

# Análise da sustentabilidade energética do sistema de uma usina autônoma de álcool através de índices de energia e pegada ecológica

Emerson Ribeiro Machado<sup>1</sup>

Carlos Cezar da Silva<sup>2</sup>

## Resumo

A avaliação convencional de uso de energia e recursos por um sistema de produção considera apenas o valor de bens e serviços de mercado, e não os bens e serviços naturais. Devido à necessidade de incorporar parâmetros ecológicos a essa avaliação, surgiu o conceito de energia, que consiste na soma de energia já utilizada, direta ou indiretamente, para a criação de um novo produto ou serviço. O presente trabalho avalia a sustentabilidade energética do processo de uma usina autônoma de álcool através do cálculo de índices de energia, pegada ecológica e capacidade de carga. Os resultados mostram que, apesar de alguns índices energéticos calculados se mostrarem desfavoráveis, os resultados foram em geral satisfatórios para o sistema avaliado. Isso indica que para o ritmo da utilização de recursos, o impacto ecológico do processo em consideração é menor do que a capacidade de carga.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade energética. Energia. Pegada ecológica. Usina autônoma de álcool.

## 1 Introdução

A energia possui quantidade e qualidade, e ao observarmos que a energia possui formas diferentes, podemos notar que ocorre também uma variação da capacidade de realização de um determinado trabalho. De acordo com Odum (2007), as formas concentradas de energia, como os combustíveis fósseis, possuem uma qualidade mais alta em relação às formas mais dispersas como a luz do sol e, ao comparar as fontes diretamente utilizadas pela humanidade, deve-se considerar a qualidade e quantidade de energia disponível e, sempre que possível, comparar a qualidade da fonte com a qualidade do uso.

A avaliação convencional do uso de energia e recursos por um sistema de produção não considera todas as energias e recursos naturais gastos para produzir o produto ou o serviço final, sendo considerado apenas o valor dos bens e serviços de mercado, e não os bens e serviços naturais. Diante da necessidade de incorporar ao sistema de produção a mensuração de parâmetros ecológicos desconsiderados pela avaliação convencional, Odum (1996) criou o conceito de energia. Energia é definida como a soma da energia disponível já utilizada direta ou indiretamente para criar um produto ou

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Inconfidentes. Praça Tiradentes, 416, Centro 37576-000 Inconfidentes – MG. emersonrimac@oi.com.br

2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Inconfidentes. Praça Tiradentes, 416, Centro 37576-000 Inconfidentes – MG. carlos.silva@ifsuldeminas.edu.br

um serviço. A partir de então, outras metodologias foram criadas para esta finalidade. Odum (1996) criou também uma metodologia capaz de avaliar o uso dos recursos por um determinado sistema, quer sejam antropogênicos ou naturais. Essa metodologia de Odum é capaz de avaliar diferentes recursos e processos utilizando uma única métrica – a transformidade solar – e avaliando os recursos durante a fase de implantação e operação do sistema (SILVA, 2006).

Na avaliação dos recursos renováveis ou não renováveis utilizados por determinado sistema através dos indicadores de energia, o cálculo da pegada ecológica em relação à capacidade de carga do meio permite saber se o sistema utiliza os recursos de maneira sustentável. A pegada ecológica é definida como o impacto que um indivíduo ou uma região produzem utilizar ou desperdiçar recursos com o propósito de desenvolver seus processos; a capacidade de carga é definida como a área do planeta necessária para o fornecimento de recursos renováveis para o sistema (BERGH; VERBRUGGEN, 1999; ZHAO et al., 2005).

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a sustentabilidade energética do processo de uma usina autônoma de álcool através do cálculo de índices de energia, possibilitando analisar a pegada ecológica em relação à capacidade de carga.

## 2 Material e métodos

Os cálculos dos índices de energia, bem como a pegada ecológica de uma usina autônoma de álcool, foram feitos a partir dos dados em energia dos fluxos de material e de energia que participam do sistema da usina autônoma de álcool (Tabela 1).

**Tabela 1.** Avaliação de energia do sistema da usina autônoma.

Fase de implantação	Classe	eMergia Sej/ano
Mudas	R	$6,32 \cdot 10^{16}$
Perda de solo	N	$4,54 \cdot 10^{17}$
Equip. e Infraestrutura	F	$9,76 \cdot 10^{17}$
Aço para construção dos reatores e filtros UASB	F	$1,70 \cdot 10^{14}$
Mão de obra	F	$4,14 \cdot 10^{17}$
<b>Fase de operação</b>		
Precipitação	R	$1,61 \cdot 10^{18}$
Nutrientes (rocha mãe)	R	$8,07 \cdot 10^{16}$
Nitrogênio (atm)	R	$4,82 \cdot 10^{16}$
Água de aquífero	R	$4,82 \cdot 10^{16}$
Insumos	F	$1,86 \cdot 10^{17}$
Defensivos agrícolas	F	$5,31 \cdot 10^{15}$
Mão de obra	F	$1,58 \cdot 10^{18}$
Operações agrícolas	F	$4,08 \cdot 10^{16}$
Manutenção	F	$1,79 \cdot 10^{17}$
Total		$5,63 \cdot 10^{18}$

Fonte: Silva, 2009.

