

ALGORITMO GENÉTICO BI-OBJETIVO PARA SELEÇÃO DE VARIEDADES DA CANA-DE-AÇÚCAR

Helenice de Oliveira Florentino

Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências, UNESP
Botucatu, SP, CEP 18618-000, Brasil
helenice@ibb.unesp.br

Margarida Vaz Pato

Instituto Superior de Economia e Gestão, ISEG UTL e CIO, Faculdade de Ciências, UL
Lisboa, Portugal
mpato@iseg.utl.pt

RESUMO

Com a redução gradativa das queimadas, o palhiço, resíduo derivado da colheita de cana-de-açúcar sem queima prévia, tornou-se foco para pesquisadores e produtores. As vantagens no seu recolhimento, recuperação e aproveitamento têm mobilizado pesquisadores e gerentes de usinas, que estão interessados em encontrar uma maneira produtiva, econômica e eficaz para este manejo. O presente trabalho propõe o uso da programação linear inteira binária para auxílio no estudo do balanço da energia e da viabilidade econômica no aproveitamento do palhiço para a produção de energia. Para isto, foram propostos modelos matemáticos para escolha das variedades de cana-de-açúcar que deverão ser plantadas nas áreas agrícolas, que derivem palhiços com mínimo custo de manejo e ofereça um balanço ótimo de energia, levando em consideração a área de plantio e as necessidades da usina para a produção de açúcar, álcool e produção de fibra. Este trabalho é dedicado à aplicação de um algoritmo genético bi-objetivo para o problema. Um experimento computacional foi realizado para casos reais e gerado aleatoriamente. Os resultados são promissores, com boa distribuição dos pontos potencialmente não dominados em pouco tempo de processamento. Portanto, esta será uma ferramenta adequada para ajudar as usinas de cana no planejamento de suas atividades.

PALAVRAS CHAVE. Seleção de variedades de cana, Programação linear bi-objetivo binário, Algoritmo genético bi-objetivo.

AC&MA: PO na Agricultura e Meio Ambiente

ABSTRACT

The selection of sugarcane varieties is an important problem faced by companies in Brazil that take profit from sugarcane harvest for energy production. Due to the actual concerns about reduction of environmental damages and about efficiency of the production system the research on this problem urges. First, the problem of sugarcane varieties selection according to technical constraints and aiming to minimize collection and transport costs and maximize energy obtained from residues of sugarcane harvest is presented, next it is formalized within bi-objective binary linear programming and its hard computational complexity is studied. This paper is mainly devoted to the application of a bi-objective genetic algorithm to the issue. A computational experiment undertaken with a set including real and semi-randomly generated instances is reported. The results are very good respecting the spacing and number of potentially non-dominated points obtained, as well as the computing time. So this will be an appropriate tool to help managers of the sugarcane mills in planning their producing activities. Moreover, the bi-objective genetic algorithm can be easily adapted to other binary problems sharing with this model the assignment and the knapsack constraints.

KEYWORDS. Sugarcane, bi-objective binary integer programming, Genetic algorithm.

AC&MA: OR in Agriculture and Environment

1. Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Esta cultura é usada principalmente para produção de açúcar, álcool e energia. Na safra 2009/2010 a produção de Cana-de-Açúcar foi de 605 milhões de toneladas plantadas em 8,1 milhões de hectares (CONAB(2010) e UNICA(2008)). O setor sucroalcooleiro cresceu cerca de 7,07% com relação ao ano anterior.

Com o aumento na produção de cana, aumentaram também as dimensões dos problemas no setor sucroalcooleiro, como exemplo a poluição causada pela queima dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar. Com isto, leis foram promulgadas para diminuir e proibir esta prática e a mecanização da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia ganhou impulso. Sem queima prévia, a colheita de cana-de-açúcar, manual ou mecanizada, gera grande quantidade de resíduos na lavoura, que, se forem simplesmente abandonados no local de colheita, podem comprometer a próxima safra da cana-de-açúcar ou criar um ambiente favorável ao aparecimento de pragas.

O presente trabalho propõe o uso da programação linear inteira binária para auxílio no estudo do balanço de energia e viabilidade econômica no aproveitamento do palhicho para a produção de energia. Para isto, foram propostos modelos matemáticos para escolha das variedades de cana-de-açúcar a serem plantadas nas áreas agrícolas da usina, que derivem palhichos com mínimo custo e ofereçam um balanço ótimo de energia. Este modelo foi resolvido com auxílio de um algoritmo genético bi-objetivo.

