RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS REAIS DO SETOR SUCROENERGÉTICO COM MODELOS DE PROGRAMAÇÃO POR METAS

Aneirson Francisco da Silva
Fernando Augusto Silva Marins
Isabela Mira Ribeiro
Paulo Roberto Lopes

RESUMO

A Programação por Metas é uma importante abordagem analítica, em que metas foram atribuídas a todos os objetivos a serem otimizados e o decisor está interessado em minimizar a não realização destas metas. Propõe-se um modelo da Programação por Metas Estendida para auxiliar nas decisões relacionadas ao planejamento agrícola e ao planejamento agregado das etapas de agrícola, de produção e da distribuição em uma empresa do setor sucroenergético, incorporando a cogeração de energia. O modelo contempla decisões tomadas em um horizonte de planejamento semanal, incluindo a safra e entressafra. A aplicação do modelo proposto em uma usina brasileira do setor sucroenergético gerou resultados que auxiliaram a empresa na determinação de políticas ótimas de planejamento agregado.

PALAVRAS CHAVE. Programação de metas, Cogeração de energia, Planejamento agregado da produção e distribuição.

ABSTRACT

The Goal Programming (GP) is an important analytical approach, where goals have been assigned to all objectives to be optimized, and the Decision-Maker (DM) is interested in minimizing the non-achievement of those goals. We propose an Extended GP model for the aggregate planning of agricultural, production and distribution phases in a sugar and ethanol mill, incorporating energy cogeneration. The model includes the stages of industrial and distribution, enabling DM's decision to be made in a weekly planning horizon, including harvest and between harvests periods. The application of the proposed model in a Brazilian Sugar and Ethanol Milling has generated results that aided it to obtain optimal aggregate planning policies.

KEYWORDS. Goal programming, Energy Cogeneration, Aggregate production and distribution planning.

1. Introdução

Paiva (2009) comenta que, no Brasil, tem havido um aumento na utilização de métodos quantitativos na indústria sucroalcooleira. Silva *et al.* (2010) desenvolveram um modelo multiobjetivo *fuzzy*, incorporando as incertezas presentes nos processos sucroalcooleiros, e apresentam uma revisão atualizada da literatura correlata ao tema.

O objetivo da pesquisa foi desenvolver um modelo de programação de metas para auxiliar nas decisões do planejamento agregado da colheita, da produção e da distribuição em uma usina sucroalcooleira. Suas características são: (a) É um modelo da Programação por Metas Estendida (*Extended Goal Programming* – EGP), proposto por Romero *et al.* (1998); (b) Integra as etapas agrícola, industrial e logística em um único modelo para auxiliar nas decisões de safra e entressafra; (c) Incorpora a possibilidade de cogeração da energia elétrica.

Este artigo está organizado em seções. Na seção 2 é feita uma breve fundamentação sobre modelos GP, apresentando, também, uma justificativa e as contribuições do trabalho. A seção 3 refere-se ao desenvolvimento e otimização do modelo, a seção 4 contempla a discussão dos resultados e o direcionamento para novas pesquisas, seguida das referências bibliográficas.

2. Alguns modelos da Goal Programming

A GP difere da forma clássica de otimização adotada na Programação Matemática, como comentado por Martel e Aouni (1998), Min e Storbeck (1991) e Charnes *et al.* (1979). De acordo com Yaghoobi e Tamiz (2007) e Romero (2004) existem três modelos principais de GP que são utilizados com maior frequência: *Weighted Goal Programming* (WGP), *Lexicographic Goal Programming* (LGP) e o modelo MINMAX GP (MAGP). Exemplos de aplicações podem ser encontrados em Tamiz *et al.* (1995), Tamiz *et al.* (1998), Jones e Tamiz (2000) e Romero (2004).

Conforme Martel e Aouni (1998), o modelo de WGP pode ser expresso por (1) – (4):

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{p} W_i (d_i^+ + d_i^-) \tag{1}$$

$$\text{S.a: } \sum_{j=1}^{P} a_{ij} x_j - d_i^+ + d_i^- = g_i \tag{2}$$

$$Cx \leq c \tag{3}$$

$$x_j, d_i^+, \text{e } d_i^- \geq 0 \text{ para } (i = 1, 2....., p \text{ e } j = 1, 2....., n). \tag{4}$$

onde W_i representa o peso de cada desvio d_i , g_i representa a disponibilidade (flexível) do recurso *i* e *c* representa a disponibilidade dos recursos que são limitados.