A partir da obtenção dos dados, foram calculados os seguintes índices de Odum (1996):

a) R (renovável): somatória dos valores obtidos dos recursos renováveis do sistema em SEJ (energia solar em joule);

b) F (financeiro): somatória dos valores obtidos dos recursos financeiros em SEJ;

c) N (não renovável): somatória dos valores obtidos dos recursos não renováveis do sistema em SEJ;

d) EYR: indicador de taxa líquida de energia.

$$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{N+R+F}{F}$$

Onde: Y = Energia produzida pelo sistema.

e) EIR: indicador de taxa de investimento.

$$EIR = \frac{F}{N+R}$$

f) ELR: indicador de carga ambiental.

$$ELR = \frac{N+F}{R}$$

g) ESI: indicador de taxa de sustentabilidade.

$$ESI = \frac{EYR}{ELR}$$

h) %R: percentual de renovabilidade.

$$\%R = \left( \frac{R}{Y} \right) \times 100$$

Após os cálculos dos índices de energia, foram calculados os valores para pegada ecológica e capacidade de carga desenvolvidos por Zhao et al. (2005):

a) PE: pegada ecológica do sistema.

$$PE = \frac{(N+F+R_2)}{Em_p / A_p}$$

Onde:

R2 = Renovável, porém utilizado para diluir poluentes

$Em_p$  = Energia do país ( *Brasil* =  $27700 \times 10^{20}$  *Sej* )

$A_p$  = Área do país

b) Cc: capacidade de carga.

$$Cc = \frac{R}{Em_t / A_t}$$

Onde:

$Em_t$  = Energia da terra (  $1,583 \times 10^{25}$  *Sej* )

$A_t$  = Área da terra

d) Cc-PE: Capacidade de carga menos a pegada ecológica.

$$Cc-PE = \frac{A_t}{Em_t} \times \left( R - \frac{g}{y} \times (N+F+R_2) \right)$$

### 3 Resultados e discussão

Silva (2009) estudou a mesma usina abordada por Ometto et al. (2006). Essa usina foi idealizada em uma área de 4.360 ha, dos quais 1.494 ha são utilizados para plantar cana e produzem 40.000 litros de álcool/dia e 27,1 kWh de eletricidade excedente por tonelada de cana utilizando uma caldeira de 67 bar/480° C, operando por 210 dias por ano. A usina avaliada se diferencia das usinas tradicionais por estar associada à criação de gado e suínos em semiconfinamento. De acordo com Silva (2009), para a análise dessa usina foi realizada a participação isolada dos insumos utilizados para a operação, e em seguida um estudo de sua operação em conjunto com a criação de gado e suínos. Os resultados para os índices de energia e pegada ecológica são apresentados a seguir.

O cálculo da taxa líquida de energia obteve o valor de 1,67. De acordo com Ortega (2007) os valores podem variar de 1 a 4. O menor valor corresponde à unidade que acontece quando a contribuição da natureza é menor e significa que a contribuição da natureza é pequena em comparação com os recursos vindos da economia.

O valor obtido para a taxa de investimento foi de 1,49. De acordo com Ortega (2007), este indicador mede o esforço da sociedade para produzir determinado produto em relação à contribuição da natureza. Um valor baixo indica que o ambiente tem uma contribuição alta, reduzindo os custos de mercado.

A carga ambiental foi calculada em 2,13 para o sistema. Este indicador mede a proporção de recursos naturais não renováveis em relação aos renováveis para determinado processo produtivo (SILVA, 2006).

Na análise da taxa de sustentabilidade, os valores maiores indicam sustentabilidade por período maior, e um sistema para ser considerado sustentável por um longo prazo deve ter uma carga ambiental baixa e um alto rendimento emergético (SILVA, 2006).

O resultado para o sistema avaliado neste trabalho obteve o valor de 0,78.

Ortega (2007) observou que a sustentabilidade ecossistêmica-energética das opções químicas é menor que a das opções biológicas. Nas opções biológicas, os recursos provêm de fontes renováveis, condição que favorece sua autonomia. De acordo com a análise econômica, se o governo pudesse apoiar as opções mais sustentáveis, a balança comercial do país poderia ser melhorada em US\$ 2 bilhões por ano.

O percentual de renovabilidade obteve o valor de 31,97. No contexto desta análise, este percentual é definido como a proporção dos recursos renováveis empregada na produção, indicando a sustentabilidade ecológica do sistema (ORTEGA, 2007).

A pegada ecológica calculada para o sistema é de 11838138,63 m<sup>2</sup>, e a capacidade de carga

58071892,61 m<sup>2</sup>. A capacidade de carga é definida como a área do planeta necessária para fornecer recursos renováveis para o sistema e a pegada ecológica é a área da região que corresponde ao fornecimento de recursos não renováveis provenientes da economia ao sistema (ZHAO et al., 2005). O valor obtido da capacidade de carga menos a pegada ecológica, que indica se o sistema está em déficit ou superávit com o planeta (ZHAO et al., 2005), foi de 4,62.10<sup>7</sup> m<sup>2</sup>.

