

TRATAMENTO DA INCERTEZA NO PLANEJAMENTO DA COLHEITA DE CANA DE AÇÚCAR UTILIZANDO UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO POR METAS MULTI-ESCOLHA REVISADO

Aneirson Francisco da Silva - aneirson@gmail.com
Fernando Augusto Silva Marins - fmarins@feg.unesp.br
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 Programação por Metas Multiescolha Revisada (Revised Multi-Choice Goal Programming) para tratar a incerteza no planejamento da colheita de cana de açúcar de uma usina sucroenergética (RMCGP-LHS). O modelo aborda a etapa agrícola, possibilitando que as decisões sejam tomadas em um horizonte de planejamento semanal, e contempla o processo de gerenciamento das escolhas da condição e do tempo de colheita do talhão de cana, dimensionamento da frente de corte e da logística agrícola. O objetivo é obter informações para cortar a cana no período mais próximo do máximo teor de sacarose e minimizar os custos agroindustriais. A aplicação do modelo proposto em uma usina de açúcar e álcool gerou resultados que foram validados por especialistas da área, e que podem auxiliar na determinação de políticas ótimas de planejamento da colheita de forma mais aderente à realidade das usinas brasileiras.

PALAVRAS CHAVE: Programação por Metas Multi-escolha Revisada, Planejamento, Colheita de Cana de Açúcar, Custos Agrícolas, Incertezas, Usina de Açúcar e Álcool.

ABSTRACT

We proposed a Revised Multi-Choice Goal Programming model to treat the uncertainty in planning the harvest of a sugar cane milling company. The focus of the model is the agricultural stage, with decisions being made on a weekly planning horizon, and contemplates the process of managing the condition and choices of cane pruning time, the sizing of the front cutting agricultural and the logistics. The goal is to obtain information to cut cane in the period closest to maximum sucrose content and minimize agribusiness costs. The application of the proposed model in a Brazilian sugar cane milling company produced results that were validated by experts of the company. This model can assist in determining optimal policies for harvest planning that are more adherent to the reality of Brazilian plants.

KEYWORDS: Revised Multi-choice Goal Programming, Planning, Harvest of Sugarcane, Agribusiness Costs, Uncertainties, Sugar and Ethanol Plant.

1. Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores de açúcar do mundo, sendo o segundo maior produtor de álcool e o maior exportador dos dois produtos. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, o setor canavieiro processou nas safras 2008/2009; 2009/2010 e

2010/2011, respectivamente, as quantidades de 571,4 milhões; 612,2 milhões e 651,5 milhões de toneladas, o que mostra um crescimento interessante do setor.

Paiva (2009) descreve algumas particularidades importantes do complexo sucroalcooleiro:

- A sazonalidade da demanda;
- O alto custo relativo da matéria-prima, que é cerca de 60% do custo dos produtos finais;
- A falta de um modelo de planejamento da colheita adequado, que contemple os custos de cada talhão em cada fazenda, o dimensionamento da frente de corte e da frota agrícola, a curva de maturação e a perecibilidade da matéria-prima após a colheita.

Ainda segundo Paiva (2009), é importante que a definição do momento de colheita de cada talhão seja especificada de forma otimizada, dada a necessidade de se obter uma matéria prima com maior teor de Açúcares Redutores Totais (ART) e com uma pureza alta. Os ATR são parâmetros do sistema de pagamento de cana (ver adiante) e são os resultados das diferenças entre o ART da cana e as perdas na lavagem da cana, no bagaço final, na torta dos filtros ou nas prensas, considerando uma eficiência média padrão nestes processos.

Desta forma, um aspecto importante na etapa agrícola é o conhecimento da Curva de Maturação que corresponde a uma representação gráfica do ciclo de vida da cana. Essa curva é comumente encontrada em função da Polaridade (POL) e do tempo até o corte, podendo ser dividida em duas fases. Uma primeira fase de crescimento vegetativo, em que a planta acumula energia na forma de sacarose, aumentando, portanto o valor da POL. Na fase seguinte a planta utiliza a energia acumulada no período anterior para a reprodução da espécie. Neste período, ocorre o decréscimo o valor da POL. A Figura 1 ilustra uma Curva de Maturação.

