

## OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO FUZZY NO PLANEJAMENTO AGREGADO DA PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Aneirson Francisco da Silva - aneirson@yahoo.com.br  
Fernando Augusto Silva Marins - fmarins@feg.unesp.br  
Valério Antônio Pamplona Salomon - salomon@feg.unesp.br  
Guilherme Martin Silva - guilherme\_try@hotmail.com  
Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá - UNESP  
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – 12516-410 – Guaratinguetá - SP

José Arnaldo Barra Montevechi – montevechi@unifei.edu.br  
Instituto de Engenharia de Produção e Gestão - UNIFEI  
Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG  
Telefone: (35) 3629 - 1101 Fax: (35) 3622 - 3596

### RESUMO

Propõe-se um modelo de otimização multiobjetivo *fuzzy* para o planejamento agregado da produção e distribuição de uma usina de açúcar e álcool. O modelo descreve o processo de produção de açúcar, álcool, melaço e derivados, considerando as incertezas inerentes à produção destes produtos. O modelo contempla as etapas agrícolas, industriais e de distribuição, possibilitando que as decisões sejam tomadas em um horizonte de planejamento semanal, incluindo a safra e entressafra. A aplicação do modelo proposto em uma usina de sucroalcooleira gerou resultados que auxiliaram na determinação de políticas de produção e distribuição, com a incorporação das incertezas, possibilitando o desenvolvimento de um modelo matemático aderente a realidade das usinas brasileiras.

**PALAVRAS CHAVE.** Planejamento agregado da produção. *Fuzzy goal programming*. *Fuzzy mixed integer goal programming* (PO na Indústria -IND)

### ABSTRACT

We propose an implementation of a fuzzy mixed integer goal programming model (FMIGP) for the aggregate production planning in sugar and ethanol milling companies. The model depicts the comprehensive production process of sugar, alcohol, molasses and derivatives. The model considers the uncertainties involved in the production sugar and ethanol and in decisions on agricultural, industrial and distribution phases. The referred model enables the decisions to be made on a weekly-basis planning horizon, which includes a harvesting season and the periods between harvests. An application developed in a sugar and ethanol milling company was conducted; producing interesting results that helped to determine policies for the production and distribution, with the incorporation of uncertainty, enabling the development of a mathematical model that has adhered to the reality of Brazilian sugar and ethanol milling company.

**KEYWORDS.** Aggregate production planning, Fuzzy Goal programming, Fuzzy mixed integer goal programming.

### 1. Introdução

A agroindústria brasileira da cana recentemente tem enfrentado uma grande mudança organizacional. Aspectos de gestão nesta indústria estão mudando, devido à importância de seus

produtos, especialmente o etanol e eletricidade, que cresce internacionalmente e nacionalmente (PAIVA e MORABITO, 2009). A produção total de cana moída pela indústria sucroalcooleira no ano de 2009 foi de 612,21 milhões de toneladas, um recorde nacional, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento-Conab (2010). Desta forma, percebe-se a importância e a representatividade da agroindústria sucroalcooleira para a economia brasileira, gerando riquezas e empregos.

Paiva (2009) comenta que no Brasil, a partir da década de 90, com a abertura do mercado de açúcar e álcool, e os avanços na tecnologia de microinformática e computação, possibilitou o surgimento de algumas contribuições com a utilização de métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira. Yoshizaki et al. (1996) aplicaram a programação linear multiperíodo para resolver um problema de distribuição de álcool no sudeste do Brasil. Iannoni and Morabito (2006) investigaram um sistema de recepção de cana de açúcar de uma usina, por meio da simulação a eventos discretos, cujo objetivo foi avaliar a logística de transporte. Mathew and Rajendran (1993) utilizaram a simulação a eventos discretos, com o objetivo de avaliar a programação de manutenções de uma usina, visando estabelecer intervalos razoáveis entre essas paradas. Para mais informações sobre simulação a eventos discretos consultar Montevechi et al. (2007) e Oddoye et al. (2009). Kawamura et al. (2006) utilizaram a Programação Linear Multiperíodo para auxiliar nas decisões relacionadas a transporte de produtos e armazenagens em uma cooperativa de produtores de açúcar e álcool. Cock et al. (2000) desenvolveram uma metodologia para escolha de variedades de cana por meio da análise de custo total de processamento dessas variedades. Por meio da simulação, Higgins e Davies (2005) realizaram um estudo que visava à melhoria do planejamento logístico de transporte de cana. Paiva e Morabito (2009) desenvolveram um modelo monobjetivo que integrava as etapas agrícolas e industriais, auxiliando nas decisões de safra. Higgins et al. (2004), Higgins (2006), Milan et al. (2006), Grunow et al. (2007) e Paiva e Morabito (2009) aplicaram modelos monobjetivos em problemas sucroalcooleiros.

