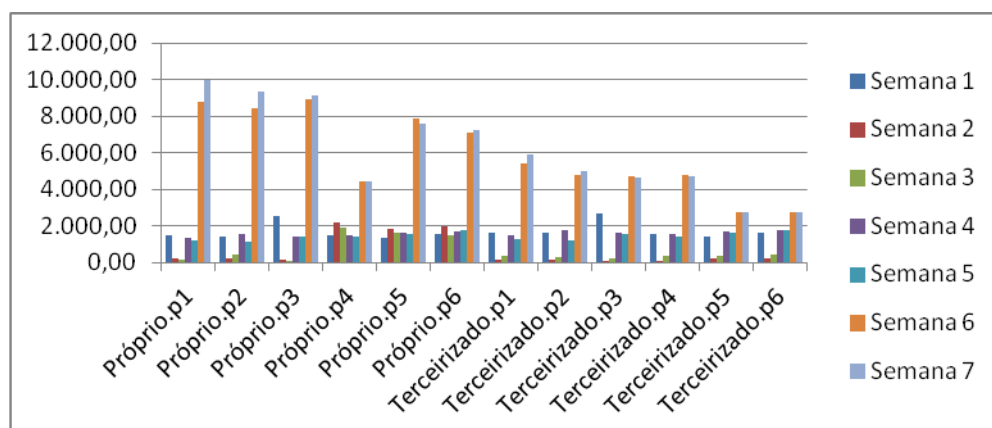


Figura 6: Quantidade de estoque dos produtos finais

Observa-se na Fig. 6 que há um decréscimo da quantidade de produtos finais estocados ao longo da safra, o que é justificado pelo cumprimento dos contratos de venda. E pode-se verificar ainda que no último período de análise, esse estoque é o menor dentre todos períodos da safra. Percebe-se ainda pela Fig.6 que a quantidade de produtos estocados no estoque próprio é superior a quantidade estocada no estoque terceirizado, o que é justificado pelo fato de só se

utilizar o estoque terceirizado quando o estoque próprio encontra-se com sua capacidade máxima atingida.

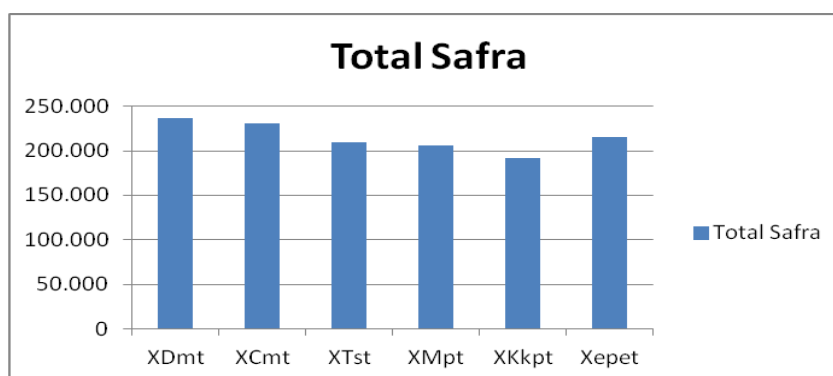


Figura 7: Valor acumulado para as variáveis analisadas

Devido aos limites de compatibilidade estabelecidos entre as variáveis nas restrições de (21.1) a (24.2), verifica-se que de toda a cana disponível para a safra, cerca de 81% foi processada. Ou seja, observa-se uma perda de matéria-prima de aproximadamente 19% da etapa agrícola até a etapa industrial.

As perdas de matéria-prima são classificadas como visíveis e invisíveis. As perdas visíveis dizem respeito à cana-de-açúcar perdida ainda no campo (etapa agrícola de CCT) e as perdas invisíveis são as perdas que ocorrem no processo do campo à indústria, inclusive.

Rosa *et al.* (2009) afirmam que as perdas na colheita mecanizada são elevadas, se aproximando de 15% do total da cana-de-açúcar colhida. Somando estas perdas com as perdas ocorridas na indústria, e considerando as informações obtidas em campo, pode-se afirmar que os limites de compatibilidade estabelecidos estão dentro do ocorrido na prática.

Finalmente, vale ressaltar que o valor ótimo encontrado para a margem de contribuição agroindustrial foi de R\$ 942.320,00 para a safra considerando os parâmetros adotados.

A agroindústria canavieira nacional tem mostrado historicamente ser altamente competitiva, sempre em busca de alternativas, inovações e melhorias, tanto em relação à produtividade quanto à qualidade do produto.

Este trabalho teve como objetivo contribuir com uma opção adicional de ferramenta de trabalho na busca por incrementos na eficiência e em parâmetros de produtividade para melhoria e aperfeiçoamento de usina de cana.

Este tipo de modelo tem o potencial para apoiar decisões, proporcionando confiabilidade nas análises e fornecendo um melhor entendimento das variáveis inerentes ao problema e um melhor desempenho da usina.

A principal contribuição do modelo desenvolvido é permitir uma inibição dos julgamentos subjetivos, incompletos e tendenciosos.

No final deste trabalho pode-se dizer que o problema de otimização linear tem potencial para apoiar as principais decisões relativas ao planejamento e controle dos processos de produção de uma usina de açúcar e álcool.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela CAPES e FAPEMIG (processo TEC-APQ-01836-09).

REFERÊNCIAS

- Belik, W. and Vian, C. E. F. "State deregulation and new competitive strategies of industrial sugarcane in São Paulo", In: MORAES, M. A. F. D & SHIKIDA, P. F. A. (Organizers), Sugarcane industry in Brazil: evolution, development and challenges, São Paulo, Brazil, Atlas. 2002.
- Rosa, E. J. da, José, J. V., Salvestro, A. de C., Gava, R. Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colheita mecanizada. V Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar (EPCC). Maringá, Paraná, Brazil. 2009.
- MathWorks, 2006, "Optimization Toolbox 3", User's Guide, The MathWorks, Inc.

Paiva, R. P. O. "A model based on process selection and lot-sizing of the aggregate production planning in sugar and alcohol milling company". 2006. 182 p. Master Thesis. Department of Production Engineering. Federal University of São Carlos, São Carlos, Brazil.

Paiva, R.P.O.; Morabito, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. *Gestão de Produção*, São Carlos. 2007. v. 14, n. 1, p. 25-41.

Silva, J. E. A. R. "Development of a simulation model to assist with the management of court, loading and transportation systems of sugarcane". 2006. 145 p. Master Thesis. Department of Production Engineering. Federal University of São Carlos, São Carlos, Brazil.

UNICA, 2010, Data and Prices, Statistics, Union of Agribusiness Sugarcane of São Paulo, Brazil.

Vian, C. E. F. "Sugarcane industry: Competitive strategies and modernization", Campinas, Brazil, Átomo, 2003.

Yamada, M. C.; Kato, E. R. R.; Porto, A. J. V. Estudo da produtividade e da eficiência de produção na indústria sucroalcooleira, com o uso de simulação de sistemas. In: Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia de Produção, 1998.