A *Lexicographic Goal Programming* (LGP) foi criada para contornar algumas limitações do modelo WGP, conforme (Tamiz *et al.*, 1995). Na LGP os objetivos apresentam prioridades diferentes, dadas por $P_1, P_2, ..., P_n$, com $P_1 > P_2 > P_3 .... > P_n$, e ele pode ser expresso por (5) – (8), conforme Chang (2007):

$$\text{Lex min a} = \sum_{i \in h_1} (\alpha_i d_i^+ + \beta_i d_i^-),....., \sum_{i \in h_r} (\alpha_i d_i^+ + \beta_i d_i^-),..., \sum_{i \in h_Q} (\alpha_i d_i^+ + \beta_i d_i^-) \tag{5}$$

S.a: $f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = g_i, \quad i = 1, 2, ..., n, \quad i \in h_r$ (6)

$r = 1, 2, ..., Q, d_i^+, d_i^- \geq 0, \; i = 1, 2, ..., n, X \in F$ (F é um conjunto viável) (7)

x_j, d_i^+, e $d_i^- \geq 0$ para ($i = 1, 2....., p$ e $j = 1, 2....., n$). (8)

onde h_r representa a hierarquia das metas e ou objetivos, alocados no nível de prioridade; α_i e β_i são pesos para as variáveis de desvio d_i^+ e d_i^-, com d_i^+= Max $(0, f_i(X) - g_i)$ e d_i^-= Max $(0, g_i - f_i(X))$. No contexto em que é difícil o estabelecimento de metas, os gestores buscam objetivos que variem em intervalos e se tenta minimizar (maximizar) o valor máximo (mínimo) destes intervalos. Flavell (1976) propôs o modelo MINMAX GP (MAGP), expresso por (9) – (12), para abordar tais situações:

Função de realização:

Min D (9)

S.a:

$\left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right) - D \leq 0$ (10)

$f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = t_i \;\; i \in \{1, ..., q\},$ (11)

$x \in F, d_i^- \geq 0, d_i^+ \geq 0.$ (12)

Na formulação MAGP o desvio máximo (D) é minimizado, fornecendo uma solução que dá a máxima importância para o objetivo mais deslocado em relação a sua meta, gerando uma solução mais equilibrada entre a realização dos diferentes objetivos (Romero, 2001). O modelo EGP foi proposto por Romero *et al.* (1998), que adotaram uma Função de Realização que pode ser uma combinação convexa da WGP e MAGP, ou da LGP e MAGP. Em Romero (2004) está um modelo EGP, conforme (13) – (16), que combina as formulações da WGP e da MAGP:

Função de realização:

Min $(1 - \lambda)D + \lambda \sum_{i=1}^{q} \left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right)$ (13)

S.a:

$\left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right) - D \leq 0$ (14)

$f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = t_i \;\; i \in \{1, ..., q\},$ (15)

$x \in F, d_i^- \geq 0, d_i^- \geq 0, \lambda \in [0, 1].$ (16)

onde o parâmetro λ representa o peso atribuído à minimização da soma ponderada das variáveis dos desvios indesejáveis; α_i e β_i são os pesos atribuídos, respectivamente, às variáveis de desvio negativo e positivo d_i^- e d_i^+.

Observe-se que, para λ = 0, tem-se a função de realização MAGP, para λ = 1, a função de realização WGP, e outros valores de parâmetro λ pertencentes ao intervalo (0, 1) são soluções intermediárias (Romero, 2004). Além disto, a variável D está associada ao desvio máximo para as metas, ou seja, quanto mais próximo de zero ela for, melhor será a solução.

Conforme Romero (2001), quando se combinam os modelos LGP e MAGP, tem-se o modelo ELGP que pode ser formulado por (17) - (20):

$$\text{Min a} = \begin{bmatrix} (1-\lambda_1)D_1 + +\lambda_1 \sum_{i \in h_1}^{q} \left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right), \ldots, (1-\lambda_r)D_r + \lambda_r \sum_{i \in h\, r}^{q} \left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right), \ldots, \\ (1-\lambda_Q)D_Q + \lambda_Q \sum_{i \in h\, Q}^{q} \left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right). \end{bmatrix} \quad (17)$$

S.a:

$$\left(\alpha_i d_i^- + \beta_i d_i^+\right) - D \le 0,\ i \in h_r,\ r \in \{1, \ldots, Q\}, \quad (18)$$

$$f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = t_i \ \ i \in \{1, \ldots, q\}, \quad (19)$$

$$x \in F, d_i^- \ge 0, d_i^+ \ge 0, \lambda_r \in [0,1]. \quad (20)$$

Aqui foi escolhido o modelo ELGP, pois o modelo apresenta metas com unidades diferentes, portanto, justifica-se o uso do ELGP para ser aplicado às usinas sucroalcooleiras, cuja importância está em contribuir com novas aplicações para a GP. Utilizou-se o GAMS 23.6.5 - *General Algebraic Modeling System* e o *Solver* CPLEX 12.2.1 e a validação do modelo foi feita com o apoio dos gestores da usina modelada.

