

## Avaliação de Tecnologias Logísticas e Químicas na produção de Etanol de Segunda Geração aplicando Lógica *Fuzzy*

Luis Gustavo R. Pinhas<sup>1</sup>, Denilson P. Souza dos Santos<sup>2</sup>, Lucas D. Del Rosso Calache<sup>3</sup>  
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Câmpus São João da Boa Vista, SP

O etanol de segunda geração, também denominado etanol celulósico, constitui um tipo de biocombustível que se distingue pela sua origem em matéria-prima lignocelulósica. Sua obtenção desdobra-se em uma sequência bem definida de etapas, cada qual com sua própria especificidade e relevância [1] [5]. Sob a ótica econômica, os custos associados à produção de etanol de segunda geração permanecem consideravelmente elevados em comparação com outras fontes de energia, como o etanol de primeira geração, o que limita a competitividade do produto no mercado atual [2] [5]. Apesar do reconhecimento consolidado da tecnologia de produção de etanol de segunda geração na literatura, ela ainda está em um estágio de desenvolvimento e não atingiu sua plena maturidade [5] [2]. Isso implica incertezas e riscos para os investidores, que precisam considerar não apenas os desafios técnicos, mas também os desafios econômicos e regulatórios associados a essa indústria em evolução. Na literatura, é possível observar a presença de lacunas no desenvolvimento de modelos de avaliação capazes de analisar os impactos de cada procedimento logístico e químico envolvidos na obtenção e na gestão da qualidade do produto. Essas análises devem considerar diversas dimensões relacionadas ao processo de produção, incluindo não apenas a viabilidade econômica, mas também outros aspectos, como eficiência agrícola e impacto ambiental. Para lidar com esse desafio, diferentes abordagens de apoio à tomada de decisão podem ser aplicadas em cada uma das etapas do processo de avaliação.

Os Métodos de Estruturação de Problemas (PSM) são abordagens especializadas na resolução de desafios complexos por meio da compreensão, modelagem e mapeamento das características do problema em questão [6] [3]. Os PSMs são comumente aplicados para lidar com múltiplos interesses de diversos decisores e para uma abordagem transparente da problemática, buscando o consenso entre os tomadores de decisão envolvidos [6] [3]. Paralelamente, observa-se a teoria dos conjuntos *fuzzy*, que objetiva modelar problemas e derivar possíveis soluções ao atribuir graus de pertinência a valores em conjuntos de dados específicos, expandindo a concepção binária de pertencimento dos conjuntos e possibilitando lidar com subjetividades [7]. Essa atribuição de pertinência é quantificada por meio de funções variadas que oscilam entre os valores de 0 e 1 ( $\mu(x)$ ), indicando o grau de relevância do elemento no conjunto [7].

Uma técnica amplamente adotada na literatura para auxiliar em decisões multicritério é o fuzzy QFD (*Quality Function Deployment*). A técnica é especialmente útil em situações em que não há dados numéricos precisos para avaliar as opções, utilizando informações linguísticas fornecidas por tomadores de decisão, tendo a capacidade de lidar com um grande número de critérios e alternativas [4]. Ademais, o fuzzy QFD proporciona uma análise abrangente por meio de critérios definidos e utilizando cálculos de forma simplificada [4], emergindo, portanto, como uma ferramenta aplicável na avaliação das dimensões relacionadas ao processo de produção do etanol de segunda geração em seus diversos âmbitos tecnológicos.

---

<sup>1</sup>luis.pinhas@unesp.br

<sup>2</sup>denilson.santos@unesp.br

<sup>3</sup>lucas.calache@unesp.br

Nosso modelo de apoio à tomada de decisão baseia-se no estudo apresentado por Junior et al. [4], considerando a multiplicidade de critérios. O método conformado para avaliação envolve a produção de uma matriz *what* (o que) e *how* (como). A *what* é baseada nas variáveis linguísticas fornecidas por tomadores de decisão ao avaliar os diferentes aspectos de qualidade e sustentabilidade, bem como a aplicação das tecnologias químicas através da escala Likert, sendo a posteriori atribuído peso a essas decisões conforme a somatória das qualidades que devem fazer parte do produto final segundo o inventariado teórico de especialistas. Em seguida, são definidos os critérios que serão utilizados para avaliar as alternativas em relação a esses requisitos e atribuído pesos conforme a associação da área do tomador de decisão e o critério avaliado. Os fatores de avaliação identificados são ponderados de acordo com sua importância atribuída por especialistas. Após esse processo, a matriz *how* é gerada, consistindo na avaliação dos critérios estabelecidos na etapa anterior, utilizando as variáveis linguísticas das opiniões de especialistas conforme os pesos atribuídos. Os valores obtidos fornecem um *ranking* de impacto dos ordenamentos logísticos e das tecnologias químicas em cada uma das áreas propostas a serem avaliadas para a obtenção do produto final, concatenando na rota preferencial de produção, além de promover uma compreensão de como cada ordenamento químico e logístico afetam a obtenção do produto em suas múltiplas áreas avaliadas, como a gestão de condições agrícolas e logísticas.

Ao integrar de forma sinérgica os Métodos de Estruturação de Problemas com os conjuntos *fuzzy* no *framework QFD*, é possível adotar uma abordagem abrangente para analisar os aspectos logísticos e químicos associados à produção de etanol de segunda geração, considerando a opinião de especialistas. Essa integração oferece *insights* para otimizar os processos de produção, identificar oportunidades de melhoria e mitigar os impactos negativos. Além disso, espera-se promover uma compreensão acerca dos impactos associados à escolha do ordenamento logístico e químico na indústria, que atualmente é identificada por grande parte da literatura como "ineficaz", contribuindo, assim, para o avanço sustentável e eficiente da engenharia de biocombustíveis.

## Referências

- [1] V. D. Bastos. "Etanol, alcoolquímica e biorrefinarias". Em: **BNDES Setorial** (2007).
- [2] M. Broda, D. J. Yelle e K. Serwańska. "Bioethanol production from lignocellulosic biomass challenges and solutions". Em: **Molecules** 27.24 (dez. de 2022), p. 8717. DOI: 10.3390/molecules27248717.
- [3] S. I. Gass e C. M. Harris. **Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. Kluwer Academic, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7>.
- [4] F. R. L. Junior, L. F. Ferreira, A. P. Selegim e L. C. Carpinetti. "Um Modelo Fuzzy-qfd para priorização de ações de gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos". Em: **Revista Produção Online** 18.2 (jun. de 2018), pp. 713–742. DOI: 10.14488/1676-1901.v18i2.2958.
- [5] S. E. S. Rosa e J. L. F. Garcia. "O etanol de segunda geração: limites e oportunidades". Em: **Revista do BNDES** 32 (2009).
- [6] J. Rosenhead. "What's the problem? an introduction to problem structuring methods". Em: **Interfaces** 26.6 (dez. de 1996), pp. 117–131. DOI: 10.1287/inte.26.6.117.
- [7] L.A. Zadeh. "Fuzzy sets". Em: **Information and Control** 8.3 (jun. de 1965), pp. 338–353. DOI: 10.1016/s0019-9958(65)90241-x.