GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ELETRICIDADE A PARTIR DE RESÍDUOS DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL: UM MODELO COMPUTÁVEL DE EQUILÍBRIO GERAL

José A. Scaramucci[1]
Clovis Perin
Petronio Pulino
Orlando F. J. G. Bordoni
Marcelo P. da Cunha
IMECC/Unicamp

Luís A. B. Cortez
Feagri/Unicamp

RESUMO

As possibilidades de geração de eletricidade no Brasil são analisadas usando-se um modelo computável de equilíbrio geral (CEG). O setor tradicional de eletricidade e o restante da economia são caracterizados por uma representação estilizada descendente (*top-down*) em árvores de múltiplos níveis com tecnologia CES (*constant elasticity of substitution)*. Já a produção de eletricidade pela queima do bagaço de cana-de-açúcar é descrita através de uma análise de atividades ascendente (*bottom-up*), com a representação detalhada dos insumos empregados. A abordagem híbrida na representação da produção aumenta a credibilidade de modelos CEG para análise de políticas energéticas, uma vez que os padrões possíveis de substituição na conversão de eletricidade são baseados em estudos de engenharia. O modelo obtido é usado para se estudar os efeitos da redução da produção de eletricidade pelo setor preexistente sobre preços, produção e renda. Mostra-se que a geração de excedentes de eletricidade pelo sistema agroindustrial da cana-de-açúcar pode atenuar os impactos econômicos sobre o produto interno bruto (PIB) de uma crise de oferta de energia elétrica.

ABSTRACT

The possibilities of electricity generation in Brazil are analyzed using a computable general equilibrium (CGE) model. The traditional sector of electricity and the remaining of the economy are characterized by a stylized top-down representation as nested CES (constant elasticity of substitution) production functions. The electricity production from sugarcane bagasse is described through a bottom-up activity analysis, with a detailed representation of the required inputs. The hybrid approach in the representation of production increases the credibility of CGE models in the analysis of energy policy as the possible substitution patterns in electricity conversion are based on engineering studies. The obtained model is used to study the effects of the reduction in electricity output by the preexisting sector on prices, production, and income. It is shown that the generation of electricity surpluses by the sugarcane agro-industrial system may ease the economic impacts on the gross domestic product (GDP) of an electrical energy supply crisis.

INTRODUÇÃO

Em meio às reformas no arcabouço institucional do setor de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica do Brasil iniciadas na década de 1990, veio a crise de oferta de eletricidade em 2001. O gráfico abaixo construído com dados obtidos em [1] mostra que, no período de 1990–2000, houve um aumento de 52,3% no consumo de eletricidade, enquanto a capacidade de geração total experimentou um acréscimo de 41,2%. Em 1998, esse hiato entre consumo e capacidade instalada era ainda maior, atingindo 18,1 pontos percentuais. Fica evidente, assim, que no período o sistema elétrico foi sendo cada vez mais exigido até seu colapso em 2001. Desde então, procurou-se aumentar a oferta de termeletricidade e promover, ainda mais, ganhos em conservação de energia.

