

**ANÁLISE EXERGÉTICA DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA DA SOJA**

Fidéllis Bitencourt Gonzaga Louzada e Estanislau

Marina Marques da Silva

Antonella Lombardi Costa

*Universidade Federal de Minas Gerais***RESUMO**

A eminente preocupação com a eficiência dos processos produtivos bem como, a constante busca por combustíveis limpos, aumenta a necessidade de análises termodinâmicas das várias etapas que englobam a produção de matéria-prima para a produção de biocombustíveis dentre os quais destaca-se o biodiesel. O óleo de soja é a principal matéria-prima para a produção do biodiesel sendo responsável por aproximadamente 77% do total. Diante disso, o presente estudo analisou a produção agrícola da soja de acordo com a segunda lei da termodinâmica usando o conceito de exergia. Como resultado, observou-se que a irreversibilidade ou exergia destruída foi de 36% o que pode ser considerado um valor alto de energia ou trabalho que não foi de alguma maneira aproveitado no processo. O resultado da eficiência exergética foi de aproximadamente 19%. Portanto, conclui-se que é necessário um estudo mais detalhado do cultivo da soja a fim de identificar os pontos em que a eficiência possa ser incrementada com o intuito de tornar o sistema de produção do biodiesel de soja mais eficiente e com menos irreversibilidades no processo.

Palavras-chave: exergia, soja, biodiesel, termodinâmica.

**ABSTRACT**

The imminent problem with the efficiency of the production processes as a process of data generation for the production of new technologies of production of samples that encompass a production of raw material for the production of biofuels of those that stand out in biodiesel. Soybean oil is one of the main materials for the production of rye, accounting for 77% of the total. Thus, the present study was designed to analyze soybean according to the law of thermodynamics using the concept of exergy. As a result, observed whether an irreversibility or exergy was 36% of a value that can be considered a high energy value or a work that was not at all. The result of the exergetic efficiency was

approximately 19%. Therefore, we conclude that a more complete soy study is necessary in order to identify the points in which a system is able to increase in order to become the system of production of soybean biodiesel more efficient and with less irreversibilities in the process.

Keywords: exergy, soy, biodiesel, thermodynamics.

## 1. INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva da soja inicia com a produção de sementes, revenda de máquinas, equipamentos, fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas e combustíveis. Após a produção do grão, verificam-se o armazenamento da soja em grãos e a indústria de transformação do grão em óleo e farelo, até o consumo final do produto (GOLLO et al., 2010).

A cultura da soja é alternada com a do milho ou do trigo na maior parte das propriedades. Nas regiões Centro-Oeste e Norte (áreas de Cerrado e floresta Amazônica) a soja é produzida principalmente em grandes propriedades (entre 300 e 50000 hectares) em um sistema de monocultura com uso intensivo de tecnologia e recursos não renováveis externos. Nestas grandes fazendas a média de empregos é mais baixa devido ao alto grau de mecanização das lavouras (SCHLESINGER et al., 2006; CAVALETT, 2008).

Já na região Sul, que é a tradicional região produtora de soja desde a década de 60, a grande maioria das propriedades é pequena (menos de 50 ha) e a produção agrícola é diversificada e administrada por agricultores familiares. Nesta região, alguns produtores já iniciaram a utilizar o manejo orgânico para a produção de soja. No Rio Grande do Sul, um estudo recente coordenado pela Universidade de São Paulo, a pedido do Ministério do Desenvolvimento Agrário, abrangendo o período 1995-2002, aponta que a agricultura familiar ainda era responsável por 58% da soja produzida no estado (SCHLESINGER et al., 2006).

O óleo de soja é a principal matéria-prima para a produção de biodiesel (B100), equivalente a 77,7% do total, com uma alta de 16,6% em relação a 2014. A segunda matéria-prima no ranking de produção das usinas foi a gordura animal (18,8% do total), após aumento de 9,3% em relação a 2014, seguida pelo óleo de algodão (2% do total) e outros materiais graxos com 1,5% de participação (ANP, 2016).

