

Uso da Lógica Fuzzy na avaliação da viabilidade do ciclo de vida do biodiesel

Henrique Leonardo Maranduba¹
Elivaldo Lozer Fracalossi Ribeiro²
Joabe Vieira³
Rosenira Serpa da Cruz⁴
Francisco Bruno Souza Oliveira⁴
José Adolfo de Almeida Neto⁵

Resumo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta promissora para pôr em prática o Pensamento do Ciclo de Vida. Contudo, apresenta algumas limitações, como a alocação de impactos entre produtos e coprodutos, a expansão de fronteiras, categorias de impacto relevantes regionalmente, disponibilização de inventários, subjetividade das escolhas e avaliação integrada da sustentabilidade. Nesse contexto, a Lógica Fuzzy, associada à análise multicriterial, vem sendo apontada como um método com potencial para avaliar de forma objetiva os resultados extraídos de uma ACV, bem como incorporar variáveis técnicas, econômicas e sociais. O objetivo deste trabalho foi utilizar um controlador Fuzzy para avaliar a viabilidade das misturas B7 e B10 sob uma perspectiva ambiental e econômica. Foram consideradas três variáveis de entrada: Potencial de Aquecimento Global, Custo da Principal Matéria-Prima e Demanda Acumulada de Exergia. As funções de pertinência utilizaram funções trapezoidais e triangulares. A base de regras foi construída através da opinião de especialistas. O Sistema de Inferência utilizado para obtenção dos resultados foi o proposto por Mamdani (ou MAX-MIN) e o método de Defuzzificação escolhido foi o Centro de Gravidade. As modelagens deram-se com o apoio dos softwares

1 Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente - PPGDMA / Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC, henrique.leo@gmail.com

2 Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia - PPGMC / UESC

3 Graduando em Engenharia de Produção / UESC

4 Docente pelo Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas - DCET / UESC

5 Docente pelo Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais - DCAA / UESC

SimaPro 8.0 e MATLAB R2013a 8.1.0.604. As perspectivas ambiental e econômica foram construídas utilizando o método AHP. Os resultados mostraram um potencial promissor no uso da Lógica Fuzzy como ferramenta complementar à ACV ambiental na análise da sustentabilidade do ciclo de vida de produtos. Tanto o B7 quanto o B10 apresentaram viabilidades entre “Baixa” e “Alta” na perspectiva ambiental (entre 20% e 80%), e “Muito baixa” na perspectiva econômica (entre 0% e 20%). Quando comparados a cenários B100, os cenários B7 e B10 apresentaram viabilidade ambiental inferior apenas ao melhor caso de produção do biodiesel de dendê e viabilidade econômica inferior aos três cenários de produção de biodiesel de algodão e ao melhor cenário de produção do biodiesel de dendê.

Palavras-chave: *AHP. Análise Multicriterial. Biocombustíveis. Avaliação do Ciclo de Vida. Análise de Incerteza.*

Introdução

O Pensamento do Ciclo de Vida (*Life Cycle Thinking*) é um conceito existente dentro da gestão ambiental, que tem por objetivo avaliar sistemicamente os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pelo ciclo de vida de um produto ou serviço, isto é todas as fases desde a extração das matérias-primas até o descarte final (BENOÎT; MAZIJIN, 2009; FINKBEINER et al., 2014; KLÖPFFER, 2014).

A Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) tem como meta avaliar de modo integrado o ciclo de vida de um produto sob as perspectivas ambiental, social e econômica, possibilitando informações relevantes para os tomadores de decisão (KLÖPFFER, 2014).

Contudo, essa integração vem enfrentando desafios na prática, haja vista que cada perspectiva de avaliação é realizada de forma separada, não existindo um método consolidado que permita, de forma objetivamente, uma comunicação entre os resultados. Além disso, cada avaliação possui, por si só, limitantes e lacunas que ainda necessitam de soluções (FINKBEINER et al., 2014; GUINÉE et al., 2011; KLÖPFFER, 2014; LIFE CYCLE INITIATIVE, 2013; LIU; ZHANG, 2013).