[1] Contato: scaramuc@ime.unicamp.br

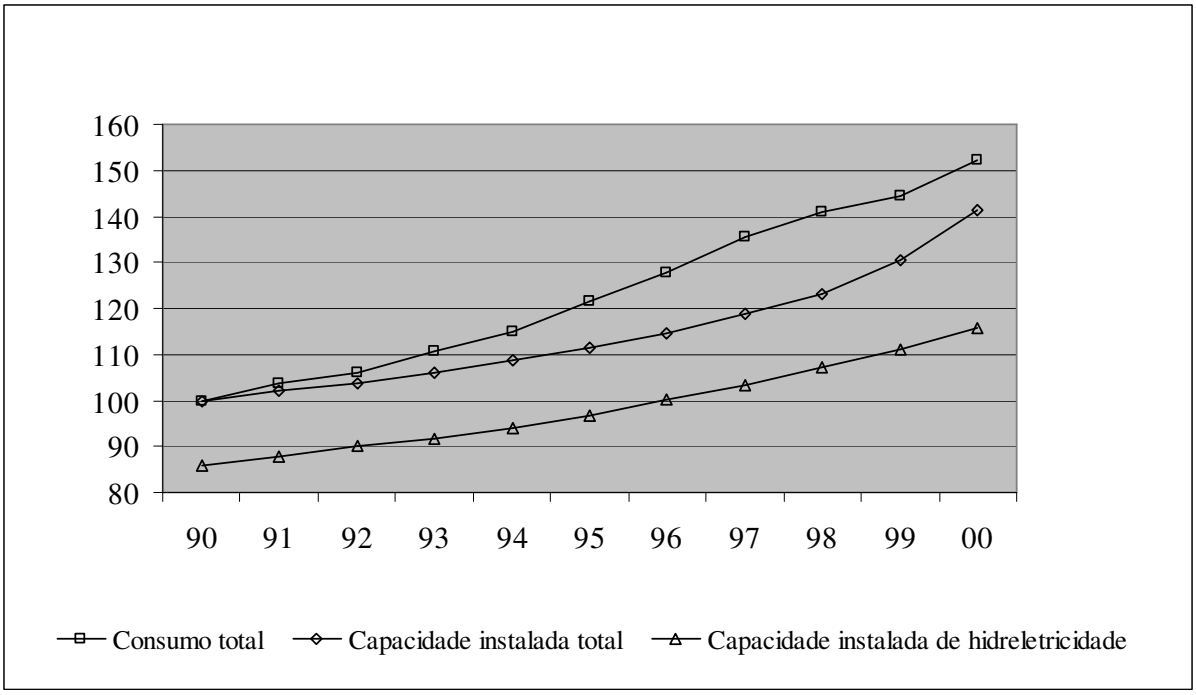

Figura 1. Valores relativos do consumo de eletricidade e da capacidade instalada para o período 1990–2000.

O trabalho aqui desenvolvido analisa os impactos econômicos de um constrangimento na oferta de hidreletricidade e a possível penetração da energia gerada a partir de resíduos de cana-de-açúcar.

METODOLOGIA

Questões de planejamento energético são relacionadas a vários aspectos da economia como um todo, como formação de preços, determinação da produção, geração e distribuição de renda, consumo, ações governamentais, etc. Os modelos computáveis de equilíbrio geral (CEG) oferecem um arcabouço coerente de análise capaz de capturar todos esses aspectos relevantes e, assim, têm sido usados extensivamente para a análise de políticas energéticas (Bhattacharyya, 1996 [2]).

Um modelo CEG é a representação estilizada de uma economia envolvendo, entre outras coisas, produtores, consumidores e mercados, e tendo como variáveis endógenas basicamente os preços e quantidades associados aos fluxos de renda. A formulação consiste em dotar o construto teórico apropriado para se analisar as questões propostas com dados observados. Assim, muitas vezes é comum chamar modelos CEG como teoria com números ou mesmo números com teoria.

Modelos CEG são usados tipicamente para simular políticas ou eventos exógenos. Um caso base é construído para refletir a realidade então existente. Cenários são construídos alterando-se os valores de algumas variáveis exógenas ou parâmetros, para refletir mudanças estruturais ou conjunturais. O equilíbrio pós-choque é então computado, tornando possível quantificar os impactos econômicos das alterações introduzidas.

A construção de modelos CEG exige a integração de pelo menos três áreas relacionadas, embora distintas: formulação (teoria econômica), estimação de parâmetros (econometria) e solução numérica (matemática aplicada). Essa foi a motivação para o desenvolvimento de uma linguagem para a formulação, calibragem e solução de modelos CEG, o *Pegasus* (Scaramucci, 1997 [3]; Scaramucci e Bordoni, 1998 [4]; Bordoni, 2001 [5]).

A resolução de um modelo CEG requer a determinação de pontos fixos de correspondências ponto-conjunto. Trata-se de um problema matemático difícil. A seção seguinte discute sucintamente alguns métodos de resolução.

Dada a importância da indústria sucro-alcooleira para o Brasil, já foram conduzidos um razoável número de estudos econômicos dos setores relacionados à cana-de-açúcar e energia, estimulados em grande parte pelo surgimento do Proálcool em 1975. Sampaio de Souza (1984) [6], por exemplo, fez uma avaliação econômica do Proálcool através de um modelo CEG. A distribuição da renda entre os setores rural e urbano e os efeitos do Proálcool sobre a produção de alimentos foram estudados.

MÉTODOS DE SOLUÇÃO

A construção de modelos CEG tem de levar sempre em consideração os métodos numéricos de solução disponíveis.

Modelos CEG são formulados matematicamente como um problema misto de complementaridade (PMC). Diversos métodos já foram desenvolvidos e têm sido empregados com sucesso na obtenção da solução de PMCs.
Ferris e Pang (1997) [7] classificam as principais abordagens para problemas de complementaridade em:

- Extensões do método de Newton para equações não-lineares em que a busca de direções se torna um problema de complementaridade;
- Métodos de determinação de caminho que usam uma generalização das técnicas de busca unidimensional;
- Métodos de programação quadrática seqüencial que estendem a metodologia de Gauss-Newton;
- Métodos de descida baseados na otimização diferencial que reformulam as relações de complementaridade como programas ou equações não-lineares;
- Métodos de projeção e proximais que estendem técnicas de gradiente projetado;
- Métodos de transformações semi-suaves que trocam equações não-suaves por aproximações diferenciáveis;
- Métodos de pontos interiores baseados na troca de desigualdades por uma penalidade interior.