De acordo com Demir (2011) exergia é a quantidade de trabalho obtida quando alguma matéria é trazida a um estado termodinâmico de equilíbrio. À medida que o sistema se aproxima do equilíbrio, a exergia se aproxima de zero.

Nos últimos anos, o método de análise de exergia tem sido amplamente utilizado no projeto, simulação e operação de sistemas

relacionados com a energia e extensa literatura é disponível neste campo.

Em um estudo conduzido por Demir et al. (2009), óleo de algodão éster de metilo foi obtido usando o método de transesterificação de óleos de semente de algodão. No estudo, o desempenho de todo o sistema de biodiesel, juntamente com seus principais componentes, foi avaliado utilizando métodos de análise exergética e de energia.

Talens et al. (2007) sugeriram análise do fluxo de exergia como uma ferramenta de avaliação ambiental para quantificar resíduos e emissões. Eles também determinaram o ciclo de eficiência exergética e compararam a outros tipos de fontes de energia; estas análises são úteis na definição de políticas ambientais e econômicas para utilização dos recursos.

A exergia de cada fluxo de processo é calculada, o que permite identificar as perdas de exergia e áreas de detecção que necessitam de melhoria tecnológica.

Neste estudo, o desempenho do cultivo da soja é avaliado utilizando métodos de análise de exergia.

A análise exergética objetiva identificar onde ocorrem destruição e perda de exergia e classificá-las em ordem de importância, assim, as medidas de análise exergética estimam quanto de exergia está sendo destruída e verificam quais componentes do sistema são responsáveis por perdas, a fim de minimizá-las.

## 2. METODOLOGIA

Para a realização da análise proposta existe a necessidade de uma série de dados quantitativos relacionados ao consumo de insumos e recursos naturais, associados às várias etapas da produção agrícola da soja. É necessário conhecer o consumo anual dos principais materiais, energia, equipamentos, mão-de-obra, serviços, entre outros. O desenvolvimento deste trabalho foi baseado na análise da variação da disponibilidade exergética ocorrida entre os insumos utilizados e os produtos do sistema agrícola.

Sendo assim, foram quantificados e qualificados os fluxos de matéria e exergia envolvidos no mesmo. Os principais serviços e insumos considerados na avaliação desta análise foram: os combustíveis utilizados nas diversas atividades do sistema produtivo (transporte, gradagem, aragem, corte, picagem, ensilagem e demais), os fertilizantes e o calcário; e como produto considerar-se-á a quantidade de massa seca da soja por unidade de área. Foram desconsideradas neste sistema as exergias da luz do sol, da água e de outros insumos naturalmente presentes no local pela sua disponibilidade na natureza e a exergia do trabalho humano, para que seja focada a análise nas

exergias dos insumos utilizados para o cultivo do grão.

Os valores de exergia específica dos componentes foram obtidos de Szargut; Morris; Steward (1988). Alguns insumos são caracterizados por serem misturas de diferentes substâncias como, por exemplo, o superfosfato simples. Portanto, foi considerada a soma das parcelas das diferentes substâncias para a definição da exergia específica de substâncias compostas. Para o cálculo da disponibilidade exérgica da soja baseou-se em Szargut; Morris; Steward (1988) como referência para a determinação da exergia química das partes estruturais desta biomassa, conforme Equação (1).

$$\frac{e^{ch}}{PCI} = \frac{1,0412 + 0,212(Z_{H_2}/Z_C) - 0,249(Z_{O_2}/Z_C)[1 + 0,7884(Z_{H_2}/Z_C)] + 0,045(Z_{N_2}/Z_C)}{[1 - 0,3035(Z_{O_2}/Z_C)]} \quad (1)$$

onde:

$e^{ch}$ : exergia química específica (kJ/kg)