Quando o objetivo de um estudo é avaliar a sustentabilidade, o desempenho ou mesmo a viabilidade do ciclo de vida de um produto por meio de um indicador único de impacto, surge um fator limitante: a subjetividade na agregação dos resultados por categoria de impacto e consequentemente das conclusões. Nesse contexto, critérios alternativos que melhor tratem a subjetividade têm sido propostos, sendo a Lógica Fuzzy o método apontado como aquele com forte potencial para avaliar de forma integrada e objetiva variáveis técnicas, ambientais, econômicas e/ou sociais (AGARSKI et al., 2015; CHAN; WANG; RAFFONI, 2014; SABAGHI et al., 2016; WANG; CHAN; LI, 2015).

Desenvolvida por Lofti A. Zadeh na década de 1960 (ZADEH, 1965), a Lógica Fuzzy (também chamada de lógica nebulosa ou difusa) é tida como uma das melhores ferramentas para o desenvolvimento de sistemas de controle de processos incertos, como a medicina, as engenharias e as ciências ambientais (SABAGHI et al., 2016). Criada para ser uma extensão da lógica convencional (clássica), a Lógica Fuzzy utiliza-se da ideia de “verdade parcial” para modelar fielmente dados imprecisos, fazendo com que os sistemas lógicos trabalhem com informações mais próximas da realidade (BECAERT et al., 2006; BENETTO; DUJET; ROUSSEAU, 2008).

Em termos conceituais, a lógica convencional está baseada em dois princípios: o princípio da “não contradição” e do “terceiro excluído”. De acordo com o princípio da “não contradição”, dada uma proposição qualquer p , temos que: se p é verdadeira, então a negação de p ($\neg p$) é falsa, e vice-versa. Já de acordo com o princípio do “terceiro excluído”, dada uma proposição qualquer p : ou p é verdadeira, ou sua negação ($\neg p$) é verdadeira, não existindo uma terceira opção. Esses dois princípios sintetizam a objetividade da lógica clássica, deixando clara a inadequação dela para tratar sistemas complexos e não lineares da realidade (RIBEIRO, 2016).

Na lógica clássica, dado um conjunto A qualquer e um elemento x , pode-se afirmar que x pertence à A ($x \in A$) ou que x não pertence à A ($x \notin A$). Porém,

existem inúmeros problemas na prática em que essa relação de pertinência não se dá de forma direta. Por exemplo, suponha um conjunto $B = \{ y \mid y \text{ é próximo de } 0 \}$, com B contido no conjunto dos números reais ($B \subset R$). A partir dessa premissa, se $y_1 = 0,01$, y_1 pertence à B ($y_1 \in B$)? Entre tanto, se $y_2 = 0,9$, y_2 pertence à B ($y_2 \in B$)? (RIBEIRO, 2016).