Um problema misto de complementaridade é definido por um vetor de variáveis de decisão $x \in R^n$ e uma função continuamente diferenciável $F:R^n \rightarrow R^n$ satisfazendo as condições:

$$F_j(x) > 0 \Rightarrow x_j = l_j$$
$$F_j(x) = 0 \Leftarrow l_j < x_j < u_j$$
$$F_j(x) < 0 \Rightarrow x_j = u_j$$

onde $l_j < u_j$ são os limites inferior e superior de x_j, respectivamente, para todo j = 1, …, n.
O modelo CEG construído aqui é de pequeno porte e foi resolvido pelo método SLCP (*sequence of linear complementarity problems*) (Mathiesen, 1985 [8]).

BASE DE DADOS

A implementação do modelo CEG inicia-se, em geral, obtendo-se um quadro da economia em um determinado instante, mostrando os fluxos de renda entre os agentes econômicos.
São considerados sete setores produtivos da economia (*commodities*): cana-de-açúcar, açúcar, álcool, combustíveis fósseis, geração de eletricidade, distribuição de eletricidade e resto da economia (ROE). Já os componentes da demanda final são: formação bruta de capital fixo, variação de estoques, exportação, consumo da administração pública e consumo das famílias. Trabalho e capital constituem os fatores primários de produção.
Em geral, um modelo CEG pressupõe que há uma correspondência biunívoca entre setor e produto. Entretanto, a tabela de recursos de bens e serviços fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [9] mostra setores produzindo mais de um produto. Fez-se necessário, então, construir uma tabela de usos de bens e serviços fictícia considerando o consumo intermediário para a produção de um único bem. Adotou-se para isso o enfoque produto por produto e tecnologia baseada na indústria (Miller e Blair, 1985 [10]).
Atualmente, as matrizes mais recentes divulgadas pelo IBGE referem-se ao ano de 1996, tendo 42 setores e 80 produtos. Entretanto, alguns setores de interesse aparecem agregados. Produção e distribuição de eletricidade e saneamento básico formam a indústria de serviços industriais de utilidade pública (SIUP), elementos químicos inclui álcool e o setor de combustíveis fósseis se encontra em refino de petróleo. Assim, foi necessário fazer um trabalho de desagregação para quatro setores: álcool, combustíveis fósseis, geração de eletricidade e distribuição de eletricidade.[2]
Cabe destacar que uma grande dificuldade de se construir modelos econômicos para planejamento energético é a de reconciliar a base de dados do IBGE com o Balanço Energético Nacional, publicado pelo Ministério de Minas e Energia; percebe-se logo que é complicado concertar reais e watts-hora. Os setores desagregados apresentam quase sempre um desequilíbrio entre os valores de produção (despesas) e demanda (receitas). O processo de ajuste biproporcional iterativo ou método RAS [10] foi usado para as correções.
Finalmente, os dados foram dispostos no formato adotado pelo GTAP (*Global Trade Analysis Project*) [11]. Todas as transações são avaliadas a preços de mercado e agente. Os valores a preço de agente incluem os impostos sobre produtos pagos no consumo. Já os impostos sobre a produção encontram-se contidos nos valores a preço de mercado. A renda do governo vem das diferenças entre os valores a preço de mercado e agente em cada transação.

O MODELO

O modelo CEG básico segue aproximadamente o construto descendente (*top-down*) do modelo GTAP [5]. São representados os sete setores/produtos mencionados na seção anterior e os fatores primários trabalho e capital. A produção e demanda são descritas por funções de produção CES (*constant elasticity of substitution)* recorrente [3]. A poupança do consumidor representativo é atendida pelo consumo de bens de capital. O investimento é tratado como a produção de bens de capital e segue as decisões de investimento. Poupança, investimento, exportações e importações são

[2] O uso da matriz de insumo-produto de 1980 do IBGE em uma versão eletrônica gentilmente fornecida por Joaquim J. M. Guilhoto (ESALQ/USP) facilitou grandemente o trabalho de separação dos setores álcool, combustíveis fósseis e eletricidade.

determinados endogenamente; o modelo, assim, tem fechamento neoclássico.
A representação, calibragem e resolução do modelo CEG foram feitas com *Pegasus* [3, 5].
Um setor de geração de eletricidade com resíduos de cana-de-açúcar foi então enxertado de modo ascendente (*bottom-up*) na economia. O resultado é um modelo integrado energia-economia.
A disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar é obtida endogenamente da produção de açúcar e álcool, como mostrado resumidamente na Figura 2, abaixo.