2. Custo de coleta e aproveitamento do palhicho

O processo de coleta do palhicho passa pelas etapas de enleiramento, compactação, carregamento do caminhão e transporte do campo para o centro de processamento (Florentino(2008)). O custo deste processo em $R\$.m^{-3}$ é calculado por :

$$C_i = \left(\frac{C_{ecc}}{V_i} \right)$$

C_{ecc} é o custo por tonelada para enleirar, compactar e carregar o caminhão com palhicho em ($R\$.t^{-1}$), e V_i é o volume ocupado por uma ton. do palhicho da variedade i depois de compactada, em $m^3.ton^{-1}$.

O custo calculado pode ser convertido em $R\$.ha^{-1}$ como segue:

$$CECC_i = (Q_i C_i)$$

Q_i é volume estimado do palhicho da variedade i por hectare, $m^3.ha^{-1}$.

O custo (Cd_j) para o caminhão percorrer a distância D_j do talhão j para a usina, em $R\%$, é determinado por:

$$Cd_j = (D_j C_o P)$$

D_j é a distância em km, C_o é o consumo de combustível do caminhão a ser usado no transporte ($L.km^{-1}$) e P é o preço do combustível em $R\$.L^{-1}$

Assim, o custo para transportar o palhicho de um hectare de cana da variedade i produzido no talhão j (em $R\$.ha^{-1}$) é:

$$CT_{ij} = \left(\frac{Q_i}{V_c} \right) Cd_j$$

V_c é volume disponível do caminhão em m^3 .

O custo de coleta do palhicho da cana de variedade i plantada no talhão j é calculado por:

$$CC_{ij} = (CECC_i + CT_{ij})L_j \quad (1)$$

$CECC_i$ = custo para enleirar, compactar e carregar o palhiço da variedade i , ($R\$.t^{-1}$); CT_{ij} = custo para transportar o palhiço de um hectare de cana da variedade i produzido no talhão j , ($R\$.ha^{-1}$); L_j = área do talhão j .

3. Balanço de energia proveniente do palhiço

A energia da biomassa residual de colheita da variedade i plantada no talhão j , EB_{ij} é calculada como: $EB_{ij} = Ecb_i P b_i L_j$.

Ecb_i é a estimativa da energia calorífica gerada por uma tonelada de palhiço da variedade i ($MJ.ton^{-1}$), $P b_i$ é a estimativa da massa do palhiço gerada por um hectare de cana da variedade i , em $ton.ha^{-1}$ e L_j é a área do talhão j (ha).

A energia gasta na transferência da biomassa da variedade i , plantada no talhão j , (ETb_{ij}), é dada pela soma da energia utilizada para enleirar e compactar (Eec_{ij}), carregar (Ec_{ij}), e transportar (Et_{ij}). $ETb_{ij} = Eec_{ij} + Ec_{ij} + Et_{ij}$.

Em que: $Eec_{ij} = Ecec L_j P b_i$, $Ec_{ij} = Ecc L_j P b_i$, $Et_{ij} = Ect D_j \left(\frac{V_i L_j}{Vc} \right)$

$Ecec$ é a energia consumida para enleirar e compactar o resíduo por unidade massa ($MJ.ton^{-1}$), Ecc é a energia consumida para carregar o caminhão com o resíduo por unidade massa ($MJ.ton^{-1}$) e Ect é a energia consumida pelo caminhão ao transportar o resíduo ($MJ.km^{-1}$), V_i é o volume de palhiço da variedade i por unidade área ($m^3.ha^{-1}$), Vc é a capacidade de carga do caminhão (m^3).

O balanço da energia, supondo a variedade i plantada no talhão j é:

$$BE_{ij} = EB_{ij} - ETb_{ij} \quad (2)$$

4. Modelagem matemática

O problema consiste em determinar quais das n variedades devem ser plantadas nos k talhões de medida L_j (ha) e distância D_j (Km) do centro de produção ($j=1,2,\dots,k$), que ao mesmo tempo ofereça o menor custo para o processo de transferência do palhiço e maximize o balanço de energia da biomassa.