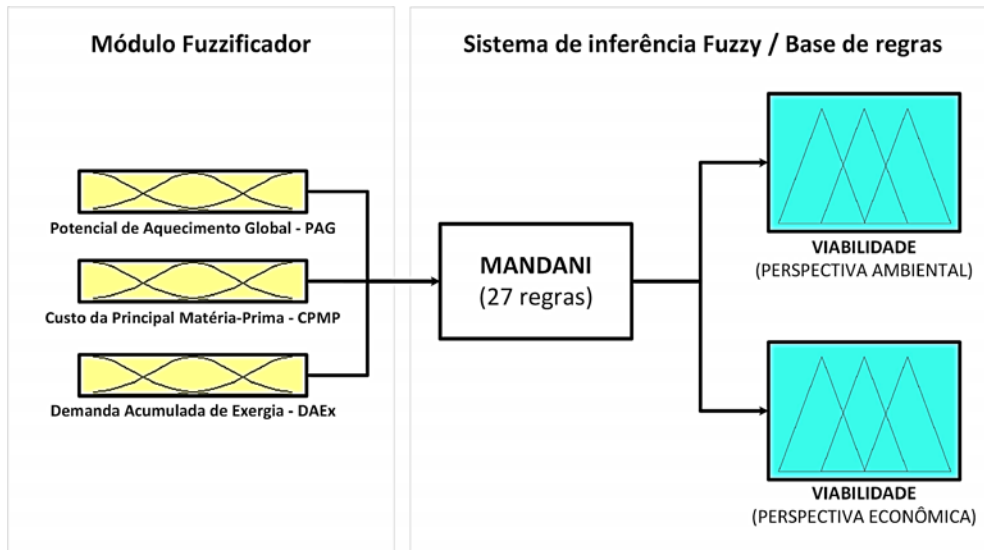
Como as respostas dessas pertinências apresentam certo grau de subjetividade, ficam claras as limitações da lógica clássica em tratar as incertezas das informações, justificando o uso da Lógica Fuzzy como alternativa para associar as imprecisões dos níveis de “pertencimento” de um elemento a um conjunto. Em outras palavras, com a utilização da Lógica Fuzzy é possível dizer que $y_1, y_2 \in B$ com diferentes graus de pertinência (RIBEIRO, 2016).

O objetivo deste trabalho foi utilizar o controlador Fuzzy desenvolvido por Ribeiro (2016) para avaliar a viabilidade do ciclo de vida do biodiesel produzido no Brasil, considerando dois cenários de mistura: B7 (7% de biodiesel e 93% de diesel fóssil) e B10 (10% de biodiesel e 90% de diesel fóssil). O controlador é composto por três variáveis de entrada (Potencial de Aquecimento Global - PAG, Custo da Principal Matéria-Prima - CPMP e Demanda Acumulada de Exergia - DAEx) e duas variáveis de saída (Viabilidade ambiental e Viabilidade econômica), sendo que a primeira avalia a viabilidade do biodiesel sob uma perspectiva ambiental e a segunda sob uma perspectiva econômica.

Materiais e métodos

Para modelar as ações do sistema, um controlador Fuzzy composto por um módulo fuzzificador, um sistema de inferência e uma base de regras foi desenvolvido (figura 1).

Figura 1 – Sistematização simplificada do controlador Fuzzy utilizado (RIBEIRO, 2016)



O módulo fuzzificador é composto por três variáveis de entrada, sendo uma variável relacionada às questões ambientais (PAG), uma relacionada às questões econômicas (CPMP) e outra relacionada às questões energéticas (DAEx) e duas variáveis de saída: viabilidade – perspectiva ambiental e viabilidade – perspectiva econômica. As variáveis de entrada foram classificadas como “baixo(a)”, “médio(a)” e “alto(a)”, e as variáveis de saída como “muito baixa”, “baixa, média”, “alta” e “muito alta”. As funções de pertinência utilizaram funções lineares trapezoidais e triangulares. A base de regras foi construída utilizando a opinião de especialistas, por meio de premissas do tipo “SE <entrada 1> E <entrada 2> E <entrada 3> ENTÃO <saída 1 ou saída 2>”.

O sistema de inferência utilizado para obtenção dos resultados foi o proposto por Mamdani (ou MAX-MIN) e o método de defuzzificação escolhido

foi o centro de gravidade. A modelagem do controlador foi realizada com o apoio do software MATLAB® (versão R2013a 8.1.0.604), desenvolvido pela MathWorks, Inc, e do complemento Fuzzy Logical Toolbox®. Para criar a base de regras para as variáveis propostas, foi utilizada uma comparação par a par entre as variáveis de entrada (método AHP), visando ponderar o grau de importância de uma variável em relação à outra, em que o grau considerou dois cenários de importância: ambiental (viabilidade ambiental) e econômica (viabilidade econômica). Os pesos das entradas para cada uma das saídas modeladas podem ser visualizados na tabela 1:

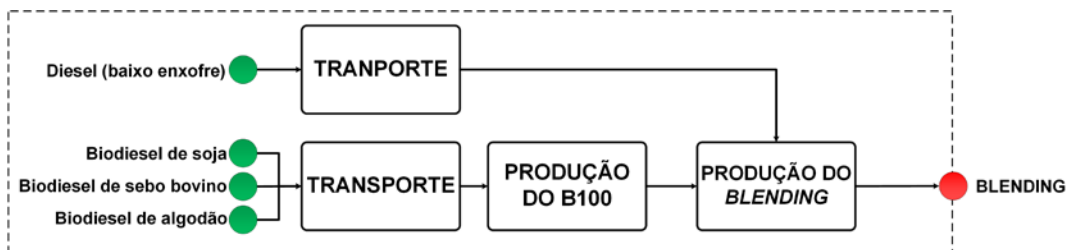
Tabela 1 – Descrição das variáveis de entrada em cada uma das perspectivas avaliadas (RIBEIRO, 2016)

Variáveis de entrada	PESO Perspectiva ambiental	PESO Perspectiva econômica
Potencial de Aquecimento Global – PAG (kg CO ₂ -eq/kg)	0,60	0,26
Custo da Principal Matéria-Prima – CPMP (R\$/kg)	0,20	0,64
Demanda Acumulada de Exergia – DAEx (MJ-eq/kg)	0,20	0,11

A variável CPMP foi obtida das cotações referentes ao mês de março de 2016, no *website* Biomercado. Já as variáveis PAG e DAEx foram obtidas a partir de um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), sob a perspectiva atribucional (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006), avaliando dois cenários de produção da mistura (*blend*) biodiesel-diesel, sendo que para a categoria Potencial de Aquecimento Global (PAG) foi utilizado o método ReCiPe *Midpoint* (H) (GOEDKOOP et al., 2009) e para a Demanda Acumulada de Exergia (DExA) o método Cumulative Exergy Demand - CExD (BÖSCH et al., 2007). A unidade funcional adotada foi uma tonelada de biodiesel (B7 e B10). A modelagem foi realizada com o apoio do software SimaPro® 8.0.1 e da base de dados ecoinvent 3.0. A fronteira do estudo foi definida como sendo “berço ao portão”, ou seja, contabilizando os

impactos desde a produção das matérias-primas até a produção do *blend* na refinaria (figura 2), (BIOMERCADO, 2016; ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

Figura 2 – Fluxograma simplificado do sistema de produção do blend considerado neste estudo



¹ Inventário do Diesel: (SUGAWARA, 2012);

² Inventário do biodiesel de soja: óleo de soja (ROCHA, 2011) e transesterificação (MARANDUBA et al., 2016);

³ Inventário do biodiesel de Sebo Bovino: (CUNHA, 2008);