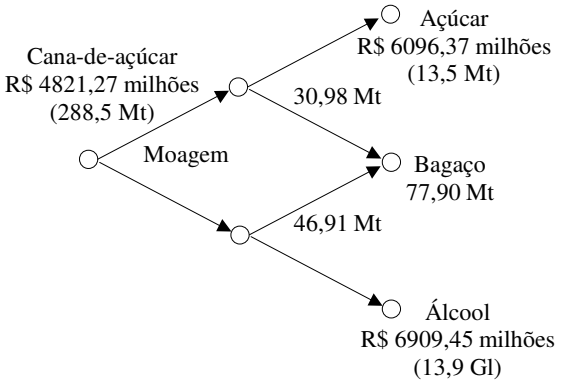

Figura 2. Produção de bagaço.

Os valores referem-se ao ano base de 1996. Dados sobre transformações foram extraídos de Moreira e Goldemberg (1999) [12]. A produção de uma tonelada de açúcar requer 8,5 t de cana-de-açúcar. Já para se produzir um metro cúbico de álcool são necessárias 12,5 t de cana-de-açúcar. Supôs-se que a moagem de uma tonelada de cana-de-açúcar gera 270 kg de bagaço contendo 50% de umidade.
Uma detalhada análise dos custos envolvidos na geração de eletricidade com resíduos de cana-de-açúcar é encontrada em [13]. Considerou-se aqui apenas um caso intermediário entre as várias possibilidades de investimento estudadas. A alternativa adotada sugere instalar em uma usina-padrão uma caldeira de 61 ata de pressão e um gerador de extração controlada e condensação de 42,687 MW; com a queima do bagaço obtido da moagem de 1,8 Mt de cana-de-açúcar em um ano seria possível gerar aproximadamente o excedente de 122,4 GWh de eletricidade. Os investimentos incrementais seriam de R$ 31,6 milhões. Assim, os custos anuais de capital seriam R$ 3,71 milhões, supondo-se 20 anos de vida útil dos equipamentos e juro real de 10% a.a. Para operar tal usina-padrão considerou-se que seriam gastos R$ 10 para cada MWh de eletricidade gerada [14].
A disponibilidade de bagaço no ano base é de 77,90 Mt. O consumo anual de bagaço de cada usina-padrão seria de 0,486 Mt. Portanto, seria possível operar 160,29 usinas-padrão, resultando em um setor de geração com bagaço para o Brasil em 1996 com as características mostradas na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Setor de geração com bagaço.

Mão-de-obra (R$ milhões)	Serviços de capital (R$ milhões)	Excedente de eletricidade (TWh)
195,55	594,68	19,62

Segundo os dados preparados, o valor a preço de mercado do produto do setor de geração de eletricidade foi de R$ 8.286,82 milhões. A produção de energia elétrica foi de 291,24 TWh [1]. Portanto, o preço de mercado para geração de eletricidade foi de R$ 28,45/MWh. Assim, o setor de geração com bagaço teria uma receita de R$ 558,19 milhões; entretanto, os custos de mão-de-obra e serviços de capital somariam R$ 790,23 milhões. Se existente em 1996, o setor de geração de eletricidade com bagaço seria inviável. O preço mínimo para permitir a produção de eletricidade com bagaço é calculado em R$ 40,28/MWh. Pode-se mostrar que ao preço de R$ 28,45/MWh, a eletricidade da queima de bagaço somente seria produzida se o juro fosse de 3,7% a.a.; o custo anual de serviços de capital passaria então a ser R$ 362,64 milhões.

SIMULAÇÕES

Os experimentos numéricos conduzidos aqui supõem o colapso de setor de geração de eletricidade preexistente no ano base de 1996[3].
A economia é submetida a choques de oferta de eletricidade caracterizados por níveis de racionamento de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Para dar suporte à restrição sobre a produção de eletricidade, aplica-se uma sobretaxa sobre o preço da eletricidade gerada, que poderia ser interpretada como "seguro anti-racionamento". Tal taxa é determinada endogenamente e seu valor depende do nível de racionamento.
Dois cenários são construídos. Supõe-se inicialmente que a produção de eletricidade continue a ser feita somente pelo sistema de geração preexistente. Um setor complementar de geração de eletricidade com bagaço de cana-de-açúcar é então introduzido.
Por simplicidade, a quantidade de eletricidade importada foi mantida constante em relação ao caso base.
As figuras a seguir resumem os impactos econômicos resultantes para cada nível de racionamento.
A Figura 3 mostra o valor relativo do PIB em relação ao ano base. A penetração da energia elétrica

[3] Contribuições relativas para a capacidade instalada: hidrelétricas, 87%; termelétricas, 12% e usinas nucleares, 1% [1].

