

# Métodos híbridos de pontos interiores e da soma ponderada aplicados ao modelo multiobjetivo de colheita de cana-de-açúcar, de coleta e geração de energia de sua biomassa.

**Camila de Lima**

Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação e Matemática Computacional,  
ICMC, USP, CEP: 13566-590, São Carlos, SP,  
Email: [cadlima@yahoo.com.br](mailto:cadlima@yahoo.com.br)

**Antonio Roberto Balbo**

Depto. de Matemática, FC, UNESP, CEP: 17033-360, Bauru, SP  
Email: [arbalbo@fc.unesp.br](mailto:arbalbo@fc.unesp.br)

**Helenice de Oliveira Florentino Silva**

Depto de Bioestatística, IB, UNESP, 18618-970, Botucatu, SP  
Email: [helenice@ibb.unesp.br](mailto:helenice@ibb.unesp.br)

**Resumo:** *Nesse trabalho o modelo multiobjetivo relativo à colheita de cana-de-açúcar, à coleta e geração de energia provenientes do aproveitamento de sua biomassa é proposto a partir de outros já divulgados na literatura. Análise de soluções desse modelo é realizada explorando-se um procedimento híbrido envolvendo os métodos previsor-corretor primal-dual de pontos interiores, branch-and-bound e da soma ponderada. Este modelo visa determinar a escolha das variedades de cana-de-açúcar que minimizam o custo de colheita da cana e coleta de sua biomassa e/ou que maximizam o balanço de energia resultante do aproveitamento desta, considerando áreas mecanizáveis e semi-mecanizáveis, e respeitando as restrições do problema. O modelo multiobjetivo é transformado em uma classe de problemas mono-objetivo através do método da soma ponderada. O método previsor-corretor primal-dual de pontos interiores é utilizado para se obter a solução ótima relaxada e o método branch-and-bound para obter a solução ótima inteira 0-1 de cada subproblema. A partir do conjunto de soluções ótimas dos subproblemas é determinado o conjunto de soluções eficientes (não dominadas) para o modelo multiobjetivo no sentido de Pareto ótimo. Os testes foram realizados em um modelo real com 10 variedades e 16 talhões através de uma implementação no software Borland C++ Builder 6.0 e os resultados foram comparados àqueles do aplicativo Solver do software Excel, demonstrando que o procedimento tem um bom desempenho computacional, determina o conjunto de soluções eficientes e a curva de Pareto ótimo para o modelo multiobjetivo investigado, em um tempo computacional pequeno.*

## 1. Introdução

Muitos estudos têm sido propostos visando otimizar o custo de coletar e transferir a cana-de-açúcar e a biomassa residual, do campo para o centro de processamento, bem como ao uso deste resíduo para a geração de energia, considerando-se os sistemas de colheita mecanizável e semi-mecanizável. Nos trabalhos de [10], [3], [4], [5], [6], [10] e [12], são discutidos modelos matemáticos para a escolha de variedades de cana-de-açúcar que buscam otimizar o custo de coleta da biomassa residual e/ou a geração de energia. Em [9] e [11] são apresentados modelos de minimização de custo da colheita da cana-de-açúcar, considerando áreas mecanizáveis e semi-mecanizáveis em sua formulação.

De modo geral, o modelo multiobjetivo proposto em [6] é uma extensão daqueles divulgados nos trabalhos citados e visa minimizar o custo da colheita da cana-de-açúcar, bem como minimizar o custo de coleta e transporte da biomassa residual e/ou maximizar a geração de energia da biomassa, determinando qual tipo de variedade será plantada em cada talhão, respeitando as restrições de produção de sacarose e fibra de cana-de-açúcar, uso total da área destinada ao plantio (mecanizável ou

semi-mecanizável) e o plantio de apenas uma variedade de cana-de-açúcar por talhão. Assim, cada variedade de cana-de-açúcar pode ou não ser plantada em determinado talhão. Este aspecto caracteriza um problema de programação inteira zero-um, e dependendo de sua dimensão, pode ser de difícil resolução. Além disso, inseriu-se uma restrição com o intuito de limitar o plantio de uma mesma variedade no conjunto de talhões.