Silva (2009) aplicou um modelo multiobjetivo com a Programação por Metas (*Goal Programming* - GP) em problemas reais sucroalcooleiros. Este modelo integrava as etapas agrícolas e industriais, visando auxiliar nas decisões na safra e entressafra; Silva et al. (2009) desenvolveram um modelo multiobjetivo combinado com métodos por múltiplos critérios, cujo objetivo foi de propiciar maior interação dos gestores com o modelo matemático, além de potencializar a flexibilidade do modelo proposto. Estudos aplicando modelos GP podem ser encontrados nas seguintes pesquisas: Gokcen e Erel (1997) aplicaram um modelo de GP em uma linha de montagem. Esse modelo propiciou maior flexibilidade para o tomador de decisão na avaliação de diferentes alternativas. Leung e Chan (2009) estudaram a aplicação de um modelo de GP no planejamento agregado da produção com restrição de recurso. Liao (2009) investigou a aplicação de modelos de GP em problemas complexos de decisão. Há mais informações sobre estudos e aplicações da GP em Caballero et al. (2010).

O objetivo da pesquisa aqui relatada foi desenvolver, e implementar, um modelo multiobjetivo combinado com os conjuntos *fuzzy* para auxiliar nas decisões do planejamento agregado da produção e na distribuição de uma usina sucroalcooleira. O modelo possui a capacidade de lidar com situações reais em um ambiente de incertezas e fornece uma nova ferramenta para auxiliar nas decisões de planejamento agregado da produção e de distribuição em usinas sucroalcooleiras.

Apresentam-se algumas características desta pesquisa que a diferem dos outros estudos encontrados na literatura: (a) A integração das etapas agrícola, industrial e logística em um único modelo de programação matemática multiobjetivo *fuzzy* para auxiliar nas decisões de safra e entressafra; (b) Consideração das incertezas presentes em problemas reais sucroalcooleiros, e desta forma, desenvolver um modelo matemático mais próximo da realidade das usinas; (c) Desenvolvimento de um modelo multiobjetivo *fuzzy* customizado para uma usina sucroalcooleira; (d) Gerar novas informações relacionadas à alocação de metas de produção e decisões agrícolas e

logísticas, bem como uma melhor adequação do modelo, uma vez que este considera às incertezas que podem estar presentes tanto nos coeficientes tecnológicos das matrizes do modelo, quanto na estimação dos recursos; (e) Favorecer a geração de cenários, permitindo o acompanhamento destas variações e, a partir do confronto com a previsão feita pela empresa, propiciar uma melhor calibração das decisões, assim que tais distorções forem detectadas.

Este artigo está organizado em seções. Na seção 2 é feita uma breve fundamentação sobre o modelo multiobjetivo *fuzzy*. A seção 3 apresenta a justificativa e o método da pesquisa. A seção 4 refere-se ao desenvolvimento e à aplicação do modelo proposto, a seção 5 aborda os resultados do modelo e, na seção 6 estão às conclusões e o direcionamento para novas pesquisas, seguida das referências bibliográficas.

## 2. Programação por Metas *Fuzzy*

A GP difere consideravelmente da forma clássica de otimização adotada na programação matemática, exemplos de tais publicações incluem: Martel e Aouni (1998), Min e Storbeck (1991), Zeleny (1981). Para Deb (2001) e Chang (2007) uma das vantagens da utilização de modelos de otimização multiobjetivo é a possibilidade de extrair um conjunto de informação relevante, relacionada com o problema analisado, permitindo diferentes análises e percepções. Ignizio (1985) argumentou que problemas de otimização não devem apenas procurar uma solução ótima, mas gerar uma nova perspectiva de alcançar novas soluções que permitam a geração de conhecimento e aprendizagem. Existem várias variantes do modelo GP, associadas com diversos modelos de programação matemática, cada uma para aplicações específicas. Existem três modelos principais de GP que são utilizados com maior frequência, *Weighted goal programming* (WGP), sendo este originalmente o primeiro modelo. *Lexicographic goal programming* (LGP), este modelo foi criado para contornar alguns problemas do modelo WGP e, finalmente o modelo *MinMax* GP. Exemplos de tais aplicações podem ser encontrados em Tamiz et al. (1995), Tamiz et al. (1998), Jones e Tamiz, (2000), Jones e Barnes (2002) e Romero (2004).

Sobre a utilização de modelos GP integrada com os conjuntos *fuzzy*, tem-se alguns trabalhos interessantes. Mohamed (1997) investigou o relacionamento entre a GP e *fuzzy*. Chen e Tsai (2001) formularam um modelo *fuzzy goal programming* (FGP) com a incorporação de importâncias e prioridades diferentes, utilizando um modelo aditivo para maximizar a soma dos graus de realização de todas as metas *fuzzy*.

Pal e Moitra (2003) propuseram um modelo de GP para resolver problemas com múltiplos objetivos *fuzzy*, usando a programação dinâmica. Esses autores comentam que a GP tem sido aplicada na resolução de problemas de múltiplos objetivos em situações reais. Kumar et al. (2004) aplicou um modelo *fuzzy mixed integer goal programming* (FMIGP) para resolver um problema de seleção de fornecedores. Petrovic e Aköz (2007) propuseram um novo modelo FMIGP, onde os níveis hierárquicos das metas são definidos de forma imprecisa. Jamalnia e Soukhakian (2009) aplicaram uma abordagem híbrida FMIGP com diferentes objetivos no planejamento agregado da produção.