Considere X_{ij} as variáveis de decisão, onde: $X_{ij}=1$ implica que a cana de variedade i deve ser plantada no talhão j e em caso contrário $X_{ij} = 0$. O seguinte modelo é proposto:

$$\text{Minimize} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} \right] \text{ e} \quad (3a)$$

$$\text{Maximize} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij} \right] \quad (3b)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq \bar{A} \quad (4)$$

$$\bar{F}_1 \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k F_i X_{ij} \leq \bar{F}_s \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \text{ para todo } j \quad (6)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

\bar{A} é a demanda de POL, A_i é a estimativa de sacarose da variedade i (t/ha), \bar{F}_i e \bar{F}_s são os limitantes inferiores e superiores para a fibra. As equações em (3) são calculadas como em (1) e (2).

5. Aplicação

Para a implementação do algoritmo genético, foram utilizados os dados da Tabela 1, custos, consumos de combustíveis das máquinas e demandas da Usina.

Tabela 1. Dados para aplicação do modelo.

Cecc	Co	P	Ecec	Ecc	Ect	\bar{A}	\bar{F}_i	\bar{F}_s	Vc
R\$.t ⁻¹	L.km ⁻¹	R\$.L ⁻¹	MJ.t ⁻¹	MJ.t ⁻¹	MJ.Km ⁻¹ t.ha ⁻¹		t.ha ⁻¹	t.ha ⁻¹	m ³
3,69	0,37	2,15	7,56	57,54	5,25	18,41	11	15	60

A Tabela 2 apresenta as variedades que são adaptáveis ao local da Usina e os dados destas variedades que são necessários para o cálculo de parâmetros do modelo.

Tabela 2. Dados das variedades adaptáveis ao solo da Usina.

i	Variedade	V_i	P_{Bi}	E_{cBi}	A_i	Q_i	F_i
		m ³ .t ⁻¹	t.ha ⁻¹	Mcal.t ⁻¹	t.ha ⁻¹	m ³ .ha ⁻¹	t.ha ⁻¹
1	SP 80-1816	7,96	33,36	2671,99	16,42	354,20	13,94
2	RB 72454	8,61	37,58	2649,95	20,40	299,28	12,90
3	SP 80-3280	9,37	36,72	2602,14	18,46	316,18	12,63
4	SP 81-3250	10,62	34,25	1947,85	18,38	320,85	11,32
5	RB855536	9,78	26,43	2211,95	17,05	258,46	12,51
6	RB855113	10,87	29,38	2310,37	17,54	319,38	10,91
7	SP791011	8,91	24,09	1977,47	15,80	214,72	10,33
8	RB835486	9,56	21,53	2444,20	12,84	205,77	9,28
9	RB711406	12,32	33,20	2008,83	20,77	410,29	16,12
10	SP701143	7,05	22,14	1924,80	15,01	155,98	11,59

A Tabela 3 apresenta as áreas dos talhões da Usina que serão utilizados nos cálculos dos parâmetros do modelo.

Tabela 3. Áreas dos Talhões da Usina.

Talhão(j)	Medida (ha)
1	8,49
2	4,52
3	58,18
4	4,22
5	5,74
6	6,61
7	30,41
8	5,08
9	12,01
10	54,95
11	38,66
12	3,78
13	10,43
14	6,15
15	8,79
16	57,79
Total	315,81

A figura 1 apresenta a fronteira de Pareto obtida para o modelo proposto, usando o método multiobjetivo exato ϵ -restrito (Deb(2004)), utilizando 16 talhões e 10 variedades. O método ϵ -restrito foi implementado no MATLAB 7.6.0.324 (R2008a) MATLAB(2008).