Para a investigação de soluções desse modelo utilizou-se um procedimento híbrido envolvendo métodos previsor-corretor primal-dual de pontos interiores (MPCPDPI), *branch-and-bound* e da soma ponderada, para a resolução de um modelo multiobjetivo referente a uma usina do estado de São Paulo, que envolve 10 variedades de cana-de-açúcar e 16 talhões para plantio. O método da soma ponderada, definido em [2], que é uma estratégia que transforma o modelo multiobjetivo em uma classe de subproblemas mono-objetivo, possibilitou o uso dos métodos híbridos de pontos interiores e *branch-and-bound* para a determinação de soluções desses. Foi utilizado o método previsor-corretor primal-dual de pontos interiores para se obter a solução ótima relaxada de cada subproblema e, a partir desta, determinar a solução ótima inteira relacionada às restrições de integralidade desses, relativas à escolha das variedades a serem plantadas, através do método *branch-and-bound*. O conjunto de soluções ótimas dessa classe de subproblemas possibilitou a determinação do conjunto das soluções eficientes (não dominadas) do modelo multiobjetivo investigado e a fronteira de Pareto ótima.

## 2. O Modelo Multiobjetivo

De acordo com [9] e [11], na colheita de cana-de-açúcar queimada têm-se os custos de aceiro, queima, corte manual, carregamento da cana para o caminhão e transporte da cana do campo para a usina. Na colheita mecanizada, têm-se os custos de corte e transporte da cana do campo para a usina. Estes dados estão apresentados nas Tabelas 3 e 4 da Seção 4.

O custo de transporte da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  ( $Ct_{ij}$ ) a uma distância ( $D_j$ ) do talhão  $j$  para a usina:

$$Ct_{ij} = c_{med_i} \cdot D_j \quad (2.1)$$

Em que:  $i = 1, 2, \dots, n$  são os índices que representam as variedades;  $j = 1, 2, \dots, k$  são os índices que representam os talhões;  $c_{med_i}$  é o custo médio do transporte da cana por km; e  $D_j$  é a distância do talhão  $j$  do centro de processamento, em talhões.

O custo  $C_{ij}^{SM}$  de colheita e transporte da cana-de-açúcar de variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  no sistema semi-mecanizado é calculado da seguinte forma:

$$C_{ij}^{SM} = (Ca_i + Cq_i + Cco_i + Cca_i + Ct_{ij}) \cdot L_j \quad (2.2)$$

Em que:  $Ca_i$  é o custo de aceiro da variedade  $i$  ( $R\$.ha^{-1}$ );  $Cq_i$  é o custo da queima da variedade  $i$  ( $R\$.ha^{-1}$ );  $Cco_i$  é o custo de corte da variedade  $i$  ( $R\$.ha^{-1}$ );  $Cca_i$  é o custo de carregamento da variedade  $i$  ( $R\$.ha^{-1}$ );  $Ct_{ij}$  é o custo de transporte da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  ( $R\$.ha^{-1}$ ), calculado em (2.1); e  $L_j$  é área do talhão  $j$ , em hectare.

No sistema mecanizado o custo,  $C_{ij}^M$ , de colheita e transporte da cana de variedade  $i$  plantada no talhão  $j$ , é calculado da seguinte forma:

$$C_{ij}^M = (Cco_i + Ct_{ij}) \cdot L_j \quad (2.3)$$

Em que:  $Cco_i$  é o custo de corte da variedade  $i$  ( $R\$.ha^{-1}$ );  $Ct_{ij}$  é o custo de transporte da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  ( $R\$.ha^{-1}$ ), calculado em (2.1); e  $L_j$  é área do talhão  $j$ , em hectare.

Assim, o custo de coleta do palhiço da cana-de-açúcar da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  ( $CC_{ij}$ ) é calculado pela soma do custo envolvido no processo de enleirar, compactar e carregar o caminhão com o palhiço da variedade  $i$  ( $C_i$ ) e o custo de transporte do palhiço até a usina ( $CT_{ij}$ ), multiplicada à área do talhão  $j$  ( $L_j$ ), calculados através das Tabelas 1, 2 e 5, apresentadas na Seção 4.