Para Martel e Aouni (1998), a primeira formulação multiobjetivo utilizando uma abordagem de programação *fuzzy* para um problema de Programação Linear foi inicialmente proposta por Zimmermann (1978). Nesta formulação, foi usado o conceito da função de pertinência (*Membership function*), introduzido por Zadeh (1965) e Bellman e Zadeh (1970). Narasimhan (1980) e Hannan (1981a, 1981b) foram os primeiros a fornecer uma formulação FGP, inspirada pelo conceito da função de pertinência. Nas expressões de (1) a (5) está a formulação de Hannan, que é equivalente à de Narasimhan, Martel e Aouni (1998):

$$\text{Min } Z = \lambda \tag{1}$$

$$\text{s.a: } \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j / \Delta_i \right) - \delta_i^+ + \delta_i^- = g_i / \Delta_i; \tag{2}$$

$$\lambda + \delta_i^- + \delta_i^+ \leq 1 \tag{3}$$

$$Cx \leq c \tag{4}$$

$$\lambda, \delta_i^+, \delta_i^- \text{ com } x_j \geq 0, (\text{para } j = 1, 2, \dots, n \text{ e } i = 1, 2, \dots, p) \tag{5}$$

onde:

$g_i$  é a meta associada ao objetivo  $i$ ;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  é um vetor de  $n$  variáveis de decisão;

$a_{ij}$  são os parâmetros tecnológicos relacionados às restrições do sistema;

$c$  são os recursos disponíveis;

$C$  são os coeficientes relacionados às restrições do sistema;

$\delta_i$ : é afastamento positivo ou negativo com relação à meta  $i$ ;

$\Delta_i$ : é a constante de afastamento em relação aos níveis de aspiração  $g_i$ . Os valores de  $\Delta_i$  são subjetivamente escolhidos pelos tomadores de decisões

Esta formulação incorpora uma representação linear equivalente à função de pertinência usada por Hannan (1981a), dada pelas expressões (6) a (9).

$$0 \text{ se } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq g_i - \Delta_i; \tag{6}$$

$$\left( \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - (g_i - \Delta_i) \right) / \Delta_i \text{ se } g_i - \Delta_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq g_i; \tag{7}$$

$$\left( g_i + \Delta_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right) / \Delta_i \text{ se } g_i - \Delta_i \leq \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq g_i + \Delta_i; \tag{8}$$

$$0 \text{ se } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq g_i + \Delta_i; \tag{9}$$

Segundo Jamalnia and Soukhakian (2009), há três tipos mais comuns de funções de pertinência quando se trabalha com números triangulares *fuzzy*, conforme mostram as Figuras 1 a 3, com a meta (*Goal*) representada pelas equações (10-12):

$$G_k(x) \lesseqgtr g_i \quad k = 1, \dots, m \tag{10}$$

$$G_k(x) \gtrreqgtr g_i \quad k = m + 1, \dots, n \tag{11}$$

$$G_k(x) \cong g_i \quad k = n + 1, \dots, l \tag{12}$$

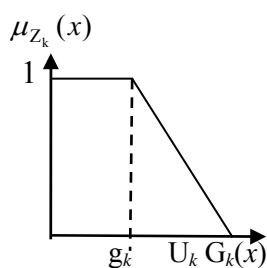


Figura 1.  $G_k(x) \lesssim g_i$

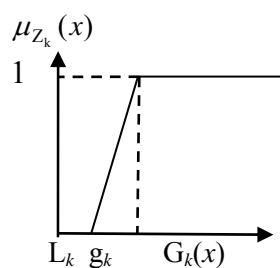


Figura 2.  $G_k(x) \gtrsim g_i$

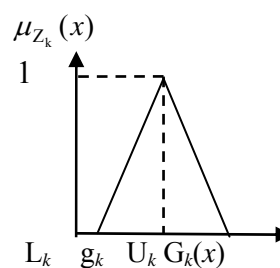


Figura 3.  $G_k(x) \cong g_i$

Para mais detalhes sobre o modelo desenvolvido neste artigo, consultar os trabalhos de Chen and Tsai (2001), Kumar et al. (2004), e Jamalnia e Soukhakian (2009).