3. Modelagem do Problema

Aqui apresentam-se os índices, parâmetros, variáveis de decisão e variáveis auxiliares.

Índices:

u	Processos industriais, $u \in \{1, 2, \ldots, U\}$;
t	Períodos, $t \in \{1, 2, \ldots, T\}$;
p	Produtos, $p \in$ {*VHP*, *AEAC, AEHC/Ethanol*};
i	Talhões (blocos) de cana, $i \in \{b_1, b_2, \ldots, b_6\}$;
f	Transporte agrícola, $f \in$ {*Fprop, farrend, fterc*};
k	Cana de fornecedores, $k \in$ {*forna, fornb, fornc, fornd*};
j	Frente de corte, $j \in$ {*mecanizada, manual*};
q	Estado da cana, $q \in$ {*queimada, crua*};
c	Condição da cana, $c \in$ {*média, tardia, precoce*}.
e	Opção de estoque, $e \in$ {*Eprop, Eterc*};
d	Destinos/portos, $i \in$ {Dest1, Dest 2,… Dest D};
v	Variedade de cana, $v \in$ {RB83, RB76, SP80, IAC86, CB45, RB72, SP71, RB73, SP70, SP79};
pp	Coprodutos, $pp \in$ {Bagaço e óleo Fúsel};
l	Transporte logístico, $l \in$ {TL1, TL2,…, TL L}.

Parâmetros:

$M^{\min}{}_t$	Moagem mínima semanal [ton/mês];
$M^{\max}{}_t$	Moagem máxima semanal [ton/mês];
CT_j	Capacidade semanal da frente de corte j [ton/mês];
$R_{j\,t\,i}$	Custo da frente de corte j no período t colhendo no talhão i [$];

$S_{j\,t\,k}$	Custo da frente de corte *j* no período *t* colhendo no fornecedor *k* [$];
CP_t	Capacidade do transporte próprio no período *t* [ton/mês];
ϕ_t	Tempo real de operação da indústria durante um período *t* [%];
$\beta_{f\,t}$	Disponibilidade da frota própria *f* durante o período *t* [%];
$Disp_{i,\,q,\,c,\,v,\,0}$	Previsão de safra para o talhão *i* no estado *q* e na condição *c* [ton] na variedade *v*;
$Disp_{k0}$	Previsão de safra por tipo de fornecedor *k* [ton];
$ATR_{i,\,q,\,c,\,v,\,t}$	Quantidade de açúcares totais recuperáveis (ATR) do talhão *i* na condição *c* no período *t* [ton/mês];
$U_{i,\,q,\,c,\,v,\,t}$	Diferença entre o valor do ATR ótimo do talhão *i* em relação ao valor do ATR atual, por fonte de matéria prima no período *t* [ton/mês];
$ATRK_{k\,t}$	Define o ATR por fonte de fornecedor *k* no período *t* [ton/mês];
$UK_{k,t}$	Diferença entre o valor do ATR ótimo do fornecedor *k* em relação ao valor do ATR atual por fonte de matéria prima no período *t* [ton/mês];
$L_{f\,k\,t}$	Custo variável de transporte *f* para o fornecedor *k* no período *t* [$/ton];
$L1_{i,c,t}$	Custo variável transporte para o talhão *i* na condição *c* no período *t* [$/ton];
$C_{i,c,t}$	Custo agrícola do talhão *i* na condição *c* no período *t*;
$CK_{k\,t}$	Custo agrícola por fonte de fornecedor *k* no período *t* [$/ton];
$CN_{u,t}$	Custo do processo *u* no período *t* [$/ton];
π_t	Tempo efetivo de moagem no período *t* [%];
$Cest_{p,e}$	Capacidade de estocagem do produto *p* por opção de estoque *e* no período *t* [ton ou m^3];
$h_{p,e,t}$	Custo variável de estocagem do produto *p* na opção de estoque *e* na semana *t* [$/ton ou $/$m^3$];
$hs_{p,e}$	Estoque do produto *p* por opção de estoque *e* no período de entressafra [$/ton ou $/$m^3$];
$DS_{p,t}$	Demanda pelo produto *p* no período *t* [ton ou m^3];
$DSP_{p,d,t}$	Demanda pelo produto *p* no período *t* para o destino *i* [ton ou m^3];
$VP_{p,t}$	Valor de venda do produto *p* no período *t* [$/ton ou $/$m^3$];
I_{pe0}	Estoque inicial do produto *p* por opção de estoque *e* [ton ou m^3];
$A_{p,u,t}$	Matriz de rendimento produto *p* no proc. selecionado *k* em *t* [ton ou m^3];
$CK_{k,t}$	Custo da matéria prima do fornecedor *k* no período *t* [$/ton];
$I_{p,e,t}$	Custo de estocagem do produto *p* na opção de estoque *e* no período *t* [$/ton];
$CAC_{p\,d\,l\,t}$	Custo do produto *p* para o destino *i* com o transporte *l* no período *t* [$/ton];
$DACS_{pp\,t}$	Demanda do coproduto *pp* no período *t* [ton ou m^3];
$VPS_{pp\,t}$	Valor de venda do coproduto *pp* no período *t* [$/ton];
$CS_{pp\,t}$	Custo de produção do coproduto *pp* no período *t* [$/ton ou $/$m^3$];
$VVPL_{p\,d\,t}$	Valor de venda do produto *p* para o destino *i* no período *t* [$/ton];
$VPS_{pp\,t}$	Valor de venda do coproduto *pp* no período *t* [$/ton];
Ib_0	Estoque inicial de bagaço [ton];
$Fibra_{q,\,c,\,t}$	Fibra da cana no estado *q*, na condição *c* no período *t* [%];
$FibraK_{k,q,ct}$	Fibra da cana do fornecedor *k* no estado *q* na condição *c* no período *t* [%];
Ub_t	Umidade do bagaço após a moenda, no período *t* [%];
Eb	Percentual mínimo de estoque do bagaço produzido [%];
EPb	Estoque de bagaço para passagem de safra [ton];
RC	Rendimento médio das caldeiras [ton vapor/ ton bagaço];
RCF	Rendimento médio da casa de força [MWh/ton vapor];
CFVAP	Consumo fixo vapor na moagem [ton de vapor/ton de cana];