Abaixo, segue a expressão do custo referente ao processo de coleta dos resíduos:

$$CC_{ij} = (C_i + CT_{ij})L_j \tag{2.4}$$

A função objetivo que representa o custo total do processo de colheita da cana-de-açúcar e de coleta de resíduos, considerando áreas mecanizáveis e semi-mecanizáveis, é expresso por:

$$CT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l (C_{ij}^M + CC_{ij})X_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=l+1}^k C_{ij}^{SM} X_{ij} \tag{2.5}$$

em que:  $C_{ij}^M$  é o custo da colheita mecanizada;  $CC_{ij}$  é o custo da coleta de resíduos;  $C_{ij}^{SM}$  é o custo da colheita semi-mecanizada;  $l$  é número de talhões em que se considera o sistema mecanizado;  $k - l$  é o número de talhões em que se considera o sistema semi-mecanizado; e  $X_{ij}$  são as variáveis de decisão.

Em se tratando de energia, de acordo com [3] e [4], o balanço de energia para o aproveitamento do palhiço é obtido pela diferença entre a energia proveniente do palhiço da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  ( $EB_{ij}$ ) e a energia gasta na transferência palhiço da variedade  $i$  plantada no talhão  $j$  ( $ET_{Bij}$ ) que é a soma das energias gastas para enleirar e compactar ( $E_{ECij}$ ), carregar ( $E_{Cij}$ ) e transportar esta biomassa ( $E_{Tij}$ ), calculadas através dos dados das Tabelas 1, 2 e 5 apresentados na Seção 4. A fórmula do balanço de energia é apresentada a seguir:

$$BE_{ij} = EB_{ij} - ET_{Bij} \tag{2.6}$$

Assim, define-se a função objetivo referente ao balanço de energia no aproveitamento de resíduos de cana-de-açúcar:

$$BET = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l BE_{ij}^M X_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=l+1}^k BE_{ij}^{SM} X_{ij} \tag{2.7}$$

em que:  $BET$  é o balanço de energia total no aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar,  $BE_{ij}^M$  é definido de forma equivalente a (2.6) porém considera apenas áreas mecanizáveis e  $BE_{ij}^{SM}$  também é calculada de forma equivalente a (2.6) levando em consideração apenas áreas semi-mecanizáveis.

Neste trabalho, os cálculos de custo de coleta e do balanço de energia referentes ao aproveitamento de resíduos das áreas semi-mecanizáveis ( $BE_{ij}^{SM}$ ) são considerados nulos, visto que a colheita nesta área não gera resíduos.

O modelo multiobjetivo proposto em [7] consiste em determinar quais das variedades  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) de cana-de-açúcar devem ser plantadas nos talhões  $j$  ( $j = 1, \dots, k$ ) de área  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (Km) da usina, que investigue, simultaneamente, o mínimo custo total de colheita da cana-de-açúcar e coleta de resíduos e o máximo balanço de energia no aproveitamento de resíduos resultantes da colheita, os quais têm objetivos conflitantes, levando em consideração restrições como quantidade de produção de sacarose e fibra de cana-de-açúcar, uso total da área destinada ao plantio e o plantio de apenas uma variedade de cana-de-açúcar por talhão. O modelo matemático é definido por:

$$\text{Minimizar} \quad (CT; (-1) BET) \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a:} \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq \overline{AT}; \\ & \overline{F}_l T \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i X_{ij} \leq \overline{F}_s T; \\ & \sum_{i=1}^n X_{ij} = 1; \\ & X_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k \\ & \sum_{j=1}^k X_{ij} \leq M \end{aligned} \tag{2.9}$$

Além de  $CT$  e  $BET$ , as quais estão definidas em (2.5) e (2.7);  $i = 1, 2, \dots, n$  são os índices que representam as variedades,  $j = 1, 2, \dots, k$  são os índices que representam os talhões;  $A_i$  é a estimativa de produção de sacarose da variedade  $i$  (t/ha);  $\overline{P}$  é a quantidade mínima estabelecida para a POL da cana;  $T$  é o número total de talhões;  $F_i$  é a estimativa do teor de fibra da variedade  $i$ ;  $\overline{F}_l$  e  $\overline{F}_s$  são as quantidades mínimas e máximas estabelecidas para a fibra da cana;  $M$  é o número máximo que cada variedade  $i$  pode ser plantada.;  $X_{ij} = 1$  implica que a cana de variedade  $i$  deve ser plantada no talhão  $j$  e em caso contrário  $X_{ij} = 0$ .