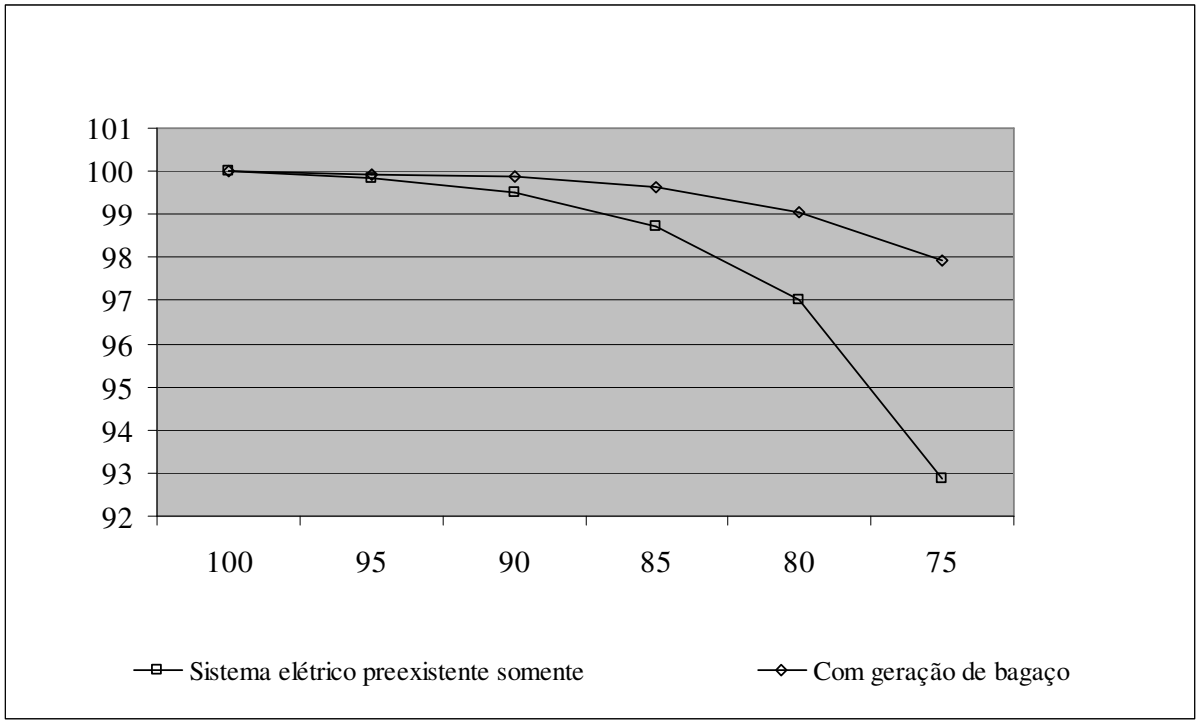

Figura 3. Valor relativo do produto interno bruto (PIB) para cada nível de operação do sistema elétrico preexistente.