$CVAP_p$	Consumo variável vapor servido em cada produto *p* [ton vapor/ton ou m ^{3}];
CFE	Consumo fixo de energia na moagem (MWh/ton de cana);
CVE_p	Consumo variável de energia em cada produto *p* [MWh/ton ou por m^3];
VAPmax	Produção diária máxima de vapor [ton/dia];
EGmax	Geração diária máxima de energia [MWh/dia];
VE	Valor da energia vendida [$/MWh];

Variáveis de decisão:

$X_{i,\, q,\, c,\, v,\, t}$	Seleção do talhão *i* no estado *q* na condição *c* na variedade *v* no período *t*;
$M'_{i\,q\,c\,v\,t}$	Quantidade de cana cortada no talhão *i* no estado *q* e na condição *c* da variedade *v* no período *t* [ton];
$M''_{f\,t}$	Quantidade de cana transportada por opção de transporte *f* no período *t* [ton];
$Disp_{i,\, q,\, c,\, v,\, t}$	Disponibilidade de matéria prima por talhão *i* no estado *q* e na condição *c* da variedade *v* no período *t* [ton];
$Disp_{k\,t}$	Disponibilidade de matéria prima por fornecedor *k* no período *t* [ton];
$H_{j\,t}$	Escolha da opção da frente de corte *j*;
$N_{k\,t}$	Quantidade de cana fornecida por opção de fornecedor *k* no período *t*
$I_{p,\, e,\, t}$	Quant. produto *p* estocado na opção de estoque *e* no período *t* [ton ou m^3];
$Y_{u,\, t}$	Seleção do processo de produção *u* no período *t;*
$M'''_{u\,t}$	Quant. cana processada no processo de produção *u* no período *t* [ton];
$XAC_{p\,i\,l\,t}$	Quant. produto *p* exportada para o destino *i* usando a opção de transporte *l* no período *t* [ton ou m^3];
Ib_t	Estoque de bagaço para geração de energia no período *t* [ton];
Mb_t	Quantidade de bagaço consumido para geração de vapor no período *t* [ton];
VAP_t	Quantidade de vapor produzido no período *t* [ton];
EG_t	Quantidade de energia produzida no período *t* [MWh];
EE_t	Quantidade de energia exportada no período *t* [MWh].