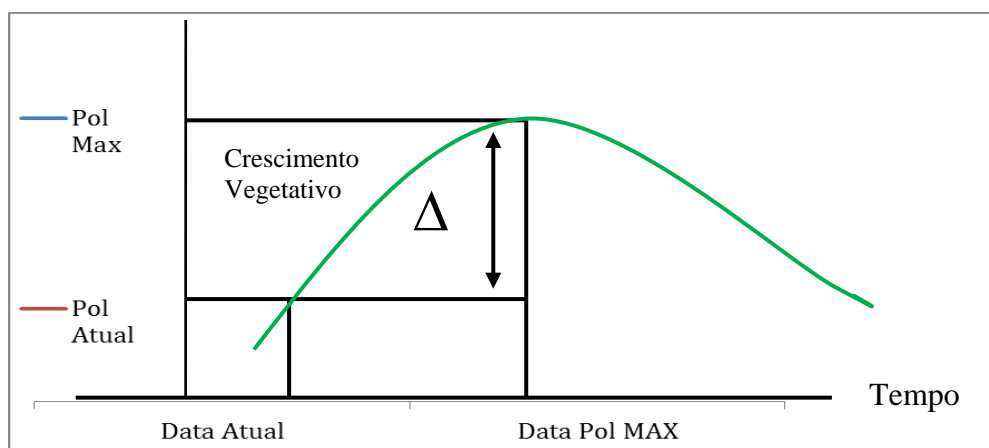


Figura 1. Ilustração de uma Curva de Maturação. (Fonte: Silva *et al*, 2011)

Apesar da melhor época para colheita ser a data de POL máximo, torna-se inviável realizar a colheita em função de curva de ATR, pois isto gerará um zigue zague ineficiente entre os talhões de corte de cana, implicando em aumento dos custos de colheita. Assim usualmente, a colheita ocorre num período próximo ao momento de POL máximo, mas não exatamente nele. (detalhes em Silva *et al.*, 2011). A curva da POL pode ser estimada por uma equação polinomial de 2^a. ordem, considerando como variáveis o tempo [semanas] e a POL [% do caldo da cana]. Com esta curva, por meio de amostras agrícolas, pode-se determinar em que época o ATR ótimo ocorrerá.

Para caracterizar em que período a cana pode ser processada, as usinas criaram o Período Útil de Industrialização (PUI), que estabelece o POL de cana = 13% como satisfatório para o processamento de diferentes variedades. Como se faz o Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose (PCTS) deve-se converter o POL em % do caldo para POL em toneladas, conforme o Manual CONSECANA (www.unica.com.br).

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um modelo multiobjetivo da Programação por Metas (*Goal Programming*) que contemple a ocorrência de incerteza na Matriz Tecnológica, ou

nos coeficientes do lado esquerdo nas restrições (LHS – *Left Hand Side coefficients*), para auxiliar nas decisões de planejamento da colheita de cana de uma usina sucroenergética.

Destaque-se que a contribuição desta pesquisa é estender a proposta de outros autores (CHANG, 2007, 2008 e 2011) utilizada para tratar a incerteza nos valores dos RHS para tratar a ocorrência de incertezas nos LHS.

Este artigo está organizado em seções. Na seção 2 é feita a descrição do problema e apresenta-se o método de pesquisa adotado. A seção 3 refere-se aos modelos de Programação de Metas sob incerteza. Na seção 4 está o modelo desenvolvido para o problema da colheita, finalmente, a seção 5 apresenta os comentários gerais e o direcionamento para novas pesquisas, sendo seguida pelas referências bibliográficas.

2. Descrição do Problema e Método de Pesquisa

Neste trabalho propõe-se um Modelo de Programação por Metas Multiescolha Revisada (*Revised Multi-Choice Goal Programming*) - MCGP para tratar a incerteza no planejamento da colheita de cana de açúcar de uma usina de açúcar e álcool, sendo o diferencial deste trabalho a adequação do MCGP para contemplar a incerteza na matriz tecnológica numa aplicação real e de grande porte.

O modelo trata da etapa agrícola, possibilitando que as decisões sejam tomadas em um horizonte de planejamento semanal, e contempla o processo de gerenciamento das escolhas da condição e do tempo de poda da cana, dimensionamento da frente de corte e da logística agrícola.

As principais decisões que fazem parte do planejamento do problema da colheita de cana de açúcar estão na Figura 2.

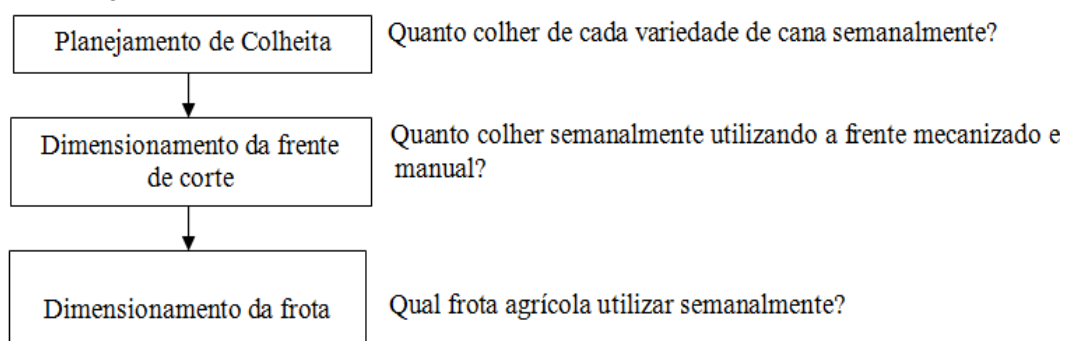


Figura 2- Questões da pesquisa.