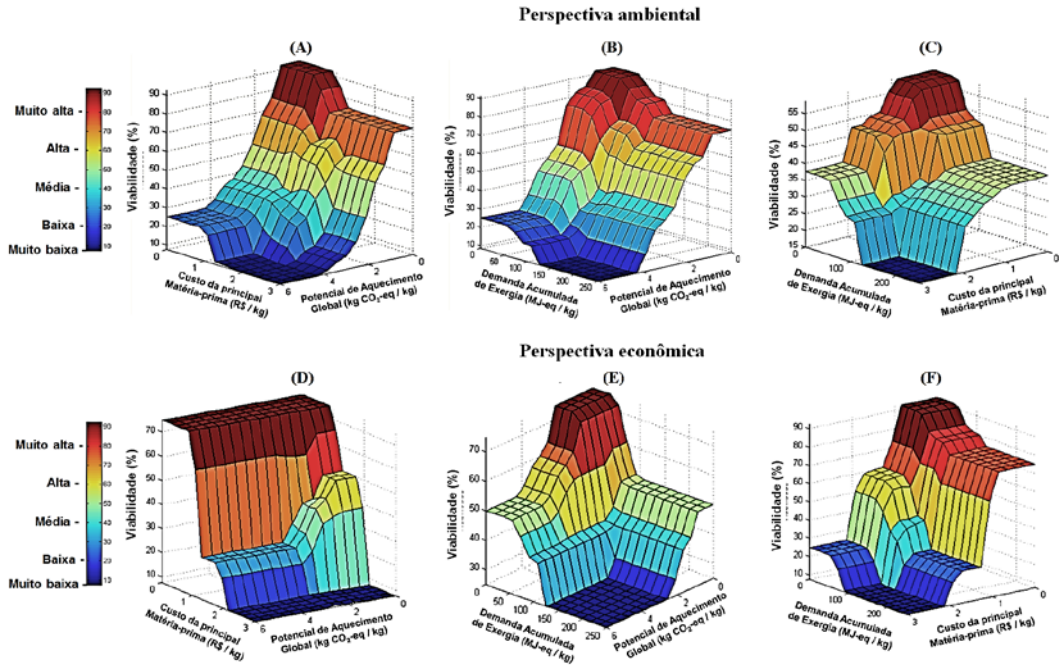
⁴ Inventário do biodiesel de algodão: ecoinvent versão 3 (WERNET et al., 2016);

Resultados e discussão

Os resultados deste trabalho foram divididos em duas vertentes: a descrição do controlador Fuzzy e o comportamento das variáveis de saída considerando os combustíveis B7, B10, B100 de soja, B100 de sebo bovino, B100 de algodão e B100 de dendê.

A primeira vertente apresenta as correlações entre as entradas e as saídas do controlador considerando a base de regras e as ponderações estabelecidas para cada perspectiva (figura 3).

Figura 3 – Superfícies correlacionando as variáveis de entrada com as variáveis de saída, tanto na perspectiva ambiental quanto na econômica (RIBEIRO, 2016)



A figura 3 mostra 6 superfícies tridimensionais, onde o eixo Y corresponde à variável de saída (viabilidade, em %), e os eixos X e Z correspondem a duas variáveis de entrada. As superfícies A (CPMP x PAG), B (DAEx x PAG) e C (DAEx x CPMP) referem-se à perspectiva ambiental, enquanto as superfícies D (CPMP x PAG), E (DAEx x PAG) e F (DAEx x CPMP) referem-se à econômica.

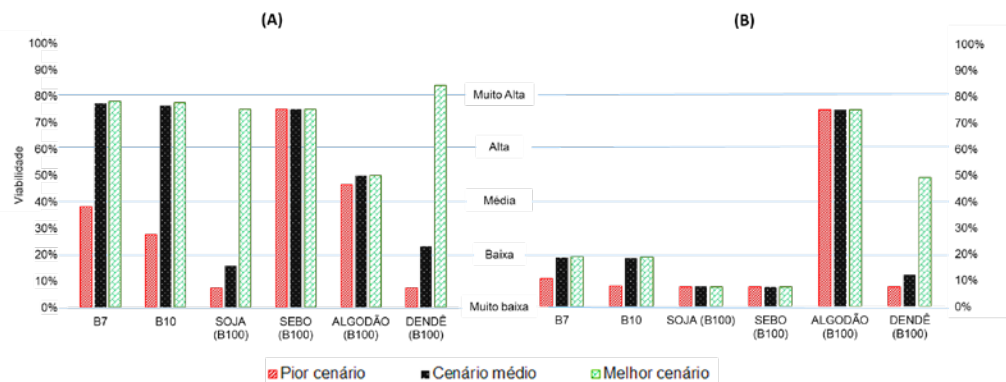
Na superfície A, a viabilidade mostra-se próximo de 0% (muito baixa) para os valores de PAG acima de 4 kg de CO₂-eq e acima de R\$ 1,50/kg para CPMP. A viabilidade acima de 60% (alta) é alcançada apenas quando os valores do PAG se situaram abaixo de ~1,7 kg de CO₂-eq/kg. A superfície B mostrou um comportamento semelhante à A, e a viabilidade mostra-se próxima de 0% (muito baixa) para os valores de PAG acima de 4 kg de CO₂-eq/kg e valores acima de 130 MJ-eq/kg para DAEx. Já a superfície C apresentou tendência pior para a viabilidade, alcançando o valor máximo próximo de 60% (alta) apenas