## 2.1. Estratégias de resolução

Geralmente, os modelos multiobjetivo são de difícil resolução e na maioria das vezes exigem a intervenção do usuário para a determinação de soluções satisfatórias (eficientes). Assim, para a resolução deste modelo multiobjetivo, pode ser utilizada a estratégia de otimização conhecida por Otimalidade de Pareto, através dos métodos da soma-ponderada relacionado ao modelo (2.10) e do  $\varepsilon$ -restrito, relacionado ao modelo (2.11), baseando-se em [2]. Esses métodos transformam o modelo em uma classe de subproblemas mono-objetivos, buscam determinar o conjunto de soluções eficientes para o modelo e possibilitam a construção da curva de Pareto ótimo. Nos testes realizados apenas o modelo (2.10) foi mostrado, os resultados para o modelo (2.11) podem ser vistos em [7].

| <b>Método da soma ponderada</b>  | <b>Método do <math>\varepsilon</math>-restrito</b>                |
|--|---|
| $\text{Minimizar } (\alpha CT - (1-\alpha) BET)$ <p style="text-align: center;">(2.10)</p> | $\text{Maximizar } BET$ <p style="text-align: center;">(2.11)</p> |
| <p><i>Sujeito a:</i> Restrições (2.9)</p> <p>em que <math>0 \leq \alpha \leq 1</math>.</p> | <p><i>Sujeito a:</i> Restrições (2.9) e</p> $CT \leq \varepsilon$ |

## 3. Método previsor-corretor primal-dual de pontos interiores e *branch-and-bound*

O método primal-dual com procedimento previsor-corretor utilizado é variante daquele proposto por [8] diferenciando-se deste por já utilizar no passo previsor informações do parâmetro de barreira  $\mu_k$ , o que melhora a eficiência do método por evitar que os pontos definidos por este, aproximem-se da fronteira do problema, podendo, inclusive, inviabilizá-los. Enquanto que, no passo corretor, este reajusta as direções com informações dos aproximantes de segunda ordem referentes às condições de complementaridade, possibilitando que, o procedimento de centragem do passo previsor mais o ajuste feito no passo corretor, acelerem a convergência do processo, para a determinação da solução ótima do problema contínuo.

Além disso, os modelos investigados, relativos ao processo envolvido na colheita da cana-de-açúcar e ao aproveitamento de sua biomassa residual, consistem em determinar se uma variedade é plantada ou não. Este problema enquadra-se como um problema de programação inteira binária (PIB) ou programação inteira zero-um, aquele cujas variáveis podem assumir valores 0 ou 1. A busca de soluções para este tipo de problema, com grande número de variáveis e restrições, é de difícil resolução e nem sempre o sucesso na determinação de soluções é garantido, principalmente em casos multiobjetivos. No procedimento híbrido proposto, o método de programação inteira utilizado foi o método *branch-and-bound*, baseando-se em [1].

O desenvolvimento do método, bem como todos os passos do Algoritmo previsor-corretor primal-dual e *branch-and-bound* (PDBB) podem ser vistos em [7], já que, nesse texto a limitação do número de páginas impossibilitou o detalhamento do passos desse método, os quais incluíram, no Procedimento externo (resolução do PIB relaxado): um teste de otimalidade que incluiu o teste de integralidade de Borches e Mitchell [1]; os cálculos intermediários do *passo previsor*; os cálculos intermediários do *passo corretor* (que envolve a atualização dos termos de segunda ordem das folgas complementares); as direções de busca determinadas no passo corretor; teste de ilimitariedade; comprimento dos passos primal e dual e atualização da solução. No procedimento interno a execução dos passos do método Branch-and-Bound (avaliação do problema, ramificação, atualização da solução e seleção do novo nó a ser investigado), utilizando o MPCPDPI para a atualização e integralização das soluções.