Variáveis auxiliares:

λ	Parâmetro da combinação de peso entre os modelos WGP e MAGP;
D_1	Variável de desvio total para a meta dos custos totais;
D_2	Variável de desvio total para a meta de produção dos alcoóis;
D_3	Variável de desvio total para a meta de ATR;
D_4	Variável de desvio total para a meta de cogeração de energia elétrica;
d_θ^+	Variável de desvio positiva para a realização da meta de custos;
d_θ^-	Variável de desvio negativa para a realização da meta de custos;
d_ψ^+	Variável de desvio positiva para a realização da meta de produção dos alcoóis;
d_ψ^-	Variável de desvio negativa para a realização da meta de produção dos alcoóis;
d_φ^+	Variável de desvio positiva para a realização da meta de ATR;
d_φ^-	Variável de desvio negativa para a realização da meta de ATR;

d_ρ^+ Variável de desvio positiva para a realização da meta de cogeração de energia elétrica;

d_ρ^- Variável de desvio negativa para a realização da meta de cogeração de energia elétrica;

β Valor do peso para a variável de desvio positiva para a realização de cada meta;

α Valor do peso para a variável de desvio negativa para a realização de cada meta.

O Modelo EGP pode ser expresso por (13) – (53):

Função de Realização

$$\text{Min Z} = (1-\lambda)D + \lambda\sum_{i=1}^{q}\left(\alpha_\theta d_\theta^+ + \beta_\theta d_\theta^-\right),....,(1-\lambda)D_2 + \lambda\sum_{i=1}^{q}\left(\alpha_\psi d_\psi^+ + \beta_\psi d_\psi^-\right),....,$$
$$(1-\lambda)D_3 + \lambda\sum_{i=1}^{q}\left(\alpha_\varphi d_\varphi^+ + \beta_\varphi d_\varphi^-\right),....,(1-\lambda)D_4 + \lambda\sum_{i=1}^{q}\left(\alpha_\rho d_\rho^+ + \beta_\rho d_\rho^-\right) \quad (13)$$

- A função objetivo (13), para a usina analisada, possui 11 metas - estabelecidas pelos gestores da usina: custos - custo de estocagem, custo de processo, custo da matéria prima, custo da frente de corte, custo logístico agrícola, custo de distribuição; produção, considerando-se apenas três produtos {VHP, AEHC, Melaço}, exportação de energia elétrica e Açúcares Totais Recuperáveis - ATR (ver Restrição (14)).

Restrições

- Restrição (14) modela a razão entre os ATR's atuais ($ATR_{i\,ct}$ e $\mathrm{ATRK}_{k\,t}$) e o Arrependimento, para as fontes de matéria prima administradas pela Usina e externas a ela ($U_{i\,c\,t}$ e $\mathrm{UK}_{k\,t}$). Observe-se que o Arrependimento é a diferença entre o ATR ótimo e o ATR atual, com o ATR ótimo sendo o melhor momento para colher determinado talhão de cana (tal opção nem sempre é possível devido a razões produtivas e comerciais).

$$\frac{\sum_i\sum_c\sum_t U_{iq\,cv\,t}}{\sum_i\sum_q\sum_c\sum_t ATR_{i\,\mathrm{q}\,c\,v\,t}} M_{i\,q\,c\,v\,t} + \frac{\sum_k\sum_t \mathrm{UK}_{k\,t}}{\sum_k\sum_t \mathrm{ATRK}_{k\,t}} N_{k\,t} + d_\varphi^- - d_\varphi^+ = 600.000 \quad (14)$$

- Restrição (15) modela a disponibilidade de cana no talhão *i* no estado *q* na condição *c* no período *t:*

$$Disp_{i\,q\,c\,t} = Disp_{i\,q\,c\,t-1} - M_{i\,q\,c\,t-1} \quad (15)$$

- Restrição (16) modela a disponibilidade de cana no fornecedor *k* no período *t:*

$$DispK_{k\,t} = DispK_{\mathrm{k}\,t-1} - N_{k\,t-1} \quad (16)$$

- Restrição (17) modela a quantidade de cana cortada do talhão *i* no estado *q* na condição *c* no período *t:*

$$M'_{i\,q\,c\,t} \leq Disp_{i\,q\,c\,t} \tag{17}$$

- Restrição (18) modela a quantidade de cana cortada pelo fornecedor *k* no período *t:*

$$N_{k\,t} \leq DispK_{k\,t} \tag{18}$$

- Restrição (19) estabelece que a quantidade de cana cortada no talhão *i,* no estado *q* e na condição *c* no período *t,* mais a quantidade cortada de cana por fonte de fornecimento *k* no período *t*, devem ser transportadas pelo transporte *f* no período *t:*

$$\sum_i \sum_q \sum_c M'_{i\,q\,c\,t} + \sum_k N_{k\,t} = \sum_f M''_{f\,t} \tag{19}$$