### 3. Justificativa, materiais e métodos

#### 3.1. Justificativa

Caballero (2010) desenvolveu uma pesquisa tipo *survey* sobre GP que identificou, em mais de 750 artigos consultados, uma maior aplicação dos modelos WGP e *Minmax* GP. Este estudo mostrou que os modelos de GP são aplicados com maior frequência na indústria, seguido por aplicações em recursos naturais e em negócios. Outra informação importante é com relação às áreas que mais aplicam modelos de GP, tendo sido constatado que a engenharia é a área que mais utiliza este modelo, seguida pela teoria da decisão e negócios. Ele também investigou as características de problemas nos quais se aplicam modelos de GP e percebeu que isto ocorre em problemas com variáveis binárias, inteiras e *fuzzy*. Chang (2007) comenta que no “mundo real” níveis de aspirações imprecisas podem existir, e tal contexto é muito presente em problemas sucroalcooleiros. Paiva (2009) comenta que agroindústria sucroalcooleira possui muitas incertezas inerentes ao seu processo de planejamento. Incertezas com relação ao mercado de *commodities*, incertezas relativas à matéria-prima e processo de produção. Jamalnia e Soukhakian (2009) comentam que técnicas tradicionais de programação matemática não são adequadas para resolver problemas de planejamento agregado da produção do “mundo real”. Aouni e Kettani (2001) comentam que ao longo dos 40 anos após a criação da GP há relatos de aplicações em vários setores, no entanto, não mencionam aplicação alguma em problemas sucroalcooleiros. Özcan e Toklu (2009) comentam que GP é amplamente utilizada para resolver problemas multiobjetivos. Uría et al. (2002) comentam que GP é a mais antiga abordagem com múltiplos critérios e é amplamente utilizada em muitas áreas, mas, também, não mencionam a aplicação em usinas de açúcar e álcool.

Portanto, tal contexto justifica a importância desta pesquisa, e mostra a contribuição científica deste trabalho que é gerar novas aplicações para a literatura de GP e *fuzzy*. O modelo aqui proposto e implementado inclui variáveis binárias e *fuzzy*. Como contribuição tecnológica cita-se o emprego de novas técnicas híbridas de programação matemática em problemas sucroalcooleiros.

#### 3.2. Materiais e Métodos

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002) e Bryman e Bell (2007) este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, com objetivos empíricos normativos e a forma de abordar o problema é quantitativa, sendo a modelagem utilizada como método de pesquisa.

As fases da pesquisa estão ilustradas pela Figura 4 e comentadas a seguir:

- Identificação do problema – Foram realizadas visitas a usina e, com a utilização do mapeamento de processos, foi possível identificar os parâmetros que deveriam compor o modelo. Também foram analisados relatórios internos de produção;

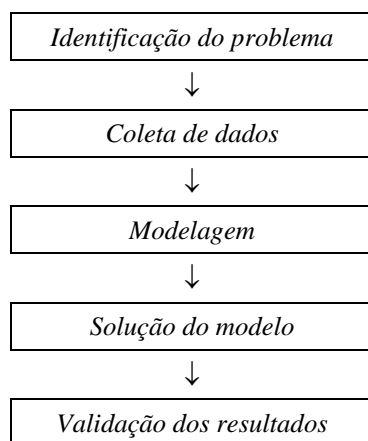


Figura 4- Etapas da pesquisa

- Coleta de dados – Utilizou-se do relatório interno de produção e de informação agrícola;
- Modelagem – A modelagem contempla decisões de safra e entressafra (52 semanas);
- Experimento – utilizou-se a linguagem de modelagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS 23.3) e o solver *CPLEX* 12.1;
- Validação dos resultados – Feita com o apoio dos gestores e também com a comparação dos resultados do modelo com os resultados reais da usina.

#### 4. Modelagem do Problema

A Figura 5 mostra os processos de produção dos açúcares, alcoóis, melações e derivados analisados.