para valores de CPMP menores que R\$ 1,00/kg e DAEx abaixo de 50 MJ-eq/kg.

Já nas superfícies de avaliação sob a perspectiva econômica, a variável CPMP em função do seu peso, é determinante na viabilidade do biodiesel. Portanto, nas superfícies D e F, a viabilidade do biodiesel é superior a 60% (alta) para valores de CPMP abaixo de R\$ 1,00/kg, independentemente dos valores assumidos pelas variáveis PAG (na superfície D) e DAEx (superfície F). A superfície E mostrou viabilidade acima de 60% (alta) apenas quando os valores estão abaixo de 100 MJ-eq/kg para a variável DAEx e de 2 kg de CO₂-eq/kg para a PAG.

A segunda vertente refere-se ao teste do modelo, utilizando os valores de PAG, DAEx e CPMP dos combustíveis escolhidos. Para testar o controlador Fuzzy, foram propostos três cenários para cada um dos biocombustíveis: cenário médio, melhor e pior cenário das variáveis (utilizando o desvio padrão de cada variável) (figura 4).

Figura 4 – Comparativo de viabilidade sob a perspectiva ambiental (A) e econômica (B), dos cenários prospectivos de mistura B7, B10 e B100 (soja, sebo bovino, algodão e dendê) calculados pelo controlador Fuzzy



Os melhores e piores cenários foram obtidos a partir dos desvios padrões das variáveis de entrada.

Com relação à viabilidade sob a perspectiva ambiental (A), o biodiesel B7 e o B10 comportaram-se de forma semelhante, atingindo viabilidade “baixa”

no pior cenário (entre 20% e 40%) e “alta” (60% e 80%) tanto no cenário base quanto no melhor cenário. A soja obteve viabilidade “muito baixa” (entre 0% e 20%) tanto no pior cenário quanto no cenário base, e viabilidade “alta” (entre 60% e 80%) no melhor cenário. O sebo bovino apresentou uma viabilidade “alta” para os três cenários. O algodão, a exemplo do sebo, também apresentou a mesma viabilidade para todos os cenários, neste caso, “média”. O dendê apresentou viabilidade “muito baixa” no pior cenário, “baixa” no cenário base e viabilidade “muito alta” (entre 80% e 100%) no melhor cenário de produção.

No que diz respeito à perspectiva econômica, o biodiesel B7, B10, soja e sebo apresentaram viabilidade “muito baixa” em todos os cenários avaliados. O algodão apresentou comportamento bastante similar ao sebo na perspectiva ambiental, em todos os cenários; o biodiesel de algodão revelou viabilidade econômica “alta” de produção. Já o dendê mostrou viabilidade “muito baixa” tanto para o pior cenário quanto para o cenário base; já para o melhor cenário, o dendê expressou viabilidade econômica “média”.

Considerações finais

O uso da Lógica Fuzzy, associada ao método AHP, possibilitou agregar categorias de impacto e perspectivas de avaliação que são, geralmente, analisadas isoladamente (ambiental e econômica), possibilitando um tratamento mais sistêmico da sustentabilidade do biodiesel, considerando incertezas e a influência de diferentes variáveis.