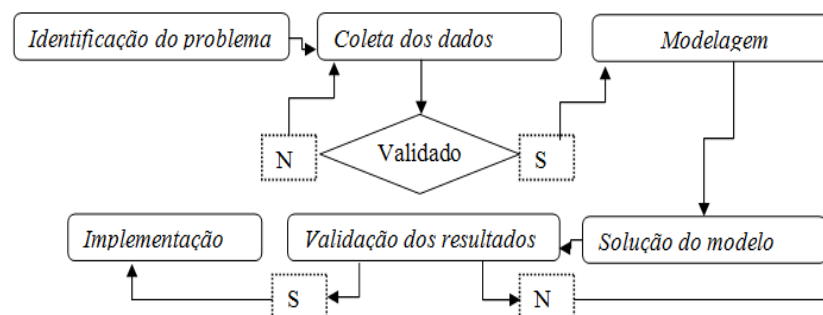


Figura 3- Etapas da pesquisa

A Figura 3 mostra as etapas da pesquisa, que estão descritas a seguir:

1. Identificação do problema – Foram realizadas visitas a algumas usinas para identificar os parâmetros que deveriam compor o modelo. Foi escolhida uma Usina sucroenergética localizada no Estado de Minas Gerais, como sendo o objeto do estudo. As decisões importantes para o planejamento da colheita da usina, e que são tratadas pelo MCGP, estão na Figura 2.

2. Coleta de dados – Utilizou-se os relatórios internos de informações agrícolas da usina escolhida e foram feitas entrevistas com os profissionais de planejamento e operação para detalhamento e complementação das informações necessárias para a modelagem do problema;
3. Modelagem – A modelagem contemplou as decisões de safra (32 semanas) e incluiu o desenvolvimento de um Modelo Multiobjetivo de grande porte, no qual se considera a incerteza no planejamento da colheita de cana de açúcar;
4. Experimento – O modelo desenvolvido foi implementado na linguagem de modelagem *General Algebraic Modeling System* na versão GAMS 23.6.5 e resolvido pelo *Solver CPLEX* na versão 12.2.1.1. Os resultados estão na seção 5;
5. Validação dos resultados – Foi feita com o apoio dos gestores da usina a partir da comparação dos resultados do modelo com os resultados reais da usina. Detalhes na seção 5.

Segundo os critérios propostos por Bertrand e Fransoo (2002) para a classificação de pesquisas científicas, este trabalho é uma pesquisa aplicada, com objetivos empírico-descritivos, pois o modelo desenvolvido descreve as relações causais que podem existir na realidade, favorecendo a compreensão de processos reais. A forma de abordar o problema é a quantitativa, sendo o método de pesquisa a modelagem e otimização.

3. Modelos de Programação por Metas Sob Incerteza

O ideal em um problema de tomada de decisão é que a informação necessária seja conhecida no momento do seu planejamento (SEN e HIGLE, 1999), porém, além das incertezas inerentes às informações do presente, o futuro não pode ser perfeitamente previsto e pode ser considerado aleatório ou incerto (WANG e LIANG, 2004). Também é conhecido que, em muitos problemas de decisão, há vários objetivos que se deseja otimizar, sendo que alguns deles podem ser conflitantes, o que dificulta a solução de tais problemas.

Paiva e Morabito (2011) aplicaram um modelo de Otimização Estocástica Robusta para incorporar a incerteza em alguns parâmetros do setor sucroenergéticos, como nos preços dos produtos, na matriz rendimento e na eficiência global (em ATR), dentre outros. Estes autores utilizaram a Programação por Metas combinada com a Otimização Estocástica (SOYSTER, 1973).

Neste contexto, para tratar a situação de múltiplos objetivos, Modelos de Programação por Metas têm sido aplicados com sucesso (CABALLERO *et al*, 2009), e existem os modelos de otimização sob incerteza que permitem que o impacto das variáveis aleatórias possa ser considerado de forma direta na modelagem (SAHINIDIS, 2004).

Conforme exposto por Chang (2007), em problemas multiobjetivos reais, podem existir níveis imprecisos para as metas associadas aos objetivos, o que dificulta a tarefa dos analistas que estão modelando o problema (SILVA *et al.*, 2011).