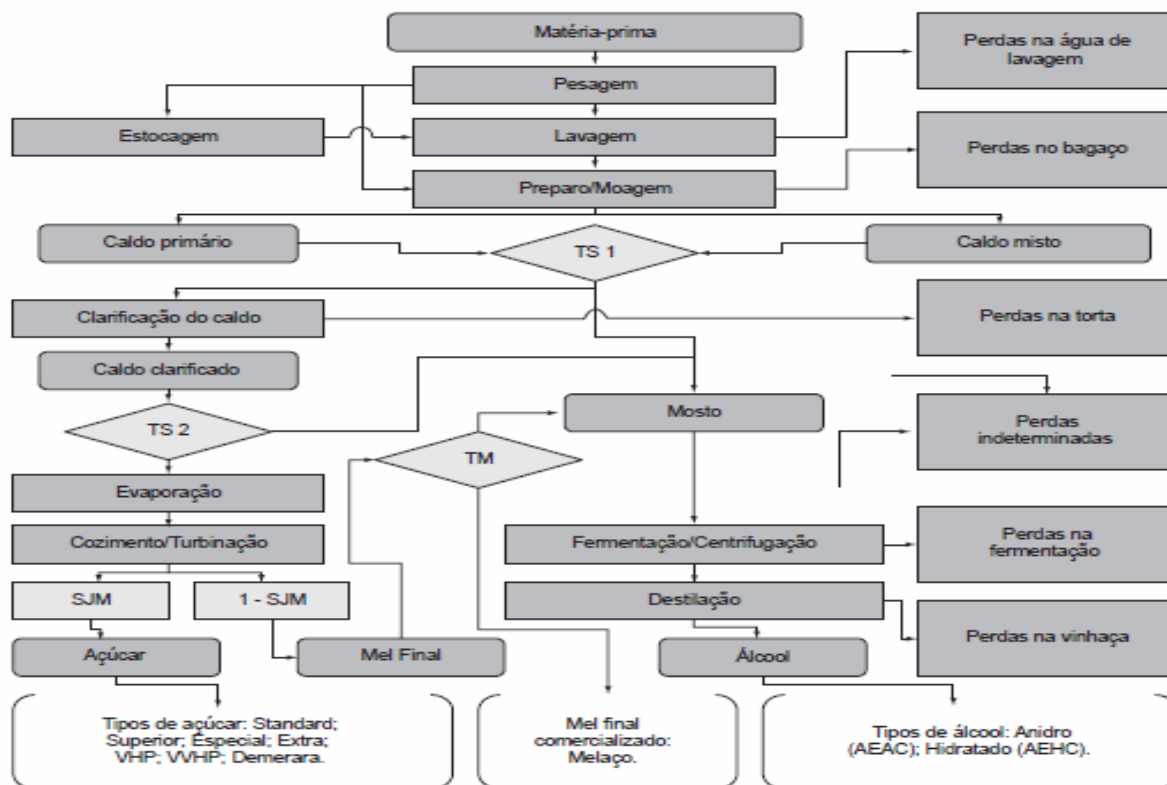


Figura 5. Fluxograma do processo de produção de açúcar, álcool e melaço (Fonte: Paiva, 2009)

Para maiores detalhes sobre o cálculo da matriz de rendimento ( $A_{pkt}$ ) e dos custos dos processos industriais ( $CK_{kt}$ ) consultar Paiva e Morabito (2007, 2009) e Paiva (2009). A seguir apresentam-se alguns dos índices, parâmetros, variáveis, inequações e equações utilizadas no desenvolvimento do modelo multiobjetivo *fuzzy*:

*Índices*

- $p$  Produtos,  $p \in \{VHP, VVHP, Cristal, AHEC\}$ ;
- $e$  Opção de estoque,  $e \in \{Eprop\}$ ;
- $t$  Períodos,  $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ ;
- $pp$  Co- produtos,  $pp \in \{Bagaço e Óleo Fúsel\}$ .

*Parâmetros*

- $M_t^{\min}$  Moagem mínima semanal [ton/sem];
- $M_t^{\max}$  Moagem máxima semanal [ton/sem];

*Variáveis*

- $I_{pet}$  Quantidade do produto  $p$  estocado na opção de estoque  $e$  no período  $t$  ([ton]-açúcares ou [m<sup>3</sup>]-AEHC).
- $\mu_1$  Grau de realização da meta da margem de contribuição  $Z_1$ ;

*Variáveis auxiliares*

- $XA_{p,t}$  Quantidade produzida do produto  $p$  na semana  $t$  ([ton]-açúcares ou [m<sup>3</sup>]-AEHC).

Para mais detalhes sobre todos os índices, parâmetros, equações, variáveis de decisão, variáveis auxiliares e inequações, consultar Silva (2009) e Silva et al. (2009).

A função de pertinência triangular utilizada é mostrada pela equação (13) e ilustrada na Figura 6.

$$\mu_{Z_1} = \begin{cases} \left[ \frac{Z_1 - 10.000.000}{15.000.000 - 10.000.000} \right], & \text{se } 10.000.000 \leq Z_1 \leq 15.000.000 \\ \left[ \frac{20.000.000 - Z_1}{20.000.000 - 15.000.000} \right], & \text{se } 15.000.000 \leq Z_1 \leq 20.000.000 \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (13)$$

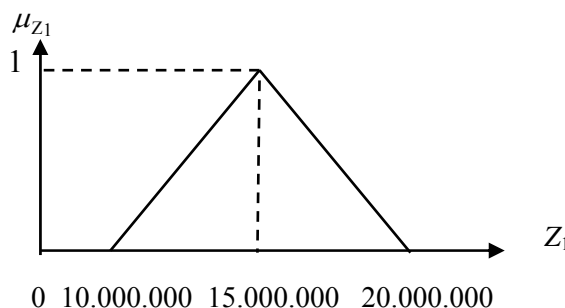


Figura 6. Função de pertinência para a meta margem de contribuição global.

Os níveis de aspirações das cinco metas *fuzzy* são:

Meta 1 - Margem de contribuição global:

$$\left( \sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) + \left( \sum_{pit} VVPL_{pit} \cdot DSP_{pit} \right) + \left( \sum_{pp} \sum_t DAC \cdot Vps \right) + \left( \sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e hs_{pe} \cdot I_{pe \cdot semx} + \sum_{pit} CAC_{pit} \cdot XAC_{pit} + \sum_{pp} \sum_t DAC \cdot Cs \right) \cong 15.000.000 \tag{14}$$

Meta 2: Produção total do açúcar VVHP; Meta 3: Produção total do açúcar VHP; Meta 4: Produção total do açúcar cristal e Meta 5: Produção total do álcool AEHC. Estão representadas a seguir:

$$\sum_{"VVHP"} XA_{pt} \cong 30.000 ; \sum_{"VHP"} XA_{pt} \cong 15.000 ; \sum_{"Cristal"} XA_{pt} \cong 25.000 ; \sum_{"AEHC"} XA_{pt} \cong 85.000$$

Os limites máximos e mínimos para o desvio para as meta *fuzzy* 2 – 5 são os mesmos em ambos os lados, e são definidos como: 5.000, 5.000, 5.000 toneladas e 5.000 m<sup>3</sup>, respectivamente. Estes valores foram obtidos por meio da análise de dados históricos da usina estudada.