- Restrição (20) estabelece que a quantidade de cana no talhão *i,* no estado *q* na condição *c* no período *t*, mais a quantidade de cana por fonte de fornecimento *k* no período *t,* devem ser cortadas pela frente *j* no período *t:*

$$\sum_i \sum_q \sum_c M'_{i\,q\,c\,t} + \sum_k N_{k\,t} = \sum_j H_{j\,t} \tag{20}$$

- Restrição (21) estabelece que não deva haver estoque de cana no talhão *i* no estado *q* na condição *c* para a safra seguinte:

$$\sum_i \sum_q \sum_c Disp_{i\,q\,c\,t} = \sum_i \sum_q \sum_c \sum_t M'_{i\,q\,c\,t} \tag{21}$$

- Restrição (22) estabelece que não deve haver estoque de cana do fornecedor *k* para a safra seguinte:

$$\sum_k \sum_t N_{k\,t} = \sum_k DispK_{k\,t} \tag{22}$$

- Restrição (23) estabelece que a opção de talhão *i* selecionado no estado *q* na condição *c* no período *t* deve ser totalmente cortada, e a opção não selecionada nesse período deve ser igual à zero:

$$M'_{i\,q\,c\,t} = \mathrm{Mmax}_t X_{i\,q\,c\,t} \tag{23}$$

- Restrição (24) estabelece que a quantidade de cana cortada do talhão *i* no período *t,* mais a quantidade de cana fornecida pelo fornecedor *k* no período *t*, não devem ultrapassar a capacidade máxima de moagem no período *t:*

$$M'_{i\,q\,c\,t} + N_{k\,t} \leq \mathrm{Mmax}_t \tag{24}$$

- Restrições (25-26) modelam o nível de moagem no período *t:*

$$\sum_k N_{k\,t} + \sum_i \sum_q \sum_c M'_{i\,q\,c\,t} \geq \mathrm{Mmin}_t \frac{\phi_t}{100}_{\mathrm{t}} \frac{\pi_t}{100} \tag{25}$$

$$\sum_k N_{k\,t} + \sum_i \sum_q \sum_c M'_{i\,q\,c\,t} \leq \mathrm{Mmax}_t \frac{\phi_t}{100}_{\mathrm{t}} \frac{\pi_t}{100} \tag{26}$$

- Restrição (27) modela a capacidade do transporte próprio no período *t:*

$$M^{''}_{f\,t} \le \frac{\beta_{f\,t}}{100}.\frac{\lambda_t}{100}.CP_t \tag{27}$$

- Restrição (28) estabelece que a quantidade de cana no talhão *i,* no estado *q* (crua) na condição *c* no período *t*, deve ser cortada pela frente mecanizada:

$$\sum_i \sum_c M^{'}_{i\,\text{"crua"}\,c\,t} = H_{\text{"mecanizado"}\,t} \tag{28}$$

- Restrição (29) modela a capacidade da frente de corte *j* no período *t*.

$$H_{j\,t} \le CT_{j\,t} \tag{29}$$

- Restrição (30) modela o custo da matéria prima:

$$\sum_i \sum_q \sum_c \sum_t M^{'}_{i\,q\,c\,t} + \sum_k \sum_t N_{k\,t}.CK_{k\,t} + d^-_\theta - d^+_\theta = 4.400.000 \tag{30}$$

- Restrição (31) modela o custo de transporte agrícola:

$$\sum_f \sum_k \sum_t l_{f\,k\,t}.N_{k\,t} + \sum_i \sum_q \sum_c \sum_t M^{'}_{i\,q\,c\,t}.C_{i\,q\,t} + d^-_\theta - d^+_\theta = 12.861.000 \tag{31}$$

- Restrição (32) modela o custo da frente de corte *j* no período *t* no talhão *i:*

$$\sum_j \sum_t \sum_i R_{j\,t\,i}.H_{j\,t} + d^-_\theta - d^+_\theta = 22.804.356 \tag{32}$$

- Restrição (33) modela o balanço de estoque semanal:

$$\sum_e I_{p\,e\,t} = I_0 + \sum_e I_{p\,e\,t-1} + \sum_u A_{p\,u\,t}.M^{'''}_{k\,t} - DAC_{p\,t} - DS_{p\,d\,t} \tag{33}$$

- Restrição (34) modela a capacidade de estocagem para o produto *p* na opção de estoque *e* na semana *t:*

$$I_{p\,e\,t} \le Cest_{p\,e} \tag{34}$$

- Restrição (35) estabelece que apenas um processo de produção *u* deve ser selecionado no período *t:*

$$\sum_u Y_{u\,t} = 1 \tag{35}$$

- Restrição (36) modela a capacidade máxima de cana a ser processada no período:

$$M^{'''}_{u\,t} \le M^{\max}_t.Y_{u\,t} \tag{36}$$

Restrições pertinentes à modelagem da cogeração de energia.