Devido a tais incertezas foram desenvolvidos modelos *Fuzzy* de Programação por Metas (Fuzzy Goal Programming - FGP) que utilizam funções de pertinência triangulares e trapezoidais para tratar as incertezas associadas aos valores das constantes do lado direito (*Right-hand Side coefficients* - RHS) nas restrições dos modelos (SILVA *et al.*, 2011).

Ainda segundo Chang (2007), pode haver situações em que há vários valores interessantes para as metas associadas aos objetivos e não apenas um, ou seja, os objetivos podem ser alcançados ao se atingir diferentes níveis (formando patamares ou segmentos) específicos desejados.

O Modelo Multiescolha de Programação por Metas (*Multi-Choice Goal Programming* – MCGP), desenvolvido por Chang (2007), permite avaliar as incertezas nos valores dos RHS:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n |f_i(X) - g_{i1} \text{ ou } g_{i2} \text{ ou } \dots \text{ ou } g_{im}| \quad (1)$$

S.a:

$$X \in F \quad (F \text{ é um conjunto viável}), \quad (2)$$

sendo g_{ij} o valor j de um dos possíveis m níveis (ou segmentos) desejados para a meta associada ao objetivo i .

O modelo MCGP pode ser reescrito como sendo:

$$\text{Min } \sum_{i=1} (d_i^+ + d_i^-) \quad (3)$$

S. a:

$$f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = g_1 Z_1 + g_2 (1 - Z_1) \quad (4)$$

$$f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = g_3 Z_2 Z_3 + g_4 Z_2 (1 - Z_3) + g_5 Z_3 (1 - Z_2) \quad (5)$$

$$f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = g_6 Z_4 Z_5 + g_7 Z_4 (1 - Z_5) + g_8 Z_5 (1 - Z_4) + g_9 (1 - Z_4)(1 - Z_5) \quad (6)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad (7)$$

$$X \in F (\text{é um conjunto viável}), Z_1, Z_2, \dots, Z_5 \in \{0,1\} \quad (8)$$

Observe-se que a função objetivo (3) visa minimizar os valores das variáveis de desvios d_i^+, d_i^- . A restrição (4) contempla um cenário no qual há dois segmentos para a meta i , e quando o valor de Z_1 for zero será o segmento g_2 o escolhido, e quando o valor de Z_1 for igual a 1 será o segmento g_1 o escolhido. As restrições (5) e (6) contemplam um cenário no qual há três e quatro segmentos para a meta i , respectivamente, valendo um raciocínio similar para combinações de valores das variáveis binárias Z_2, Z_3, Z_4 e Z_5 que levam a escolha dos valores de $g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8$ e g_9 . As restrições (7) e (8) contemplam os domínios das variáveis.

Para o caso de dois segmentos o modelo ainda será linear, entretanto, acima de dois segmentos o modelo será não linear. Chang (2008) propôs um Modelo Multi-escolha Revisado de Programação por Metas (*Revised Multi-Choice GP - RCMCGP*) que substitui a necessidade de variáveis binárias, com a incorporação de variáveis contínuas (y_i).

Neste modelo RCMCGP, g_i^{\max} e g_i^{\min} são, respectivamente, o limite máximo e o limite mínimo estimados para a meta g_i , e e_i^+ e e_i^- são variáveis de desvios associadas ao limite (máximo ou mínimo) da meta g_i que se deseja otimizar. Observe-se que, dependendo do escopo do objetivo associado à meta g_i , pode ser interessante considerar o limite máximo ou o limite mínimo, ver restrição (11):

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1} (d_i^+ + d_i^- + e_i^+ + e_i^-) \quad (9)$$

S. a:

$$f_i(X) - d_i^+ + d_i^- = y_i \quad (10)$$

$$y_i + e_i^- - e_i^+ = g_i^{\max} \text{ ou } g_i^{\min} \quad (11)$$

$$g_i^{\min} \leq y_i \leq g_i^{\max} \quad (12)$$

$$d_i^+, d_i^-, e_i^+, e_i^- \geq 0 \quad (13)$$

$$x \in F \text{ (F é um conjunto viável)} \quad (14)$$

A principal diferença do modelo RCMGP em relação ao modelo MCGP está no fato de que os níveis desejados das limitações das metas i estão definidos em espaços contínuos, conforme mostra a equação (12), não havendo variáveis binárias. Chang (2011) comenta que os modelos MCGP e RMGP proporcionam melhores soluções em relação aos modelos *Weighted Goal Programming - WGP*, *Minmax Goal Programming - MA* e *Lexicographic Goal Programming -*

LGP. Paksoy e Chang (2010) aplicaram o modelo RMCGP para resolver problemas multiestágios, multiprodutos e multiperíodos.