O modelo está expresso pelas expressões de (15) a (27):

- A função objetivo (15) é chamada de função da realização *fuzzy*

$$Max \sum_{k=1}^5 \mu_k \tag{15}$$

- A equação (16) calcula a margem de contribuição global agroindustrial

$$\mu_1 \leq \left[ \left( \sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) + \left( \sum_{pit} VVPL_{pit} \cdot DSP_{pit} \right) + \left( \sum_{pp} \sum_t DAC \cdot Vps \right) - \left( \sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e hs_{pe} \cdot I_{pe \cdot semx} + \sum_{pit} CAC_{pit} \cdot XAC_{pit} + \sum_{pp} \sum_t DAC \cdot Cs \right) - 4 \right] \tag{16}$$

$$\mu_1 \leq \left[ \left( \sum_p \sum_k V_{pt} \cdot A_{pkt} \cdot M_t \right) + \left( \sum_{pit} VVPL_{pit} \cdot DSP_{pit} \right) + \left( \sum_{pp} \sum_t DAC \cdot Vps \right) - \left( \sum_m C_{mt} \cdot M'_{mt} + \sum_f L_{ft} \cdot M''_{ft} + \sum_k CK_{kt} \cdot M'''_{kt} + \sum_p \sum_e h_{pe} \cdot I_{pet} + \sum_p \sum_e hs_{pe} \cdot I_{pe \cdot semx} + \sum_{pit} CAC_{pit} \cdot XAC_{pit} + \sum_{pp} \sum_t DAC \cdot Cs \right) - 2 \right] \tag{17}$$

- A equação (18) mostra a quantidade do produto *p* na opção de estoque *e* na semana *t*

$$\sum_e I_{pet} = I_0 + \sum_e I_{pet-1} + \sum_k A_{pkt} \cdot M_t - DAC_{pt} - DSP_{pit} \tag{18}$$



- As inequações (19-20) estão associadas à quantidade total produzida do açúcar VHP

$$\mu_2 \leq - \sum_{\text{"VHP"}} XA_{pt} + 4 \quad (19)$$

$$\mu_2 \leq \sum_{\text{"VHP"}} XA_{pt} - 2 \quad (20)$$

- As expressões (21-22) estão associadas à quantidade total produzida do açúcar VVHP.

$$\mu_2 \leq - \sum_{\text{"VVHP"}} XA_{pt} + 7 \quad (21)$$

$$\mu_2 \leq \sum_{\text{"VVHP"}} XA_{pt} - 5 \quad (22)$$

- As inequações (23-24) estão associadas à quantidade total produzida do açúcar cristal.

$$\mu_5 \leq - \sum_{\text{"Cristal"}} XA_{pt} + 6 \quad (23)$$

$$\mu_5 \leq \sum_{\text{"Cristal"}} XA_{pt} - 4 \quad (24)$$

- As inequações (25-26) estão associadas à quantidade total produzida do álcool AEHC.

$$\mu_5 \leq - \sum_{\text{"AEHC"}} XA_{pt} + 17 \quad (25)$$

$$\mu_5 \leq \sum_{\text{"AEHC"}} XA_{pt} - 15 \quad (26)$$

As expressões (27) representam as restrições de domínio das variáveis

$$X_{kt} \in \{0,1\}; M \geq 0; M'_{mt} \geq M''_{ft} \geq 0; M'''_{kt} \geq 0 \quad (27)$$

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

$$XAC_{pilt} \geq 0; \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5 \geq 0$$

## 5. Resultados do modelo

O modelo multiobjetivo *fuzzy* possui 1.248 variáveis binárias, 41.218 variáveis não negativas e 11.078 restrições.

Para a otimização do modelo utilizou-se um computador com processador Intel (Core 2 Duo) 2,53 GHz, com 4GB de RAM e sistema operacional da Microsoft plataforma 64 bits. O tempo computacional foi de aproximadamente 45 minutos. Os resultados consolidados estão na Tabela 1.

Analisando a Tabela 1, percebe-se que o resultado do modelo produziu mais álcool (AEHC) do que açúcar, sendo este o mesmo cenário da produção da usina. Este cenário ocorreu, pois uma das metas *fuzzy* ( $\mu_1$ ) está relacionada à margem de contribuição global, sendo na época o produto álcool mais lucrativo.