$Z_{H_2}$ : Fração de hidrogênio

$Z_{O_2}$ : Fração de oxigênio

$Z_C$ : Fração de carbono

$Z_N$ : Fração de nitrogênio

PCI: Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)

Considerando a exergia de todos os fluxos que entram e que saem da planta, pode-se fazer o balanço de exergia de acordo com a Equação (2).

$$\sum e_e = \sum e_s \quad (2)$$

onde:

$\sum e_s$ : somatório das exergias que saem (kJ/kg)

$\sum e_e$ : somatório das exergias que entram (kJ/kg)

Os processos encontrados na natureza têm algum grau de irreversibilidade. Somente no plano ideal são possíveis aqueles processos que não geram atrito nem transferência de calor. Nesse sentido, as irreversibilidades para um sistema ou volume de controle podem ser quantificadas por meio de (3):

$$I = \sum_{i=1}^n e_{ei} - \sum_{i=1}^n e_{si} \quad (3)$$

I: Irreversibilidade (kJ/kg)

$e_{si}$ : iésima exergia que sai (kJ/kg)

$e_{ei}$ : iésima exergia que entra (kJ/kg)

A Equação (4) mostra a definição de eficiência, segundo Arredondo, Oliveira Junior e Benjumea (2012), usada para avaliar a produção agrícola da soja.

$$\eta = \frac{\sum e_s}{\sum e_e} \quad (4)$$

Onde:

$\eta$ : Eficiência exergética

$\sum e_s$ : somatório das exergias que saem (kJ/kg)

$\sum e_e$ : somatório das exergias que entram (kJ/kg)

Para a realização da análise exergética da produção agrícola da soja foram levantados os dados de *inputs* e *outputs* do processo. No documento "*Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus*", desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory - NREL (SHEEHAN et al., 1998), são fornecidos importantes dados específicos para a extração de óleo de soja a partir de diversos diagramas de processos detalhados. Este documento foi usado como fonte de dados para o balanço de massa e energia na produção agrícola da soja. Considerou-se a produtividade da soja de 2882,0 kg por hectare para o ano de 2015, conforme dados obtidos do MAPA (2016).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo contabilizou os fluxos de matérias primas necessários em cada subsistema. Na Tabela 1 apresentam-se os fluxos de materiais para o subsistema de produção agrícola de soja. O calcário,

fertilizantes e óleo diesel têm maior entrada neste subsistema, pois juntos representam mais de 90% das matérias primas necessárias para a produção de soja. Outras matérias primas como herbicidas, inseticidas, formicidas e inoculantes têm uma participação mínima, não sendo, por este motivo, consideradas. Considerou-se a produtividade de 2882,00 kg/ha de soja para estimar a quantidade de insumos e subprodutos do sistema de produção agrícola da soja.

Tabela 1 - Balanço de massa e energia da produção agrícola da soja em kg/ha

<b>Entradas</b>		<b>Saídas</b>	
Calcário	277,00	Grão de soja	2882,00
Fertilizantes	177,87	Casca	7,87
Óleo diesel	5,74		
Eletricidade	11,67 (kWh/t)		

Fonte: Adaptado de (SHEEHAN et al., 1998; MAPA, 2016).

Para cálculo da exergia do grão da soja e da casca foram considerados os valores dispostos na Tabela 2 e calculada conforme Equação 1. Foram considerados os seguintes dados da composição da massa da soja e da casca.

Tabela 2 - Composição elementar e poder calorífico da soja e da casca

	<b>ZH<sub>2</sub>(%)</b>	<b>Zo<sub>2</sub>(%)</b>	<b>Zc(%)</b>	<b>ZN(%)</b>	<b>PC(kJ/kg)</b>	<b>e (kJ/kg)</b>
<b>Soja</b>	5,76	52,95	39,27	0,007	13729,27	9579,25
<b>Casca</b>	5,76	52,95	39,27	0,007	14589,61	11988,86
<b>Σ</b>						21568,11

Os cálculos de exergia realizados conforme Equação 1 para a soja e a casca da soja somaram 21568,11 kJ/kg, sendo a parcela de exergia da soja menor, devido a casca apresentar maior poder calorífico.