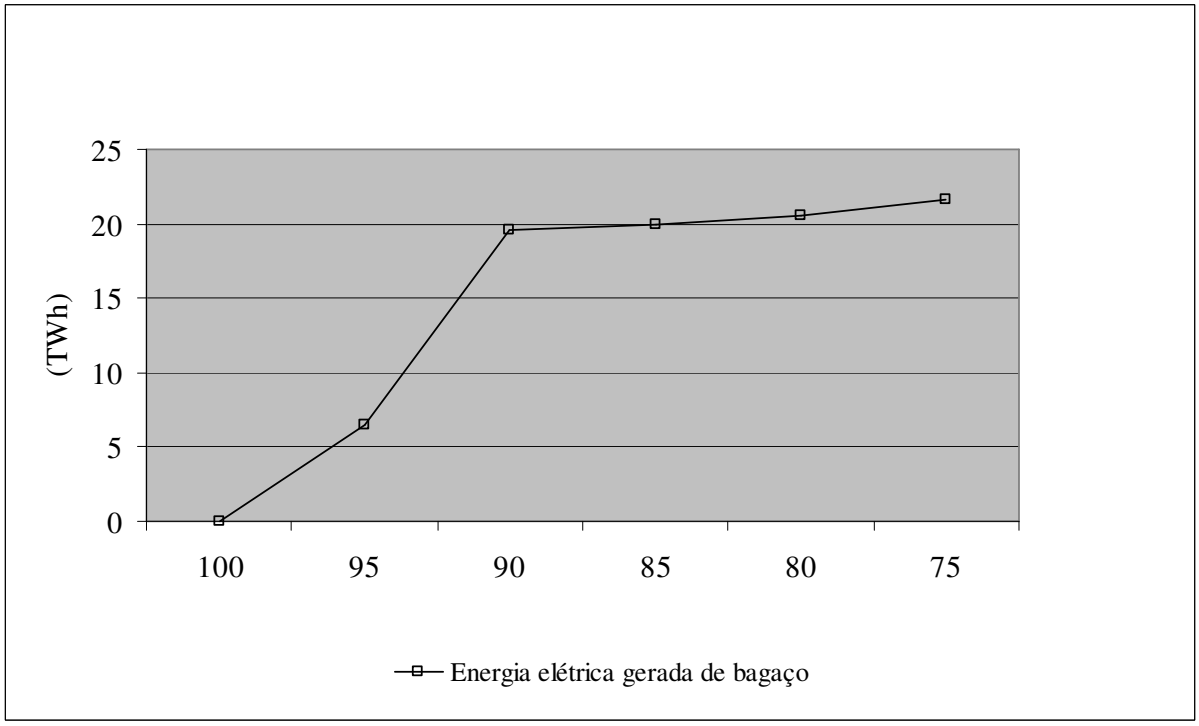

Figura 4. Penetração da eletricidade gerada de bagaço para cada nível de operação do sistema elétrico preexistente.

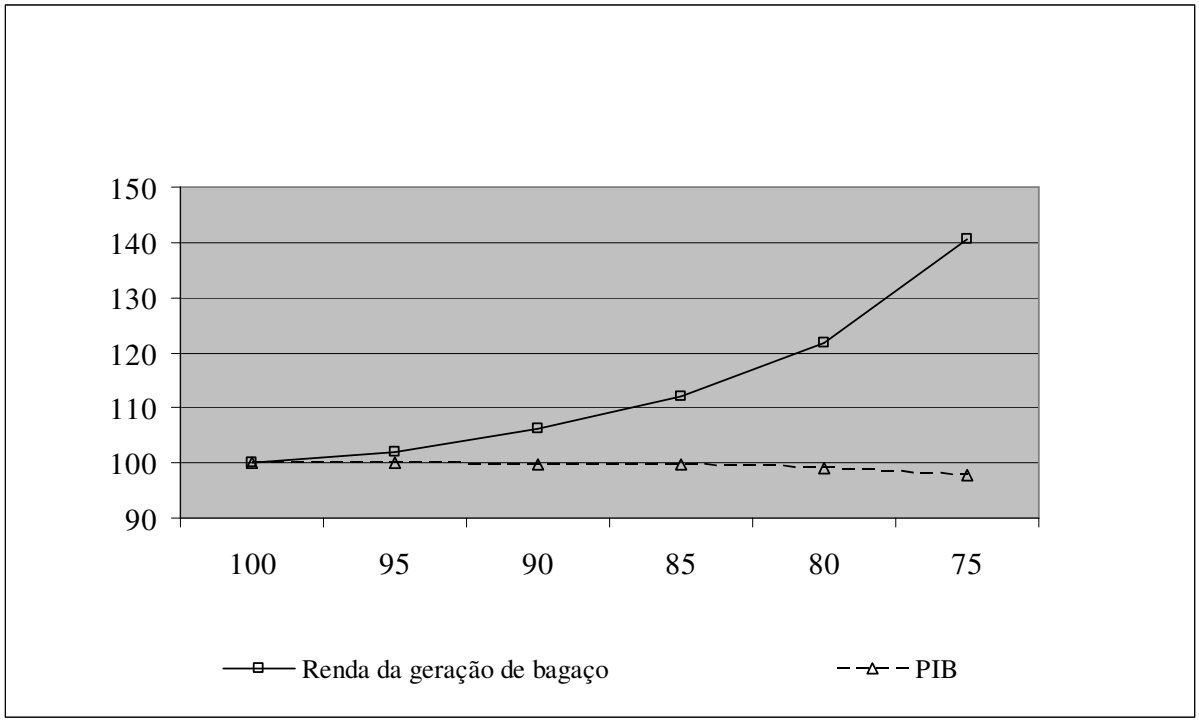

Figura 5. Valor relativo da renda obtida da geração com bagaço para cada nível de operação do sistema elétrico preexistente.