Analisando as diferenças entre o modelo e a usina (coluna C) a margem de contribuição oriunda do modelo foi 6,76% superior ao resultado obtido pela usina e com uma eficiência industrial ligeiramente superior. Estes resultados demonstram boa aderência do modelo à realidade da usina, possibilitando decisões eficientes.

A função de realização para todas as metas foi igual a 1, o que indica que todas as metas atingiram os respectivos alvos ou ficaram muito próximas destes.

Tabela 1-Comparação dos resultados do modelo com os valores reais da usina.

	(a) Modelo	(b) Usina (2008/2009)	(c) = [(a-b)/b] Comparação Modelo x Usina	
Produção Total	Cristal [ton]	26.951	-	
	VHP [ton]	14.086	-	
	VVHP [ton]	30.343	-	
	Total produzido de açúcares [ton]	71.380	68.000	4,97%
	AEHC [m <sup>3</sup> ]	80.894	84.360	-4,10%
Eficiência industrial	90,8	90,3	0,55%	
Margem de contribuição [\$]	14.308.760,00	13.403.015,00	6,76%	
Função de realização <i>fuzzy</i> $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$	1			

## 6. Conclusões e direcionamentos para futuras pesquisas

Este artigo propôs um modelo multiobjetivo *fuzzy* para auxiliar nas decisões do planejamento agregado da produção e na distribuição de uma usina sucroalcooleira. O modelo fornece informações úteis para os gestores, ajudando-os a compreender melhor quais são as variáveis críticas, possibilitando uma decisão mais eficiente. Outra vantagem do modelo é a transformação de diferentes análises em cenários numa rotina, relacionados ao processo decisório, e desta forma, inibindo decisões incompletas e subjetivas. Os resultados deste estudo são promissores e incentivam outros esforços de pesquisa, tais como: (a) analisar os efeitos das incertezas nos parâmetros de entrada do modelo, por meio de técnicas de restrição de chance e da otimização robusta combinada com modelos de programação multiobjetivo; (b) Aplicar a metodologia de superfície de resposta e o projeto de experimento de mistura nos processos industriais, visando reduzir o número de variáveis, e quantificar a não linearidade da matriz de rendimento; (c) desenvolvimento de modelos de programação quadrática mista multiobjetivo (*Nonlinear goal programming*); (d) comparar o desempenho computacional do modelo utilizando à lógica *fuzzy* e a otimização robusta.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e FUNDUNESP pelo apoio.

### Referências

- Aouni, B. e Kettani, O.**, Goal programming model: A glorious history and a promising future. *European Journal of Operational Research*, 133, 225-231, 2001.
- Bellman, R. E., e Zadeh, L.A.**, Decision making in a fuzzy environment. *Management Sciences*. 17, 141-164, 1970.
- Bertrand, J. W. M. e Fransoo, J. C.**, Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, 22, 241-264, 2002.
- Bryman, A e Bell, E.**, Business research methods. 2.ed. *Oxford University Press*, 2007.
- Caballero, R., Gómez, T., Ruiz, F.**, Goal programming: Realistic Targets for the Near Future. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. DOI: 10.1002/mcda.442, 2010.
- Cock, J. H., Luna, C. A. e 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*, 67, 257-262, 2000.