No modelo que será apresentado a seguir, o que se fez foi estender o modelo RMCGP para tratar a ocorrência de incertezas nos coeficientes do lado esquerdo (LHS – *Left-Hand Side coefficients*) na Matriz Tecnológica do problema.

4. Modelagem do Problema

Aqui estão os conjuntos, índices, parâmetros, variáveis, inequações e equações utilizadas no modelo RMCGP-LHS:

Índices

t	Períodos, $t \in T$;
i	Talhões, $i \in I$;
f	Transporte agrícola, $f \in F$;
k	Cana de fornecedores, $k \in K$;
j	Frente de corte, $j \in J$;
q	Estado da cana, $q \in Q$;
c	Condição da cana, $c \in C$
v	Variedades de cana, $v \in V$
π	Fazendas, $\pi \in \Pi$;

Conjuntos

T	Conjunto associado ao período de 32 semanas;
I	Conjunto associado aos 34 talhões disponíveis;
F	Conjunto associado à frota disponível para a etapa agrícola = {Frota própria, Frota Terceirizada};
K	Conjunto de Fornecedores das matérias-primas (canas de açúcar) = {A, B, C e D};
J	Conjunto associado à frente de corte = {Mecanizado, Manual};
Q	Conjunto associado ao estado da cana = {Queimada, Crua};
V	Conjunto associado às variedades de cana = {12};
C	Conjunto associado à condição da cana = {Média, Tardia, Precoce};
Π	Conjunto associado às 16 fazendas consideradas no planejamento.

Parâmetros

M_t^{\min}	Moagem mínima semanal [ton/semana];
M_t^{\max}	Moagem máxima semanal [ton/semana];
CT_j	Capacidade semanal da frente j [ton/semana];
$R_{j,\pi}$	Custo da frente de corte j na fazenda π ;
$Rk_{j,k}$	Custo da frente de corte j no fornecedor k ;
CP_t	Capacidade do transporte próprio no período t [ton/semana];
ϕ_t	Tempo efetivo de funcionamento da indústria durante um período t [%];
$Disp_{i q c v \pi 0}$	Previsão inicial de safra para o talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v , na fazenda π , antes do início do período de planejamento [ton];
$Disp_{k 0}$	Previsão inicial de safra por tipo de fornecedor k , antes do início do período de planejamento [ton];
$ATR_{i q c v \pi t}$	ATR (ótimo) do talhão i , na condição c , da variedade v , na fazenda π , no período t [ton/semana];
$U_{i q c v \pi t}$	ATR do talhão i (no momento do corte) na condição c da variedade v na fazenda π no período t [ton/semana];
$ATRK_{k t}$	ATR (ótimo) da cana fornecida k no período t [ton/semana];
$UK_{k t}$	ATR da cana fornecida k no momento do corte em relação ao ATR atual por fonte de matéria prima no período t [ton/mês];
$L_{f \pi}$	Custo variável da opção de transporte f para a fazenda π [\$/ton];

Lk_{fk}	Custo variável da opção de transporte f para o fornecedor k [\$/ton];
CK_{kt}	Custo do transporte da matéria prima vinda do fornecedor k no período t [\$/ton];
μ_t	Tempo efetivo de moagem no período t [%];
C_π	Custo da matéria prima na fazenda π [\$/ton].

Variáveis de decisão

$m'_{iqcv\pi t}$	Quantidade de cana cortada no talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v , na fazenda π , no período t [ton];
m''_{ft}	Quantidade de cana transportada por opção de transporte f no período t [ton];
$disp_{iqcv\pi t}$	Disponibilidade de matéria prima do talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v , na fazenda π , no período t [ton];
$dispK_{kt}$	Disponibilidade de matéria prima no fornecedor k no período t [ton];
h_{jt}	Variável associada ao dimensionamento da frente de corte j no período t ;
n_{kt}	Variável associada à escolha da quantidade de cana fornecida por opção de fornecedor k no período t

Variáveis auxiliares

d_1^+	Variável de desvio para mais na realização da meta de custo total;
d_1^-	Variável de desvio para menos na realização da meta de custo total;
e_1^+	Variável de desvio para mais na realização da meta de custo total;
e_1^-	Variável de desvio para menos na realização da meta de custo total;
y_1	Variável contínua associada ao intervalo de variação de custo total;
d_2^+	Variável de desvio para mais na realização da meta do arrependimento de ATR;
d_2^-	Variável de desvio para menos na realização da meta do arrependimento de ATR;
e_2^+	Variável de desvio para mais na realização da meta do arrependimento de ATR;
e_2^-	Variável de desvio para menos na realização da meta do arrependimento de ATR;
y_2	Variável contínua associada ao intervalo de variação do arrependimento de ATR.