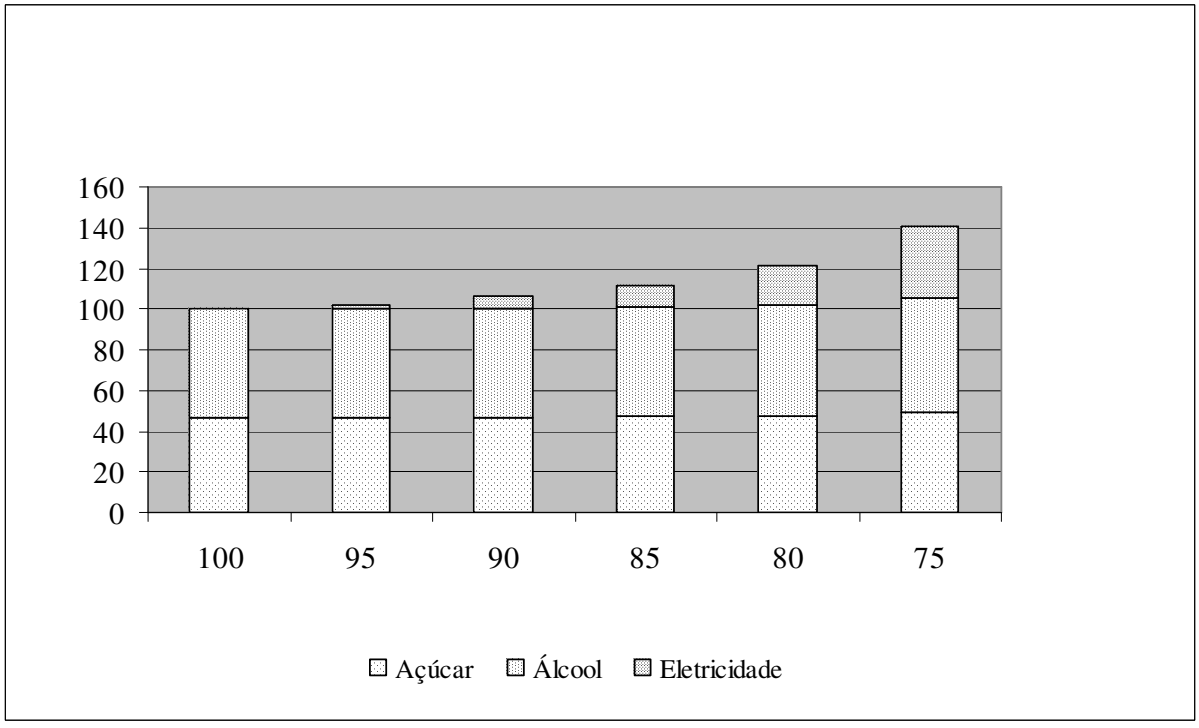

Figura 6. Composição da renda total do setor eletro-sucro-alcooleiro para cada nível de operação do sistema elétrico preexistente.

gerada de bagaço é indicada na Figura 4. Já a Figura 5 exibe a renda obtida de geração com bagaço. Finalmente, a Figura 6 contém a composição da renda total do setor eletro-sucro-alcooleiro.
Percebe-se que o produto interno bruto sofre uma queda de cerca de 3% para um nível de racionamento de 20%. Com a economia deprimida, cai a demanda por insumos de energia elétrica. Contudo, introduzindo-se um setor de geração com bagaço, o nível de atividade econômica diminuiria menos de 1% com o racionamento de 20%. Cabe destacar que, aparentemente, um racionamento de eletricidade superior a 20% traria sérias conseqüências para a economia; em relação ao caso base, com o setor de eletricidade operando ao nível de 75%, o PIB seria quase 7% menor, caso não haja geração com bagaço.
A penetração da geração com bagaço é rápida até um nível de racionamento de 10%. A Tabela 2 abaixo mostra o preço e a quantidade da eletricidade gerada de bagaço para cada nível de racionamento.

Tabela 2. Curva de oferta da eletricidade de bagaço.

Nível de racionamento (%)	Preço (R$/MWh)	Geração com bagaço (TWh)
0	28,45	0
5	39,99	6,45
10	42,10	19,62
15	72,71	19,94
20	122,84	20,50
25	207,95	21,65

Preços maiores de eletricidade tornam viável a geração com bagaço. Após o setor eletro-sucro-alcooleiro ter atingido sua capacidade, porém, incrementos na produção de eletricidade dependem da disponibilidade de bagaço. Com racionamento de 20%, por exemplo, os preços de açúcar e álcool teriam de ser cerca de 87% e 83%, respectivamente, em relação ao caso base. Preços menores fazem crescer a demanda de açúcar e álcool, aumentando a oferta de bagaço de cana-de-açúcar. A escassez de eletricidade pode, assim, tornar o bagaço um produto mais importante que açúcar e álcool.
A renda do setor eletro-sucro-alcooleiro aumenta com a redução do nível de operação do sistema elétrico preexistente. Por exemplo, com racionamento de 20%, o acréscimo de renda em relação ao caso base seria pouco mais de 20%.