Os fluxos que não possuem exergia química específica tabelados foram calculados de acordo com os dados apresentados na Tabela 3, já para os fluxos que tratam-se de misturas químicas como o fertilizante, foi considerada a soma das parcelas das diferentes substâncias para a definição da exergia específica de substâncias compostas.

Para o fertilizante considerou-se a proporção de 3% de ureia, 72% de  $P_2O_5$  e 25% de KCl.

A Tabela 3 apresenta os dados dos insumos bem como seus valores exeréticos.

Tabela 3 - Valores exeréticos dos insumos da produção agrícola da soja

	Massa (kg)	Cp (kJ/kg)	T (K)	h (kJ/kg.K)	s (kJ/kg)	eph (kJ/kg)	ech (kJ/kg)	e total (kJ/kg)
<b>Calcário</b>	277,00	0,81	298	119,14	0,04	107,22	24340,00	24447,22
<b>Uréia</b>	5,95	3,40	298	5,70	0,04	6,22	41340,0	41333,78
<b>P2O5</b>	127,94	0,74	298	2,70	0,02	3,26	110,20	106,94
<b>KCL</b>	43,97	1,48	298	14,80	0,04	2,88	2112,25	2115,13
<b>Óleo diesel</b>	5,74	4,19	298	130,31	0,42	5,15	44980,00	44985,15
<b>Σ</b>								112988,20

Na Tabela 4 pode ser observado a síntese dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3 e os resultados obtidos para os cálculos da irreversibilidade e da eficiência da produção agrícola da soja.

Tabela 4 - Síntese da exergia do sistema de produção agrícola da soja

e (kJ/kg)		I (kJ/kg)	η
<b>Saem</b>		<b>91420,11</b>	<b>19,09</b>
Produto (soja)	9579,25		
Subprouto (casca)	11988,86		
<b>Σ (saem)</b>	<b>21568,11</b>		
<b>Entram</b>			
Insumos	112988,20		
<b>Σ (entram)</b>	<b>112988,20</b>		

No Gráfico 1 pode-se visualizar a distribuição da exergia da produção agrícola da soja.

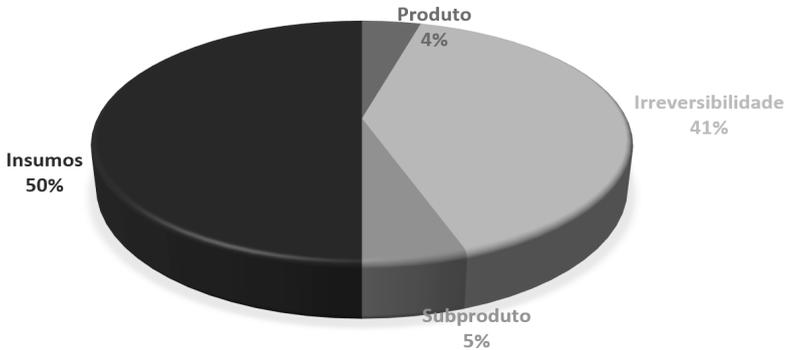


Gráfico 1 - Distribuição da exergia da produção agrícola da soja

Observa-se no Gráfico 1, que a exergia útil foi 4%. No entanto, se considerar o aproveitamento do subproduto, a exergia do sistema passa para 9% .

A irreversibilidade ou exergia destruída foi de 91420,11 kJ/kg e corresponde a 40% da exergia do sistema o que pode ser considerado um valor alto de energia ou trabalho que não foi de alguma maneira aproveitado no processo.