Modelo RMCGP-LHS

Para a elaboração do modelo foram consultados os gestores da usina escolhida para o estudo e eles estabeleceram como interessante de ser explorada a possibilidade de aumentos e reduções nas Matrizes dos Custos Agroindustriais (Matéria Prima, Frente de Corte, Dimensionamento da Frota Agrícola), as oscilações (para mais ou para menos) consideradas foram de: 20%, 15%; 10%; 5% e 1%. Também foi estudado o efeito do mesmo perfil de perturbações na Matriz de ATR que determina o período de corte de cada talhão. Estas matrizes compõem as bases dos dados de entrada do modelo, para maiores detalhes ver (SILVA *et al.*, 2011).

Função objetivo:

- Considerando-se que todas as metas possuíam igual importância o objetivo está expresso em (15):

$$\text{Min } Z = d_1^+ + d_1^- + e_1^+ + e_1^- + e_2^+ + e_2^- + d_2^+ + d_2^- \quad (15)$$

Restrições:

- Restrição (16) está associada à disponibilidade de cana no talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v , na fazenda π e no período t :

$$disp_{iqcv\pi t} = disp_{iqcv\pi t-1} - m'_{iqcv\pi t-1} \quad \forall i \in I, \forall q \in Q, \forall c \in C, \forall \pi \in \Pi, \forall t \in T \quad (16)$$

- Restrição (17) está associada à disponibilidade de cana no fornecedor k no período t :

$$dispK_{kt} = dispK_{k,t-1} - n_{k,t-1} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (17)$$

-Restrição (18) está associada à quantidade de cana cortada do talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v , na fazenda π e no período t :

$$m'_{iqcv\pi t} \leq disp_{iqcv\pi t} \quad \forall i \in I, \forall q \in Q, \forall c \in C, \forall \pi \in \Pi, \forall t \in T \quad (18)$$

-Restrição (19) está associada à quantidade de cana cortada pelo fornecedor k no período t :

$$n_{k,t} \leq dispK_{k,t} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (19)$$

-Restrição (20) está associada à quantidade de cana cortada no talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v , na fazenda π e no período t , e a quantidade cortada de cana por fonte de fornecimento k , no período t , que serão transportadas pelo transporte f no período t :

$$\sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} m'_{iqcv\pi t} + \sum_{k \in K} n_{k,t} = \sum_{f \in F} m''_{f,t} \quad \forall t \in T \quad (20)$$

-Restrição (21) estabelece que a quantidade transportada na semana t deve ser igual à quantidade cortada pela frente j no período t :

$$\sum_{f \in F} m''_{f,t} = \sum_{j \in J} h_{j,t} \quad \forall t \in T \quad (21)$$

-Restrição (22) estabelece que não deve haver estoque de cana para a safra seguinte no talhão i , no estado q , na condição c , da variedade v e na fazenda π :

$$\sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} disp_{iqcv\pi t} = \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} m'_{iqcv\pi t} \quad \forall t \in T \quad (22)$$

- Restrição (23) estabelece que não deve haver estoque de cana do fornecedor k para a safra seguinte:

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{k,t} = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} dispK_{k,t} \quad (23)$$

- Restrições (24) a (25) estabelecem os níveis (mínimo e máximo) de moagem no período t :

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{k,t} + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} m'_{iqcv\pi t} \geq M_t^{\min} \frac{\mu_t}{100_t} \frac{\phi_t}{100} \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{k,t} + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} m'_{iqcv\pi t} \leq M_t^{\max} \frac{\mu_t}{100_t} \frac{\phi_t}{100} \quad \forall t \in T \quad (25)$$

- Restrição (26) está associada à capacidade do transporte próprio no período t :

$$m''_{f,t} \leq \frac{\delta_{f,t}}{100} \cdot \frac{\phi_t}{100} \cdot CP_t \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (26)$$

-Restrição (27) está associada à capacidade da frente j no período t :

$$h_{j,t} \leq CT_{j,t} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (27)$$

- As Restrições (28) a (30) modelam a incerteza no cálculo do ATR por toneladas, com a incorporação de um desvio de 5% para mais e para menos, conforme sugerido pelos profissionais da usina estudada:

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} (m'_{qcv\pi t} \cdot ATR_{iqcv\pi t} - m'_{qcv\pi t} \cdot U_{iqcv\pi t}) \\ + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot ATR_{k t} - \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot UK_{k t} \end{array} \right) - d_2^+ + d_2^- = y_2 \quad (28)$$

$$0,95 \left(\begin{array}{l} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} (m'_{qcv\pi t} \cdot ATR_{iqcv\pi t} - m'_{qcv\pi t} \cdot U_{iqcv\pi t}) \\ + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot ATR_{k t} - \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot UK_{k t} \end{array} \right) \leq y_2 \quad (29)$$

$$y_2 + e_2^- - e_2^+ = 1,05 \left(\begin{array}{l} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} (m'_{qcv\pi t} \cdot ATR_{iqcv\pi t} - m'_{qcv\pi t} \cdot U_{iqcv\pi t}) \\ + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot ATR_{k t} - \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot UK_{k t} \end{array} \right) \quad (30)$$

- As Restrições (31) a (33) modelam a incerteza nos custos agrícolas, com a incorporação de um desvio de 5% para mais e para menos, conforme sugerido pelos profissionais da usina estudada:

$$\left(\begin{array}{l} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} m'_{i qcv\pi t} \cdot L_{f\pi} + \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot L_{1_{kt}} + \\ + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} m'_{i qcv\pi t} \cdot R_{j\pi} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot R_{k_{jk}} + \\ + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} m'_{i qcv\pi t} \cdot C_{\pi} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot CK_{kt} \end{array} \right) - d_1^+ + d_1^- = y_1 \quad (31)$$

$$0,95 \left(\begin{array}{l} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} m'_{i qcv\pi t} \cdot L_{f\pi} + \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot L_{1_{kt}} + \\ + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} m'_{i qcv\pi t} \cdot R_{j\pi} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot R_{k_{jk}} + \\ + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} m'_{i qcv\pi t} \cdot C_{\pi} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot CK_{kt} \end{array} \right) \leq y_1 \quad (32)$$

$$y_1 + e_1^- - e_1^+ = 1,05 \left(\begin{array}{l} \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} m'_{i qcv\pi t} \cdot L_{f\pi} + \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot L_{1_{kt}} + \\ + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} m'_{i qcv\pi t} \cdot R_{j\pi} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot R_{k_{jk}} + \\ + \sum_{i \in I} \sum_{q \in Q} \sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{\pi \in \Pi} \sum_{t \in T} m'_{i qcv\pi t} \cdot C_{\pi} + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} n_{kt} \cdot CK_{kt} \end{array} \right) \quad (33)$$

- Restrições (34) expressam as condições de não negatividade:

$$\begin{aligned}
 m'_{i q c v \pi t} \geq 0; M''_{f t} \geq 0; disp_{i q c v \pi t} \geq 0; disp_{K k t} \geq 0; n_{k t} \geq 0; \\
 h_{j t} \geq 0; d_1^+, d_1^-, e_1^+, e_1^-, d_2^+, d_2^-, e_2^+, e_2^- \geq 0, i \in I, q \in Q, c \in C, v \in V, \pi \in \pi', t \in T, f \in F, k \in K, j \in J
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

5. Resultados, Comentários gerais e direcionamento para novas pesquisas

O modelo RMCGP-LHS apresentou 2.507.306 restrições e 16.245.741 variáveis não negativas, considerando dezesseis fazendas, quatro fornecedores, duas transportadores agrícolas, duas frentes de corte, trinta e duas semanas, dois estados e três condições de cana, e 12 variedades de cana.

Para otimização do modelo foi utilizado um computador com processador Intel (Core i7) 1,2 GHZ até 2,266 GHZ, com *max turbo frequency*, 4MB cache e 8GB de RAM DDR3 80MHZ e sistema operacional Windows 7 profissional 64 bits. O tempo computacional foi de aproximadamente 45 minutos.

A título de ilustração do potencial de uso do modelo RMCGP-LHS a Figura 5 mostra os resultados para a simulação realizada utilizando os desvios propostos pelos profissionais da usina estudada (1%; 5%; 10%; 15% e 20%) na Matriz dos Custos Agroindustriais.

Na Figura 5, percebe-se que, quanto menor são os desvios, os resultados do modelo RMCGP-LHS se aproximam da solução de um modelo com um único objetivo - minimização dos custos agroindustriais totais, que representa o enfoque tradicionalmente adotado pelas empresas do setor. Observe-se que, quanto menores forem as perturbações na Matriz dos Custos Agroindustriais e na Matriz de ATR, menor tende a ser a diferença entre a solução do modelo proposto e a do modelo com objetivo único. Porém, quanto maiores são os desvios (o que ocorre freqüentemente na prática devido a fatores econômicos e climáticos), o modelo RMCGP-LHS apresenta resultados melhores (custos menores) que os propostos pelo modelo com objetivo único.