## 4. Resultados

Para a obtenção de resultados, o algoritmo previsor-corretor primal-dual e *branch-and-bound* (PDBB), visto na Seção 3, foi implementado no *software* Borland C++ Builder 6.0. Assim, foi possível fazer a aplicação do método PDBB ao modelo multiobjetivo investigado referente à minimização dos custos de colheita de cana-de-açúcar e coleta de resíduos, e à maximização de energia relativa ao

aproveitamento de resíduos, apresentado na Seção 2.2, para obter o conjunto de soluções eficientes desse modelo. Com o intuito de validar estas soluções, os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos pelo aplicativo Solver do *software* Excel.

Para os cálculos referentes ao modelo multiobjetivo investigado, utilizou-se os dados das Tabelas de 1 a 5, apresentadas em [6], [9] e [11]. A Tabela 1 apresenta as estimativas por tipo de variedades, considerando 10 variedades. A Tabela 2 apresenta os custos, consumos, e recomendações referentes às variedades. A Tabela 3 apresenta os custos referentes ao processo de transporte. A Tabela 4 apresenta os custos referentes ao processo de colheita. E por fim, a Tabela 5 apresenta a área e a distância dos talhões à usina, considerando 16 talhões.

TABELA 1: Estimativas de valores por variedade.

| $i$ | Variedade | $V_i$  | $P_{Bi}$ | $E_{CBi}$ | $A_i$  | $Q_i$   | $F_i$  | $P_c$   |
|-----|-----------|--------|----------|-----------|--------|---------|--------|---------|
| 1   | SP80-1816 | 7,964  | 33,360   | 2671,990  | 16,420 | 354,200 | 13,940 | 100,000 |
| 2   | RB72454   | 8,610  | 37,580   | 2649,950  | 20,400 | 299,280 | 12,900 | 186,000 |
| 3   | SP80-3280 | 9,369  | 36,720   | 2602,140  | 18,460 | 316,180 | 12,630 | 158,000 |
| 4   | SP81-3250 | 10,619 | 34,250   | 1947,850  | 18,380 | 320,850 | 11,320 | 179,000 |
| 5   | RB855536  | 9,780  | 26,430   | 2211,950  | 17,050 | 258,460 | 12,510 | 165,000 |
| 6   | RB855113  | 10,870 | 29,380   | 2310,370  | 17,540 | 319,380 | 10,910 | 155,000 |
| 7   | SP79-1011 | 8,910  | 24,090   | 1977,470  | 15,800 | 214,720 | 10,330 | 158,000 |
| 8   | RB835486  | 9,560  | 21,530   | 2444,200  | 12,840 | 205,770 | 9,280  | 155,000 |
| 9   | RB711406  | 12,320 | 33,200   | 2008,830  | 20,770 | 410,290 | 16,120 | 183,000 |
| 10  | SP70-1143 | 7,050  | 22,140   | 1924,800  | 15,010 | 155,980 | 11,590 | 155,000 |

TABELA 2: Custos e consumos de combustível e energia dos maquinários utilizados para a coleta do palhico e recomendações de teores de Pol e fibra da cana-de-açúcar.

| $C_{e_{cc}}$ | $C_o$ | $P$  | $V_c$ | $E_{c_{EC}}$ | $E_{c_c}$ | $E_{c_T}$ | $\bar{A}$ | $\bar{F}_I$ | $\bar{F}_S$ |
|--------------|-------|------|-------|--------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| 3,69         | 0,37  | 2,15 | 7,56  | 57,54        | 5,25      | 60        | 14        | 11          | 15          |

TABELA 3: Custos envolvidos no processo de transporte.

| Transporte    | Custo |
|---------------|-------|
| Cana crua     | 6,42  |
| Cana queimada | 5,35  |

TABELA 4: Custos envolvidos no processo de colheita.

| Operação        | Custo |
|-----------------|-------|
| Aceiro          | 0,14  |
| Queima          | 0,17  |
| Corte           | 7,03  |
| Corte cana crua | 10,5  |
| Carregamento    | 1,62  |

TABELA 5: Área e distância dos talhões até a usina.