CONCLUSÕES

Os resultados acima mostram que os efeitos de uma redução no nível de operação do sistema elétrico preexistente podem ser significativos. A possibilidade de geração de eletricidade com bagaço de cana-de-açúcar seria importante para atenuar os impactos econômicos resultantes.

É importante ressaltar que se considerou apenas a geração com bagaço como complemento à produção do setor elétrico preexistente. Seria essencial introduzir também um módulo de termeletricidade a gás. Assim, deve-se interpretar os resultados obtidos com cautela.
Outros módulos descrevendo fontes alternativas como energia solar fotovoltaica e eólica poderiam ainda ser enxertados no modelo CEG.
Uma possibilidade interessante seria considerar a possível ampliação da produção de etanol combustível, dando uma maior disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar.
Em 1996 já se percebia que o setor de geração de eletricidade estava sendo bastante exigido (Figura 1). Entretanto, o preço da eletricidade gerada era de R$ 28,45/MWh, o que impedia a geração por bagaço (Tabela 2).
Contudo, crises representam oportunidades. Em 1975, o primeiro choque do petróleo levou à criação do Programa Nacional do Álcool, o Proálcool. A atual crise de escassez de eletricidade já causa a rápida penetração de termeletricidade. Espera-se que a agroindústria brasileira de cana-de-açúcar venha a se tornar definitivamente um setor de produção de bens energéticos, como sugerido pela Figura 6. Vasconcellos (2001) [15] acredita que a energia derivada da biomassa de cana-de-açúcar pode vir a ser a base de um projeto nacional de desenvolvimento.

PALAVRAS CHAVES

Modelos energia-economia, geração com bagaço, biomassa, equilíbrio geral, complementaridade não-linear.

REFERÊNCIAS

[1] Ministério de Minas e Energia (MME), *Balanço Energético Nacional*, 2001 (ftp://ftp.mme.gov.br/pub/balanco/BEN/Portugues/Ben_p00.pdf).

[2] Bhattacharyya, Subhes C., "Applied general equilibrium models for energy studies: a survey" (*Energy Economics*, 18, 145–164, 1996).

[3] Scaramucci, José A., "Análise Aplicada de equilíbrio econômico com *Pegasus* e *Mathematica*" (tese de livre-docência, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), 28 de novembro de 1997).

[4] Scaramucci, José A., e Orlando F. J. G. Bordoni, "Modeling Global Trade with *Pegasus/Mathematica*" (First Annual Conference on Global Economic Analysis, Universidade de Purdue, West Lafayette, EUA, 70–95, 1998).

[5] Bordoni, Orlando F. J. G., "Métodos Quantitativos para Construção, Calibragem e Solução de Modelos Computáveis de Equilíbrio

Geral de Grande Porte" (tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), 21 de fevereiro de 2001).

[6] Sampaio de Souza, Maria Conceição, Evaluation economique du programme national de l'alcool (P. N. A.) au Bresil: Une analyse d'equilibre general (tese de doutorado, Universidade Livre de Bruxelas, 1984).

[7] Ferris, M. C. e J. S. Pang, "Engineering and economic applications of complementarity problems", (*SIAM Review*, 39(4), 669-713, 1997).

[8] Mathiesen, Lars, "Computation of Economic Equilibria by a Sequence of Linear Complementarity Problems" (*Mathematical Programming Study*, 23, 144–162, 1985).

[9] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE*), Matriz de insumo-produto*, 1996 (http://www2.ibge.gov.br/pub/Contas_Nacionais/Matriz_de_Insumo_Produto/1996/).

[10] Miller, Ronald E., e Peter D. Blair, *Input-output analysis: Foundations and Extensions* (Prentice-Hall, 1985).

[11] Hertel, Thomas W. e Marinos E. Tsigas. Structure of GTAP, em Thomas W. Hertel, editor, *Global Trade Analysis*, 13–73 (Cambridge University Press, 1997).

[12] Moreira, José R., e José Goldemberg, "The alcohol program" (Energy Policy, 27, 229–245, 1999).

[13] Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), *Geração com Resíduos de Cana*, 2001 (http://www.inee.org.br/down_loads/forum/cogerac_cana.pdf).

[14] Bartholomeu, Daniela B., José V. Salvi, Auad Atala Jr. e Marcelo T. Rocha, "Cogeração de Energia a Partir de Bagaço de Cana" (XXXIX Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural, 2001). (http://cepea.esalq.usp.br/energ/zip/Co-gera%E7ao%20SOBER.pdf).

[15] Vasconcellos, Gilberto F., "A civilização dos hidratos de carbono", *Folha de S. Paulo* (*Mais!*), 27 de maio de 2001.