O resultado da eficiência exergética calculado conforme Equação 4 considerou a relação do somatório das exergias que saem do sistema (exergia do produto e subproduto) e o somatório das exergias que entram no sistema (insumos) conforme foi detalhado nas Tabelas 2 e 3 e sintetizados na Tabela 4, a eficiência exergética do sistema de produção agrícola da soja foi de aproximadamente 19%. Estudos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar e comparar a eficiência exergética do biodiesel de soja desde o cultivo do grão até a obtenção do biocombustível, e a exemplo do resultado obtido neste estudo, observou-se que o cultivo do grão e extração do óleo de soja apresentam menor rendimento exergético quando comparado ao refino do óleo de soja e produção do biodiesel (SILVA, 2017).

#### 4. CONCLUSÃO

A análise exergética de processos permite a identificação e a discussão dos aspectos causadores da perda de energia útil em diversos tipos de processos.

Foram usados os princípios da termodinâmica, que permitiram o cálculo das propriedades termodinâmicas para fazer os balanços de massa e exergia para o volume de controle estudado.

Para realizar a análise exergética do cultivo da soja (produção agrícola) foram consultados dados na literatura científica para realizar

o balanço de massa e de energia deste volume de controle, ademais, calcularam-se as exergias específicas dos insumos do processo e as exergias químicas do grão de soja e da casca que é um subproduto. Observou-se que a irreversibilidade do processo foi de 40%, sendo a maior irreversibilidade calculada do sistema de produção do biodiesel de soja. No entanto, a eficiência exergetica do subsistema foi de 19% sendo a menor eficiência obtida, portanto, é necessário que se façam estudos detalhados de como minimizar as perdas de exergia do subsistema de cultivo da soja visto que este é o gargalo do sistema de produção do biodiesel.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em: 18 ago. 2016.

ARREDONDO, H.I.V.; OLIVEIRA JUNIOR, S. de. BEJUMEA, P. Exergy efficiency analysis of chemical and biochemical stages involved in liquid biofuels production processes. *Energy* 41, 2012 p. 138-145.

CAVALLET, O. Análise do Ciclo de Vida da Soja. 221 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo. 2008.

DEMIR.B: 'Construction Of A Small Sized Biodiesel System, Engine Performance Tests, Energetic And Exergetic Evaluation Of The Obtained Cottonseed Oil Methyl Ester., Ph. D. in Solar Energy Institute, Izmir, Turkey, 2009.

DEMIR et al. Exergy assessment of biodiesel production process. *Journal of the Energy Institute*, v. 84 nº 4, 2011.

GOLLO, S.S.; MEDEIROS, J. F.; CRUZ, C. M.L. Configuração da Cadeia Produtiva do Biodiesel a partir da matéria-prima soja, no Rio Grande do Sul/Brasil. *Estrutura, Evolução e Dinâmica dos Sistemas Agroalimentares e Cadeias Agroindustriais*. UPF, Embrapa, Belém, Novembro, 2010.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 02 fev. 2016.

SCHLESINGER, S.; LASCHEFSKI, K.; ASSIS, W.F.T.; RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. 2006. Agronegócio + Agroenergia: Impactos Cumulativos e Tendências Territoriais da Expansão das Monoculturas para a Produção de Bioenergia. Disponível em: [http://boellatinoamerica.org/download\\_pt/Agronegocio\\_e\\_biocombustiveis\\_PORT.pdf](http://boellatinoamerica.org/download_pt/Agronegocio_e_biocombustiveis_PORT.pdf). Acesso em: 05. fev.2016.

SHEEHAN, J. et al. Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus A Joint Study Sponsored by. National Renewable Energy Laboratory US Department of Energy US Department of Agriculture, n. May, p. 300, 1998. Disponível em: <[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=771560](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=771560)>.

SILVA, M. M. Análise Exergética da Produção do Biodiesel por Mistura Binária de Sebo Bovino e Óleo De Soja. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais,2017.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Metallurgical Processes for the Early Twentyfirst Century Vol I, n. IA, p. 332, 1988. Disponível em:<[http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=5782713](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5782713)>.

TALENS, L.G. Villalba and X. Gabarrell: Resour. Conserv. Recycl., 2007, 51, (2), 397–407.