| Talhão $j$ | 1      | 2      | 3      | 4     | 5      | 6     | 7      | 8      |
|------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| $L_j$      | 8,490  | 4,520  | 58,180 | 4,220 | 5,740  | 6,610 | 30,410 | 5,080  |
| $D_j$      | 3,490  | 2,490  | 16,080 | 3,490 | 2,590  | 2,590 | 15,330 | 8,300  |
| Talhão $j$ | 9      | 10     | 11     | 12    | 13     | 14    | 15     | 16     |
| $L_j$      | 12,010 | 54,950 | 38,660 | 3,780 | 10,430 | 6,150 | 8,790  | 57,790 |
| $D_j$      | 9,240  | 12,630 | 16,430 | 8,250 | 7,800  | 8,590 | 2,250  | 17,200 |

E ainda, para a aplicação do método PDBB ao modelo apresentado na Seção 2.2, foram definidos os talhões 3 e 11 para áreas semi-mecanizáveis, e os demais para as áreas mecanizáveis.

#### 4.1. Análise de resultados

Encontrar uma solução ótima para o modelo multiobjetivo não é possível, visto que os objetivos de minimizar o custo total e maximizar o balanço de energia total da colheita da cana-de-açúcar, coleta e aproveitamento dos resíduos são conflitantes. Desta forma, utilizam-se as estratégias da soma ponderada e do  $\epsilon$ -restrito, definido pelos problemas (2.10) e (2.11), respectivamente, que transformam o modelo multiobjetivo (2.8) em um conjunto de problemas mono-objetivo. Assim, a partir da aplicação do método PDBB, visto na Seção 3, a estes problemas, pode-se obter um conjunto

de soluções eficientes, as quais determinam a curva de Pareto. Nesse trabalho apresentamos os resultados apenas para os problemas (2.10). Os resultados obtidos para (2.11) podem ser vistos em [7].

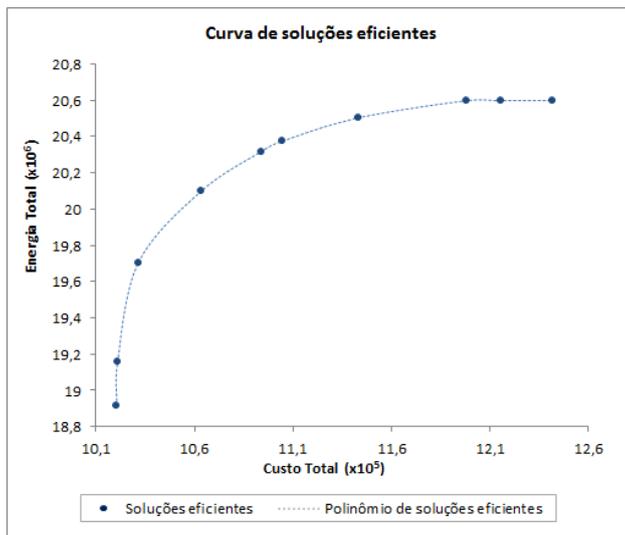


FIGURA 1: Curva de soluções eficientes obtida pelo método PDBB a partir da estratégia da soma ponderada.

TABELA 6: Valores das funções objetivo obtidos pelo método PDBB a partir da estratégia da soma ponderada.

| Valor de $\alpha$ | Custo total $CT$ | Energia total $BET$ |
|-------------------|------------------|---------------------|
| 0                 | 1.241.777,91     | 20.597.468,47       |
| 0,055             | 1.215.504,75     | 20.597.468,47       |
| 0,065             | 1.198.046,52     | 20.597.468,47       |
| 0,08              | 1.143.057,66     | 20.502.583,59       |
| 0,18              | 1.104.590,43     | 20.374.393,59       |
| 0,2               | 1.093.947,18     | 20.317.323,13       |
| 0,3               | 1.063.298,50     | 20.098.430,45       |
| 0,45              | 1.031.361,26     | 19.703.458,44       |
| 0,87              | 1.020.911,42     | 19.155.067,67       |
| 1                 | 1.020.556,80     | 18.915.734,85       |

A Figura 1 apresenta a relação entre os valores de custo e balanço de energia total, e o fato destes objetivos serem conflitantes, melhorar um objetivo, implica em piorar o outro. As soluções eficientes obtidas são de interesse, pois informam ao produtor a determinação das variedades a serem plantadas, de modo a atender o momento econômico de sua empresa. Ainda, de acordo com Lima (2013), a aplicação do método PDBB à estratégia do  $\epsilon$ -restrito gera um número maior de soluções eficientes do que a estratégia da soma ponderada, visto que esta estratégia permite que o usuário escolha o limitante  $\epsilon$ , de acordo com suas necessidades.