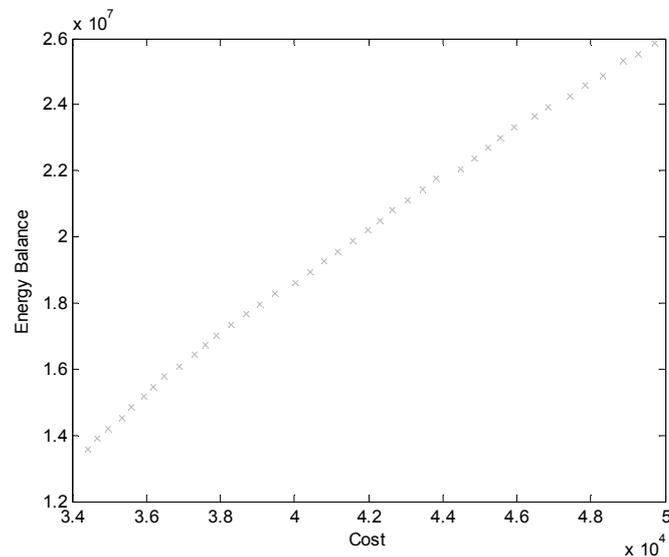
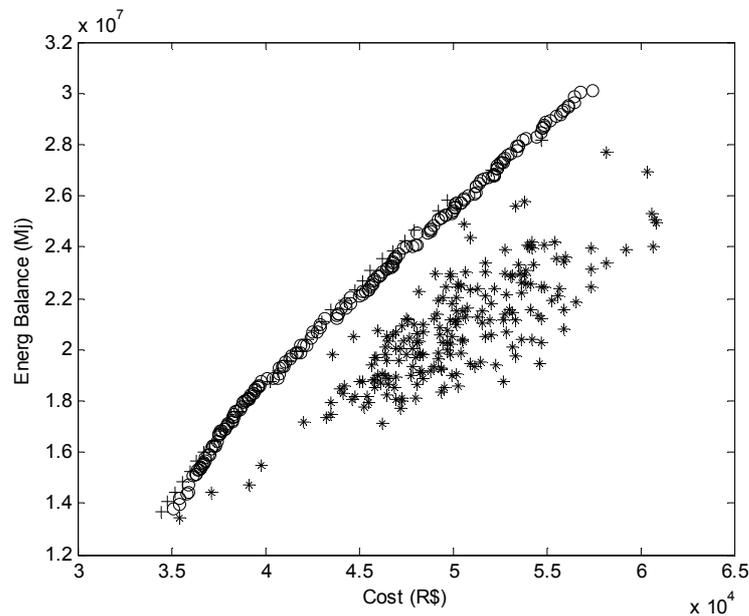


Figura 1: Alguns pontos da fronteira de Pareto exata, utilizando 16 talhões e 10 variedades, gerada usando o método de ϵ -restrito, implementado no MATLAB 7.6.0.324 (R2008a) MATLAB(2008).

O algoritmo Genético multiobjetivo (Coello(2007), Collette(2003) e Deb(2004)) foi implementado para resolução do modelo proposto e os resultados mostram uma boa aproximação para a fronteira ótima do modelo conforme ilustra a figura 2.



- + fronteira de pareto ótima
- * indivíduos da população inicial
- o indivíduos da fronteira aproximada

Figura 2: Resultado da aplicação do algoritmo genético para obtenção da fronteira aproximada

A tabela 4 apresenta uma comparação quantitativa dos resultados dos métodos Genético e ϵ -restrito, mostrando que tempo computacional para gerar 200 pontos da fronteira aproximada pelo método genético é muito inferior ao tempo para gerar 70 pontos da fronteira exata. Estes resultados mostram que o algoritmo genético pode ser de muito proveito para problemas de grande dimensão.

Tabela 4: comparação dos resultados: Genético e exato

Método	Heurístico (Genético)	Exato (ϵ -restrito)
Quantidade de variedades	10	10
Quantidade de talhões	16	16
Área	315,81	315,81
Tempo de CPU (segundos)	83,8	1168,04
Número de pontos da fronteira	200	70
Amplitude do custo	16340642,19	12258761,78
Amplitude do Balanço de Energia	21307,69	15310,75

O algoritmo genético foi implementado para simular vários casos com diferentes quantidades de variedades (mostrados na tabela 5), tamanhos e quantidades de talhões (mostrados na tabela 6), os resultados estão mostrados na tabela 7.

Tabela 5: Dados das Variedades.