- Restrição (37) representa o balanceamento de estoque de bagaço no período *t:*

$$Ib_t = Ib_{t-1} + \sum_i \sum_q \sum_c \left(M^{'}_{i\,q\,ct} \frac{Fibra_{i\,q\,c\,t}}{1\text{ - Ub}_t} \right) + \sum_k \sum_q \sum_c \left(N_{k\,t} \frac{\text{fibraK}_{k\,q\,c\,t}}{1\text{ - Ub}_t} \right) - \text{Mb}_t \tag{37}$$

- Restrição (38) modela o estoque de segurança do bagaço no período *t*:

$$Ib_t \ge Ib_{t-1} + \sum_i \sum_q \sum_c \left(M^{'}_{i\,q\,ct} \frac{Fibra_{i\,q\,c\,t}}{1\text{ - Ub}_t} \right).\text{Eb} + \sum_k \sum_q \sum_c \left(N_{k\,t} \frac{\text{fibraK}_{k\,q\,c\,t}}{1\text{ - Ub}_t} \right).\text{Eb} \tag{38}$$

- Restrição (39) regula o estoque de passagem de bagaço:

$$Ib_{"T"} \geq \mathrm{EPb} \qquad (39)$$

- Restrição (40) modela a produção de vapor de acordo com a quantidade de bagaço consumido no período *t:*

$$\mathrm{Mb}_t.\mathrm{RC} = \mathrm{VAP}_t \qquad (40)$$

- Restrições (41-42) modelam o balanço de vapor de alta e baixa pressão de toda a planta industrial no período *t*:

$$\mathrm{VAP}_t \geq \sum_u \mathrm{M}'''_{ut}.\mathrm{CFVAP} + \frac{\mathrm{EG}_t}{\mathrm{RCF}} \qquad (41)$$

$$\sum_u \mathrm{M}'''_{ut}.\mathrm{CFVAP} + \frac{\mathrm{EG}_t}{\mathrm{RCF}} \geq \sum_u \sum_p \mathrm{CVAP}_p.\mathrm{A}_{put}.\mathrm{M}'''_{ut} \qquad (42)$$

- Restrição (43) estabelece a quantidade de energia excedente que pode ser consumida em cada período *t*:

$$\mathrm{EG}_t - \left(\sum_u \mathrm{CFE.M}'''_{ut} + \sum_u \sum_p \mathrm{CVAP}_p.\mathrm{A}_{put}.\mathrm{M}'''_{ut} \right) = \mathrm{EE}_t \qquad (43)$$

- Restrições (44-45) modelam as capacidades de produção de vapor e energia elétrica no período *t*:

$$\mathrm{VAP}_t \leq \mathrm{VAPMax.nu}_t \qquad (44)$$

$$\mathrm{EG}_t \leq \mathrm{EGMax}.\varphi_t \qquad (45)$$

- Restrição (46) modela a meta de cogeração de energia elétrica (MW).

$$EG_t - d_\theta^+ + d_\theta^- = 150 \qquad (46)$$

- Restrição (47) modela a meta do custo de distribuição do produto *p* para o destino *d* usando o transporte *l* na semana *t*.

$$\sum_{pdlt} CAC_{pdlt}.XAC_{pilt} - d_\rho^+ + d_\rho^- = 11.300 \qquad (47)$$

- Restrição (48) modela a meta do custo de estocagem.

$$\sum_{pet} h_{pet} I_{pet} - d_\theta^+ + d_\theta^- = 700.000 \qquad (48)$$

- Restrição (49) modela a meta do custo do processo.

$$\sum_{ut} CN_{ut} M'''_{ut} - d_\theta^+ + d_\theta^- = 3.270.000 \qquad (49)$$

- Restrição (50) modela a meta de produção do produto Melaço.

$$\sum_{ut} A_{"AEAC"ut} M'''_{ut} - d_\theta^+ + d_\theta^- = 3.000 \qquad (50)$$

- Restrição (51) modela a meta de produção do produto AEHC.

$$\sum_{ut} A_{"AEHC"ut} M'''_{ut} - d_\psi^+ + d_\psi^- = 12.000 \qquad (51)$$

- Restrição (52) modela o desvio máximo para as variáveis de desvio de cada meta.