## 5. Conclusões

Neste trabalho, foi proposto um modelo multiobjetivo para minimizar o custo da colheita da cana-de-açúcar e o custo da coleta da biomassa residual, e/ou maximizar o balanço de energia relativo à biomassa residual do processo, baseando-se em Ramos (2010), Silva (2011), Florentino (2006), Florentino *et al* (2011), Homem (2010) e Homem *et al* (2011). Este foi investigado através do método híbrido PDBB e da soma ponderada para um problema real de uma usina do estado de São Paulo contendo dezesseis talhões e dez variedades, em que as áreas dos talhões 3 e 11 foram consideradas semi-mecanizáveis e as demais, mecanizáveis.

O algoritmo do método PDBB foi implementado através do software Borland C++ Builder 6.0, e aplicado ao problema destacados, através da estratégia da soma ponderada, obtendo as soluções ótimas para os casos considerados, as quais possibilitaram a determinação do conjunto de Pareto ótimo para o problema multiobjetivo testado. As soluções obtidas foram comparadas com aquelas determinadas pelo aplicativo Solver, do *software* Excel, e os resultados obtidos, revelaram o bom desempenho do método híbrido proposto.

O trabalho atingiu os seus objetivos, relacionados à proposta do modelo e ao uso do método PDBB e da soma ponderada à resolução do modelo de cultivo e de aproveitamento da biomassa residual da cana-de-açúcar, mostrando a viabilidade de se utilizar esta técnica de otimização para auxiliar as usinas na seleção de variedades a serem plantadas, de tal forma a otimizar o processo, respeitando-se as restrições de produção caracterizadas no modelo.

## 6. Agradecimentos

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida ao 1º. autor.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] B. Borches, J. E. Mitchell, “Using an interior point method in a branch and bound algorithm for integer programming”. Technical Report 195, Mathematical Sciences, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180, March 1991, Revised July 7, 1992.
- [2] K. Deb, “Multi-objective optimization using evolutionary algorithms”. John-Wiley & Sons Ltda., 2004.
- [3] Florentino, H. O., “Programação linear inteira em problemas de aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar”. Tese (Livre Docência) Instituto de Biociências de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2006.
- [4] H. O. Florentino, A. D. Lima, L. Carvalho, A. R. Balbo, T. P. D. Homem, Multiobjective 0-1 integer programming for the use of sugarcane residual biomass in energy cogeneration. *International Transactions in Operational Research*, v.18, p. 605-615, (2011).
- [5] T. P. D. Homem, A. R. Balbo, H. O. Florentino, Optimal energy generation with biomass of sugarcane harvest. *Revista IEEE América Latina*, v.1, p. 653-658, (2011).
- [6] A. D. Lima, “Otimização do aproveitamento do palhicho de cana-de-açúcar”. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2009.
- [7] C. Lima, “Métodos Híbridos de Pontos Interiores e de Programação Inteira 0-1 para Problemas de Custo de Colheita da Cana-de-Açúcar e de Custo de Coleta e Geração de Energia Relacionados à sua Biomassa”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – FEB, Unesp de Bauru, 2013.
- [8] S. Mehrotra, On the implementation of a primal–dual interior point method. *SIAM Journal on Optimization*, v.2, p. 572-601, (1992).
- [9] R. P. Ramos, “Modelo matemático para custo e energia na produção de açúcar e álcool”. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2010.
- [10] T. C. C. Ripoli, M. L. C. Ripoli, “Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente”. Publicações Técnicas, ESALQ-USP, Piracicaba SP, 2004.
- [11] L. M. Silva, “Algoritmo Genético na Otimização do Custo de Colheita e de Transporte da Cana-de-Açúcar”. Dissertação (Mestrado em Biometria), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2011.
- [12] G. Tolentino, “Programação Linear Inteira Aplicada ao Aproveitamento do Palhicho da Cana-de-Açúcar”. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2007.