Os cenários de produção B7 e B10 mostraram um comportamento semelhante entre si, permitindo diagnosticar não apenas o potencial ambiental desse biocombustível como alternativa complementar do diesel fóssil (viabilidade próxima de “muito alta”, com exceção do pior cenário), mas também sua atual inviabilidade econômica (viabilidade “muito baixa” em todos os cenários), confirmada na prática pelos atuais subsídios governamentais.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro através de bolsa nível doutorado, e ao Grupo Bioenergia e Meio Ambiente (BioMA) da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) pela disponibilidade técnica e de infraestrutura.

Referências

AGARSKI, B. et al. Fuzzy multi-criteria-based impact category weighting in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 3256–3266, 2015.

BECAERT, V. et al. Fuzzy Life Cycle Evaluation: A Tool to Interpret Qualitative Information in Streamlined LCA. *Anais... 13th International Conference on Life Cycle Engineering*, p. 155–160, 2006.

BENETTO, E.; DUJET, C.; ROUSSEAU, P. Environmental Modelling & Software Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment. v. 23, p. 1461–1467, 2008.

BENOÎT, C.; MAZIJIN, B. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. United Nations Environment Programme - UNEP. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1164xPA-guidelines_sLCA.pdf>.

BIOMERCADO. Biomercado - Cotações. Disponível em: <<http://www.biomercado.com.br/cotacoes.php>>. Acesso em: 9 abr. 2016.

BÖSCH, M. E. et al. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to theecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 3, p. 181–190, 2007.

CHAN, H. K.; WANG, X.; RAFFONI, A. An integrated approach for green design: Life-cycle, fuzzy AHP and environmental management accounting. *The British Accounting Review*, v. 46, n. 4, p. 344–360, 2014.

CUNHA, J. T. DA. Inventário do ciclo de vida do Biodiesel de sebo bovino e de soja e de óleo diesel de petróleo para o uso em ônibus urbanos na cidade de São Paulo / SP. [s.l.] Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2008.

FINKBEINER, M. et al. Challenges in Life Cycle Assessment: An Overview of Current Gaps and Research Needs. In: KLÖPPFER, W. (Ed.). . *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 207–258.

- GOEDKOOPE, M. et al. ReCiPe 2008. 2009.
- GUINÉE, J. B. et al. Life cycle assessment: past, present, and future. *Environmental science & technology*, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011.
- ISO 14040. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework,. p. 28, 2006.
- ISO 14044. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines,. p. 54, 2006.
- KLÖPPFER, W. (ED.). Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- LIFE CYCLE INITIATIVE. What is Life Cycle Thinking? Disponível em: <<http://www.lifecycleinitiative.org>>. Acesso em: 12 fev. 2015.
- LIU, F.; ZHANG, H. Novel methods to assess environmental, economic, and social sustainability of main agricultural regions in China. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, n. 3, p. 621–633, 25 jan. 2013.
- MARANDUBA, H. L. et al. Improving the energy balance of microalgae biodiesel: Synergy with an autonomous sugarcane ethanol distillery. *Energy*, v. 115, p. 888–895, 2016.
- RIBEIRO, E. L. F. Modelagem Computacional de um Sistema Dinâmico-Fuzzy para Análise de Viabilidade: Um Estudo de Caso do Biodiesel a partir do Óleo de Pinhão Manso. [s.l.] Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC, 2016.
- ROCHA, T. B. Harmonização de inventários de ciclo de vida de biocombustíveis do Brasil. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2011.
- SABAGHI, M. et al. Sustainability assessment using fuzzy-inference technique (SAFT): A methodology toward green products. *Expert Systems with Applications*, v. 56, p. 69–79, set. 2016.
- SUGAWARA, E. T. Comparação dos desempenhos ambientais do b5 etílico de soja e do óleo diesel, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). [s.l.] Universidade de São Paulo - USP, 2012.
- WANG, X.; CHAN, H. K.; LI, D. A case study of an integrated fuzzy methodology for green product development. *European Journal of Operational Research*, v. 241, n. 1, p. 212–223, 2015.
- WERNET, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.
- ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.