- Conab (Companhia Nacional de Abastecimento):** Relatório técnico. Acessado em 09/04/2010 : <http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=73&NSN=1216>.
- Chang, C. T.,** Multi-Choice goal programming. *The International Journal of Management Science*, 35, 389-396, 2007.
- Chen, L. H. e Tsai, F.C.,** Fuzzy goal programming with different importance and priorities, *European Journal of Operational Research*, 133 548–556, 2001.
- Deb, K.,** Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. *John Wiley and Sons, England*, 2001.
- Gokcen, H. e Erel, E.,** A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics*, 48, 177-185, 1997.
- Grunow, M., Günter, H.O. e Westinner, R.,** Supply optimization for the production of raw sugar. *International Journal of Production Economics*, 110, 224-239, 2007.
- Hannan, E.L.,** On Fuzzy Goal Programming, *Decision Sciences* 12, 522–531, 1981a.
- Hannan, E.L.,** Further Comments on Fuzzy Priorities, *Decision Sciences*.12, 539–541, 1981b.
- Higgins, A. J. e Davies, I.,** A simulation model for capacity planning in sugar cane transport. *Computers and Electronics in Agriculture*, 47, 85-102, 2005.
- Higgins, A. J.,** Scheduling of road vehicles in sugar transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research*, 170, 987-1000, 2006.
- Higgins, A. J., Antony, G., Davies, I., Sandel, G., Prestwidge, D. e Andrew, B. A.,** Framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. *Agricultural Systems*, 82, 99-115, 2004.
- Iannoni, A. P., Morabito, R. A.,** Discrete simulation analysis of a logistics supply system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 42, 191-210, 2006.
- Jamalnia, A. e Soukhakian, M. A.,** 2009. A hybrid fuzzy goal programming approach with different goal priorities to aggregate production planning. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1474-1486, 2009.
- Jones, D., Barnes, E.M.,** Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. *Agricultural System*, 65, 137- 158, 2000.
- Jones, D.F., and Tamiz, M.,** Goal programming in the period 1990–2000, in: M. Ehrgott, X. Gandibleux (Eds.), *Multicriteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Survey*, Kluwer Academic *Publisher Boston*, (Chapter 3). 2002.
- Kawamura, M. S., Ronconi, D. P., e Yoshizaki, H.,** Optimizing transportation and storage of final products in the sugar and ethanol industry. *International Transactions in Operational Research*, 13, 425-439, 2006.
- Kumar, M., Vrat, P. e Shankar, R.,** A fuzzy goal programming approach for vendor selection problem in a supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 46, 69-85, 2004.
- Leung, S. C. H. e Chan, S. S. W.,** A goal programming model for aggregate production planning with resource utilization constraint. *Computers and Industrial Engineering*, 56, 138-141, 2009.
- Liao, C. N.,** Formulating the multi-segment goal programming. *Computers and Industrial Engineering*, 56, 1053-1064, 2009.
- Martel, J. M. e Aouni, B.,** Diverse Imprecise Goal Programming Model Formulations. *Journal of Global Optimization*, 12, 127-138, 1998.
- Mathew, J., and Rajendran, C.,** Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. *Computers in Industry*, 21, 331-334, 1993.
- Min, H. e Storbeck, J.,** On the Origin and Persistence of Misconceptions in Goal Programming. *Journal of Operational Research Society*, 42, 301–312, 1991.
- Milan, E. L., Fernandez, S. M. e Aragonés, L. M. P.,** Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, 174, 374-386, 2006.
- Mohamed, R.H.,** 1997. The relationship between goal programming and fuzzy goal programming. *Fuzzy Sets and Systems*, 89, 215-222, 1997.

- Montevechi, J. A. B., Pinho, A. F. de., Fabiano, L., e Marins, F. A. S.,** Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. 2007.
- Narasimhan, R.,** Goal Programming in a Fuzzy Environment. *Decision Sciences* 11,325–336, 1980.
- Narasimhan, R.,** 1981. On Fuzzy Goal Programming: Some Comments. *Decision Sciences* 12, 532–538, 1981.
- Oddoye, J. P., Jones, D. F., Tamiz, M. e Schmidt, P.,** Combining simulation and goal programming for healthcare planning in a medical assessment unit. *European Journal of Operational Research* 193, 250-261, 2009.
- Özcan, U. e Toklu, B.,** (2009). Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models. *Computers & Operations Research* 36, 1955-1965, 2009.
- Paiva, R. P. O. e Morabito, R.,** (2009). An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. *Annals Operations Research*, 169, 117-130, 2009.
- Paiva, R. P. O.,** Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta. Tese (Doutorado em Eng. de Produção) –Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- Pal BB, Moitra BN. e Maulik U.,** A goal programming procedure for fuzzy multiobjective linear fractional programming problem. *Fuzzy Set and Systems*, 139, 395–405, 2003.
- Petrovic, D. e Aköz, O.,** A fuzzy goal programming method with imprecise goal hierarchy. *European Journal of Operational Research* 181, 1427-1433, 2007.
- Romero, C.,** 2004. A general structure of achievement function for a goal programming model, *European Journal of Operational Research*, 153, 675–686, 2004.
- Silva, A. F, Marins, F. A. S, Salomon, V. A. P, Montevechi, J. A. B. e Neves, S. M.,** Decisões por múltiplos critérios e objetivos no planejamento agregado da produção e na comercialização e distribuição de uma usina sucroalcooleira. In: *Simpósio de Engenharia de Produção*, BAURU. XVI SIMPEP, 2009.
- Silva, A. F.,** Modelagem do planejamento agregado da produção de uma usina sucroalcooleira. Mestrado (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2009.
- Tamiz, M., Jones, D. F. e El-Darzi, E.,** A review of Goal Programming and its applications. *Annals of Operations Research*, 58, 39-53, 1995.
- Tamiz, M., Jones, D. Jones., and Romero, C.,** Romero. Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 111, 569-581, 1998.
- Uriá, M. V. R., Caballero, R., Ruiz, F. e Romero, C.,** Meta-goal programming. *European Journal of Operational Research*, 136, 422-429, 2002.
- Wang, R. C. e Liang, T. F.,** Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning. *Computers and industrial engineering*, 46, 17-41, 2004.
- Yoshizaki, H. T. Y.; Muscat, A. R. N. e Biazzi, J. L.,** Decentralizing ethanol distribution in southeastern Brazil. *Interfaces*, 26, 24-34, 1996.
- Zadeh, L.A.,** Fuzzy Sets. *Information and Control*. 8, 338–353, 1965.
- Zeleny, M.,** The Pros and Cons of Goal Programming, *Computers and Operations Research*, 8, 357–359, 1981.
- Zimmermann, H. J.,** Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Function. *Fuzzy Sets and Systems* 1, 45–55, 1978.