$$\sum_{\theta}^{n} d_{\theta}^{-} + d_{\theta}^{+} - D_1 \leq 0$$
$$\sum_{\psi}^{n} d_{\psi}^{-} + d_{\psi}^{+} - D_2 \leq 0$$
$$\sum_{\psi}^{n} d_{\varphi}^{-} + d_{\varphi}^{+} - D_3 \leq 0 \qquad (52)$$
$$\sum_{\psi}^{n} d_{\rho}^{-} + d_{\rho}^{+} - D_4 \leq 0$$

- Restrições (53) são as condições de integralidade, livre (irrestrita em sinal) e de não negatividade das variáveis:

$$X_{iqct} \in \{0,1\}; Y_{ut} \in \{0,1\};; D \text{ Livre}, M'_{iqcvt} \geq 0; M''_{ft} \geq 0;\ Disp_{iqcvt} \geq 0; DispK_{kt} \geq 0; \qquad (53)$$
$$N_{kt} \geq 0; H_{jt} \geq 0; d_{\theta}^{-}, d_{\psi}^{-}, d_{\varphi}^{-}, d_{\rho}^{-}, d_{\theta}^{+}, d_{\psi}^{+}, d_{\varphi}^{+}, d_{\rho}^{+} \geq 0$$

5. Resultados e direcionamento para novas pesquisas

Por motivos de espaço não será mostrada uma análise mais completa, entretanto, o estudo mostrou-se muito interessante e aplicável em problemas complexos de usinas de açúcar e álcool. A simulação numérica aqui descrita foi feita para cinco semanas, e neste cenário o modelo proposto possui 25 variáveis binárias, 47.509 variáveis não negativas e 12.953 restrições. Os tempo computacional para a simulação numérica de cinco semanas foi desprezível.

Percebe-se ao variar o parâmetro λ (0 a 1) encontra-se diferentes soluções para cada meta, sendo tal análise muito rica, pois poderá auxiliar os gestores no direcionamento de decisões mais aderentes a realidade da usina. Desta forma, tem-se diferentes cenários para os custos de produção, produção, curva de ATR e cogeração de energia elétrica. Não foram estipulados pesos para as variáveis auxiliares ($\alpha \ e \ \beta$), adotando-se o valor um para elas, admitindo-se que todos os objetivos possuíam igual importância, pois no modelo ELGP o que determina, qual objetivo é mais importante é a ordenação. Contudo, a estimação dos pesos pode ser feita, por meio da aplicação de um método de auxílio à decisão, como, o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), (SAAYTY, 1977; SAATY e SHANG, 2007).

Agradecimentos
Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio.

Referências

Chang, C-T., Multi-Choice goal programming. *The International Journal of Management Science* 35, 389-396, 2007.

Charnes, A.; Cooper, W.W.; Karwan, K.R.; Wallace, W.A., A chance-constrained Goal Programming model to evaluate response resources for marine pollution disasters. *Journal of Environmental Economics and Management* 6, 244–274, 1979.

Flavell, R.B. A new goal programming formulation. Omega-The international Journal of Management, 4, 731-732.

Jamalnia, A.; 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.F.; 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.
Martel, J.M; Aouni, B. Diverse Imprecise Goal Programming Model Formulations. *Journal of Global Optimization* 12, 127-138, 1998.
Mathew, J.; Rajendran, C., Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. *Computers in Industry* 21, 331-334,1993.
Min, H.; Storbeck, J., On the Origin and Persistence of Misconceptions in Goal Programming. *Journal of Operational Research Society* 42, 301–312, 1991.
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.
Romero, C., Tamiz, M., Jones, D.F. Goal programming, compromise programming and reference point method formulations: Linkages and utility interpretations. Journal of the Operational Research Society 49, 986–991, 1998.
Romero, C. A general structure of achievement function for a goal programming model. *European Journal of Operational Research* 153, 675–686, 2004.
Romero, C. Extended lexicographic goal programming: a unifying approach. Omega 29, 63–71, 2001.
Saaty, T.L.;A scaling method for priorities in hierarchical structures, Journal of Mathematical Psychology 15, 234-281, 1977.
Saaty, T. L., Shang, J. S.; Group decision-making: Head-count versus intensity of preference. Socio-Economic Planning Sciences, 41, 22-37, 2007.
Silva, A.F.; Marins, F.A.S; Salomon, V.A.P; Silva, G.; Montevechi, J.A.B. Otimização multiobjetivo fuzzy no planejamento agregado da produção e distribuição em usinas de açúcar e álcool. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Bento Gonçalves, 2010.
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.; Romero, C.. Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research* 111, 569-581, 1998.
Yaghoobi, M. A.; Tamiz, M. A method for solving fuzzy goal programming problems based on MINMAX approach. European Journal of Operational Research. 177, 1580- 1590, 2007.