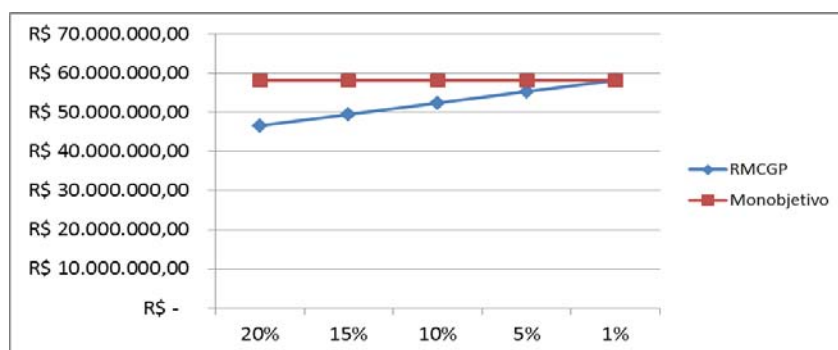


Figura 5- Variação do Custo Total Agroindustrial com relação aos desvios nos coeficientes da Matriz de Custos Agroindustriais.

Aqui não serão mostrados os resultados do modelo quanto ao dimensionamento da frente de corte, da frota agrícola, a quantidade cortada de cana administrada pela usina e também a quantidade cortada das canas fornecidas por terceiros, contudo o modelo RMCGP-LHS permite realizar uma análise de sensibilidade nesses parâmetros, podendo os gerentes da Usina escolher o cenário que mais adere à realidade de cada cenário Macroeconômico.

Os resultados deste estudo têm sido promissores e incentivam outros esforços de pesquisa do grupo, tais como: (a) analisar os efeitos das incertezas nos parâmetros de entrada do modelo, por meio de técnicas de Otimização Robusta; (b), analisar os efeitos das incertezas nos parâmetros de entrada do modelo, por meio de técnicas de Otimização Estocástica Robusta.

Agradecimentos

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

Referências

- Bertrand, J. W. M. e Fransoo, J. C.**, Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, v.22, 241-264, 2002.
- Caballero, R.; Gómez, T.; Ruiz, F.** Goal programming: Realistic Targets for the Near Future. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, v.16, 79-110, 2009.
- Chang, C-T.** Multi-Choice goal programming. *Omega, Elmsford*, v.35, 389-396, 2007.
- Chang, C. T.** Multi-choice goal programming with utility application . *European Journal of Operational Research*, v.123, 652–659, 2011.
- Chang, C-T.** Revised Multi-Choice goal programming. *Applied Mathematical Modelling*, v.35, 389-396, out. 2008.
- CONAB-Companhia Nacional de Abastecimento. Dados de safra, disponível em <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>>, acessado em 4 de Abril de 2011.
- 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.
- Paiva, R. P. O.; Morabito, R.**, An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. *Annals Operations Research*, v.169, 117-130, 2009.
- Paiva, R. P. O.; Morabito, R.**, Programação estocástica robusta aplicada ao planejamento agregado de safra em usinas cooperadas do setor sucroenergético. *Gestão & Produção*, v. 18, n. 4, 719-738, 2011
- Sahinidis, N. V.** Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, v.28, 971-983, 2004.
- Sen, S.; Hingle, J. L.** An introductory tutorial on stochastic linear programming models. *Interfaces*, Providence, v.29, 33-61, 1999.
- Silva, A. F; Ribeiro, I. M; Lopes, P. R. M; Montevechi, J. A. S; Marins, F. A. S.** Planejamento otimizado para colheita de cana de açúcar de uma usina sucroalcooleira. XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Ubatuba-SP, 1242-1254, 2011.
- Silva, A. F; Ribeiro, I.M; Lopes, P; Marins, F. A. S.** Uma Investigação Sobre os Modelos da Programação de Metas Sob Certeza e Sob Incerteza: Aplicação a Problemas de Planejamento Agregado em Usinas sucroalcooleiras. XXXI Encontro Nacional de Engenharia De Produção, Belo Horizonte, v. 1, 1-10, 2011.
- Silva, A. F; Marins, F. A. S; Salomon, V. A. P; Silva, G. e Montevechi, J. A. B.**, Otimização multiobjetivo fuzzy no planejamento agregado da produção e distribuição em usinas de açúcar e álcool. Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Bento Gonçalves - RS, v. 1, 1086-1097, 2010.
- Silva, A. F.** Modelagem do Planejamento Agregado da Produção. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2009.
- Soyster, A. L.** Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*. v.21, n.1, p.1154-1157, 1973.
- Wang, R. C.; Liang, T. F.** Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning. *Computers & Industrial Engineering*, v.46, 17-41, 2004.