i	Especificação da variedade	V_i $m^3 \cdot t^{-1}$	Pb_i $t \cdot ha^{-1}$	Ecb_i $MJ \cdot t^{-1}$	A_i $t \cdot ha^{-1}$	F_i $t \cdot ha^{-1}$	Q_i $m^3 \cdot ha^{-1}$
1	SP80-1816	7,96	33,36	2671,99	16,42	13,94	354,20
2	RB72454	8,61	37,58	2649,95	20,40	12,90	299,28
3	SP80-3280	9,37	36,72	2602,14	18,46	12,63	316,18
4	SP81-3250	10,62	34,25	1947,85	18,38	11,32	320,85
5	RB855536	9,78	26,43	2211,95	17,05	12,51	258,46
6	RB855113	10,87	29,38	2310,37	17,54	10,91	319,38
7	SP79-1011	8,91	24,09	1977,47	15,80	10,33	214,72
8	RB835486	9,56	21,53	2444,20	12,84	9,28	205,77
9	RB711406	12,32	33,20	2008,83	20,77	14,12	410,29
10	SP70-1143	7,05	22,14	1924,80	15,01	11,59	155,98
11	SP70-1284	7,74	18,37	1156,45	13,12	10,04	163,36
12	SP71-6163	8,72	23,57	2120,00	12,74	9,65	205,55
13	SP71-3146	9,56	20,15	2963,06	12,86	10,33	278,19
14	NA56-79	12,32	27,42	1231,42	12,84	9,28	205,77
15	RB806043	9,08	21,53	2408,96	20,77	14,12	210,29
16	RB835089	8,60	33,30	2298,11	14,48	11,25	190,32
17	SP87-365	9,00	20,96	2571,80	17,03	13,21	254,22
18	SP80-1842	9,60	21,90	1749,85	16,52	12,27	301,27
19	RB943365	9,80	31,40	2502,24	17,80	11,99	216,12
20	RB925211	10,90	27,32	2147,92	15,64	12,32	220,65

Tabela 6: Dados para as simulações

	Nome	Instancia	Variedade	Talhão	Área Total (ha)
1		1	10	16	315,81
2		10	10	20	405
3		10	20	20	405
4		10	10	60	1215
5		10	20	60	1215
6		10	10	180	3645
7		10	20	180	3645
8		10	10	300	6075
9		10	20	300	6075

Como mostra a tabela 7, os resultados são promissores, com boa distribuição dos pontos potencialmente não dominados e o tempo computacional é muito curto, mostrando que esta será uma ferramenta adequada para auxiliar os gerentes de grandes usinas de cana no planejamento de suas atividades.

Tabela 7: Resultado do Algoritmo genético para várias simulações

Nome	Tempo de CPU (s)	Número de pontos Factíveis			Amplitude	
		Iniciais	Finais	Fronteira	Custo (Reais)	Balanco de Energia (MJ)
1	83,80	200	200	200	21307,69	16340642,19
2	84,05	197	200	200	56395,16	18545106,86
3	84,44	198	200	200	45119,11	18545449,10
4	191,10	197	200	198	141627,36	55636085,92
5	237,30	196	200	192	301289,08	105648444,33
6	507,70	196	199	159	440112,22	166907859,32
7	602,70	196	194	78	365660,72	210142128,14
8	964,30	196	198	145	760595,54	278178806,67
9	828,53	196	191	72	773608,07	406523224,09

6. Conclusão

Com as atuais dimensões das empresas sucroalcooleiras, com a forte tendência de crescimento deste setor e com as cobranças sociais, econômicas e ambientais, tem-se notado grandes dificuldades de gerenciamento destas indústrias. Assim, toda ferramentas que auxilie nas tomadas de decisões, obtenção de estimativas e resolução de problemas são bem vindas nesta área.

Desta forma, a modelagem matemática pode dar importante contribuição para este setor. A metodologia proposta auxilia na decisão de quais variedades devem ser plantadas, de forma que minimiza o custo de manejo do palhico e ofereça um balanço ótimo de energia, levando em consideração a área de plantio e as necessidades da usina para a produção de açúcar e álcool, sem perder a qualidade da cana exigida pela usina em termos de sacarose e fibra.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a FUNDUNESP, PROPG UNESP e FAPESP No. 2009/14901-4 e 010/07585-6) pelo apoio financeiro. O segundo autor agradece a FCT pelo apoio ao projeto POCTI/ISFL/152.

8. Referências

- Coello, C. A. C., Lamont, G. B., Velduizen, D. A. V., *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, 2nd edition, Springer, New York, 2007.
- Collette, Y., Siarry, P., *Multiobjective optimization: Principles and case studies*, Springer, Berlin, 2003.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, 2010 (<http://www.conab.gov.br>), acessado em 18 de agosto de 2010.
- Deb, K., *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, John Wiley & Sons Chichester, 2004.
- Florentino, H. O., Moreno, E. V., Sartori, M. M. P. (2008), Multiobjective optimization of economic balances of sugarcane harvest biomass. *Scientia Agricola*, 65, 561-564.
- MATLAB version 7.6.0.324 (R2008a), *High performance numeric computation and visualization software: Reference Guide*, Natick, Massachusetts, The MathWorks Inc., 2008.
- UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2010 (<http://www.unica.com.br>), acessado em 18 de agosto de 2010.