A Tabela 2 resume os resultados dos índices calculados neste trabalho para o sistema de usina autônoma de álcool avaliada.

**Tabela 2.** Resultados obtidos dos índices de energia e pegada ecológica.

Índice de energia	Resultado encontrado
R	1,80.10 <sup>18</sup>
F	3,38128.10 <sup>18</sup>
N	4,54.10 <sup>17</sup>
EYR	1,67
EIR	1,49
ELR	2,13
ESI	0,78
% R	31,97
PE	11838138,63 m <sup>2</sup>
Cc	58071892,61 m <sup>2</sup>
CC-PE	4,62.10 <sup>7</sup> m <sup>2</sup>

Fonte: Elaboração própria.

## 4 Conclusão

Apesar de alguns índices de energia calculados se mostrarem um pouco desfavoráveis, os resultados foram em geral satisfatórios para o sistema de usina autônoma de álcool avaliada.

Os índices de energia e pegada ecológica mostram utilização intensa de recursos antropogênicos no processo. Isso estabelece um percentual de renovabilidade maior do que 10%, patamar acima do proposto pelo acordo de Kyoto. O cálculo da capacidade de carga menos a pegada ecológica indica que houve superávit de 4,62.10<sup>7</sup> m<sup>2</sup>, ou seja, a pegada é menor do que a capacidade de carga. O sistema, portanto, é sustentável nas taxas de utilização que foram avaliadas em relação ao espaço em que a usina se encontra.

Os resultados obtidos neste trabalho, apesar de mostrarem índices de sustentabilidade satisfatórios para o sistema avaliado, ainda são resultados preliminares. Para concluir se o sistema é efetivamente sustentável, é necessário estudá-lo e acompanhá-lo por mais tempo e obter dados comparativos para as diferentes variáveis analisadas neste trabalho. Porém, este trabalho fornece dados que subsidiam pesquisas futuras em energia.

# Analysis of sustainable energy system of autonomous alcohol industry through energy indices and ecological footprint

## Abstract

Conventional assessment of energy use and resources for a production system considers only the value of goods and market services and not the goods and natural services. Due to the need to incorporate ecological parameters for this assessment, the concept of energy arose, which consists of the sum of energy already used, direct or indirectly for the creation of a new product or service. This current work has as an objective of evaluating the energetic sustainability of the process of an autonomous alcohol industry through the calculus of energy indexes, ecological footprint and load capacity. The results obtained show that in spite of the fact that some energy indexes calculated appear to be, to a certain extent, unfavorable; they have been favorable for the system evaluated, indicating that for the rhythm of the resources usage, the ecological footprint of the process in consideration is smaller than the load capacity.

**Key words:** Energetic sustainability. Energy. Ecological footprint. Autonomous alcohol industry.

## Referências bibliográficas

BERGH, J. C. J. M.; VERBRUGGEN, H. Spatial sustainability, trade and indications: evaluation of the "ecological footprint". **Ecological Economics**, v. 29, n. 3, p. 61-72, jun. 1999. Disponível em: <[ftp://131.252.97.79/Transfer/ES\\_Pubs/ESVal/ecol\\_econ\\_general/vandenbergh\\_1999\\_ee\\_29\\_p63.pdf](ftp://131.252.97.79/Transfer/ES_Pubs/ESVal/ecol_econ_general/vandenbergh_1999_ee_29_p63.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2013.

ODUM, E. P. **Fundamentos em ecologia**. São Paulo: Thonsom Learning, 2007.

ODUM, H. T. **Environmental accounting: energy and environmental decision making**. Nova York: John Wiley & Sons, 1996.

OMETTO, Aldo Roberto, RAMOS, Pedro A.R., LOMBARDI, Geraldo et al. Mini-usinas de álcool integradas (MUAI): avaliação energética.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000200024&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200024&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 17 mai. 2013.

ORTEGA, E. A soja no Brasil: modelos de produção, custos, lucros, externalidades, sustentabilidade e políticas públicas. **Cadernos de Agroecologia (Resumos do I Congresso Brasileiro de Agroecologia)**, v. 1, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.aba-agroecologia.org.br/ojs2/index.php/cad/article/view/1637/1477>>. Acesso em: 17 mai. 2013.

SILVA, C. C. **Estudo de caso de sistemas de tratamento de efluentes domésticos com o uso de indicadores ambientais**. 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Paulista, São Paulo.

\_\_\_\_\_. **A atribuição de custos em sistemas energéticos agropecuários: uma análise em energia, termoeconomia e economia**. 156 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

ZHAO, S.; LIB, Z.; LIA, W. A modified method of ecological footprint calculation and its application, ecological modeling. **Ecological Modelling**, v. 185, n. 1, p. 65-75, jun. 2005. Disponível: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380004005964>>. Acesso em: 17 mai. 2013.

## Histórico editorial

Recebido: 03/01/2012

Avaliação e copidesque: 07/01/2012 a 13/06/2013

