

Uma abordagem de dinâmica de sistemas para a avaliação do biodiesel: uma revisão bibliométrica

A system dynamics approach for biodiesel evaluation: a bibliometric review

Un enfoque de dinámica de sistemas para la evaluación del biodiesel: una revisión bibliométrica

Najara Barros Dias Torres

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8498-761X>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: najaradias15@hotmail.com

Gisele de Lorena Diniz Chaves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6359-9063>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: gisele.chaves@ufes.br

Rodrigo Randow de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0170-6892>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: digorandow@gmail.com

Recebido: 13/07/2018 – Aceito: 27/08/2018

Resumo

As pesquisas atuais têm demonstrado um interesse em alternativas renováveis em relação a fonte primária contemporânea: o petróleo. O biodiesel vem ganhando cada vez mais importância como um combustível atraente devido a esse esgotamento dos recursos de combustível fóssil, que por sua vez liberam gases causadores do efeito estufa na atmosfera. Dessa forma, o trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliométrica, envolvendo a abordagem de dinâmica de sistemas para avaliação do biodiesel. Realizou-se assim, uma análise quantitativa dos artigos encontrados na base *Web of Science*, seguida de uma análise qualitativa, examinando, com os vários trabalhos analisados, a importância do estudo de dinâmicas de sistemas na avaliação de cenário para estudo de política e desenvolvimento tecnológico energético e renovável.

Palavras-chave: biodiesel; tecnologia; dinâmica de sistemas.

Abstract

Current research has shown an interest in renewable alternatives to the contemporary primary source: oil. Biodiesel has been gaining increasing importance as an attractive fuel due to this depletion of fossil fuel resources, which in turn release greenhouse gases into the atmosphere. Thus, the objective of this work was to carry out a bibliometric review, involving the systems dynamics approach for biodiesel evaluation. A quantitative analysis of the articles found in the Web of Science database was carried out, followed by a qualitative analysis, examining the importance of the study of systems dynamics in the evaluation of the scenario for the study of policy and technological development renewable energy.

Keywords: biodiesel, technology, systems dynamics.

Resumen

Las investigaciones actuales han demostrado un interés en alternativas renovables en relación a la fuente primaria contemporánea: el petróleo. El biodiésel viene ganando cada vez más importancia como un combustible atractivo debido a ese agotamiento de los recursos de combustible fósil, que a su vez liberan gases causantes del efecto invernadero en la atmósfera. De esta forma, el trabajo tuvo como objetivo realizar una revisión bibliométrica, involucrando el abordaje de dinámica de sistemas para evaluación del biodiesel. Se realizó un análisis cuantitativo de los artículos encontrados en la base Web of Science, seguida de un análisis cualitativo, examinando, con los diversos trabajos analizados, la importancia del estudio de dinámicas de sistemas en la evaluación de escenario para estudio de política y desarrollo tecnológico energético y renovable.

Palabras clave: biodiesel; la tecnología; dinámica de sistemas.

1. Introdução

Fontes de energia renováveis e que não representem ameaça ao meio ambiente, tornam-se um problema de cunho desafiador enfrentado pela humanidade. As questões associadas estão relacionadas ao desenvolvimento econômico, qualidade de vida e estabilidade global (MATA *et al.*, 2010).

A fonte de energia primária atual, o petróleo, é finito (CHIA *et al.*, 2018). Desta forma, novas opções em fontes de energia estão sendo estudadas para que haja menor dependência dessa energia que possui alta depleção. O biodiesel vem ganhando cada vez mais importância como

um combustível atraente devido a esse esgotamento dos recursos de combustível fóssil (MEHER; SAGAR; MAIK, 2006).

Esse combustível é biodegradável e não tóxico e possui baixos perfis de emissões quando comparado ao diesel de petróleo. O biodiesel é derivado de triglicerídeos por transesterificação com metanol e atraiu considerável atenção durante os últimos anos (MEHER; SAGAR; MAIK, 2006). Em função disso, muitos estudos foram desenvolvidos de forma a propor técnicas para sua obtenção. Muitas tecnologias foram desenvolvidas com diferentes custos, eficiências, vantagens e restrições, que variam em função de matéria-prima, incentivos e regulamentações de diferentes países.

Portanto, nem sempre é fácil avaliar todos estes elementos na decisão de escolha de tecnologias mais adequadas. A dinâmica de sistemas é um método que pode auxiliar nesta tomada de decisão e tem sido utilizada em várias áreas. O modelo de dinâmica de sistemas é demonstrado na avaliação dos efeitos do desenvolvimento do biodiesel em indicadores pré-estabelecidos. Recentemente, vários estudos utilizaram a dinâmica de sistemas para analisar questões relacionadas a energias renováveis e alternativas (TESCH; DESCAMPS; WEILER; 2003).

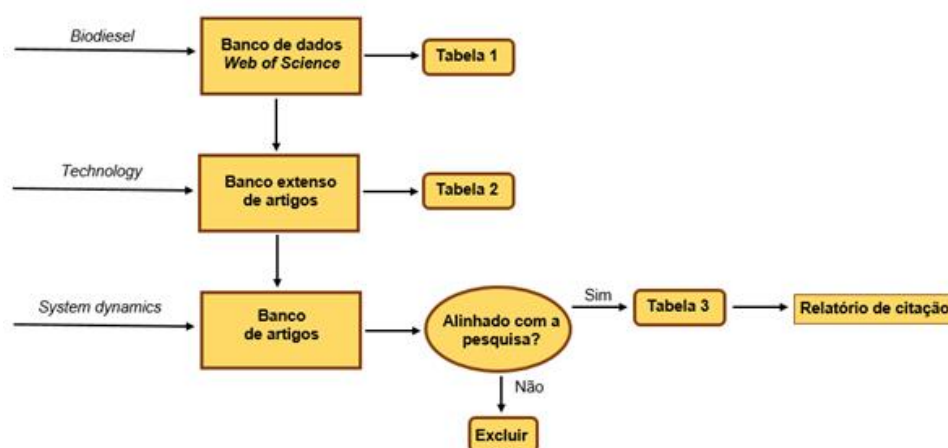
Dessa forma, o trabalho teve como intuito principal realizar uma revisão bibliométrica sobre biodiesel, tecnologias envolvidas e dinâmica de sistemas, trazendo, principalmente, um panorama dos avanços envolvendo modelagem para avaliação de utilização de biodiesel. Este objetivo foi buscado com o auxílio da bibliometria, uma ferramenta estatística que permite mapear e gerar diferentes indicadores de tratamento e gestão da informação e do conhecimento (LIMA; PORTO; FREITAS, 2018).

2. Metodologia

A fim de atingir o objetivo, realizou-se uma revisão bibliométrica na base de dados obtida na plataforma *Web of Science*. Inicialmente, a pesquisa de caráter exploratório consistiu em um busca por trabalhos que tivessem em seu título a palavra em inglês *biodiesel*, entre os anos 1945-2018, conforme Figura 1.

Posteriormente, visando um melhor refinamento de artigos, foram inseridas as palavras em inglês *technology* e *system dynamics*, mantendo o período de pesquisa.

Figura 1- Fluxograma para refinamento de artigos



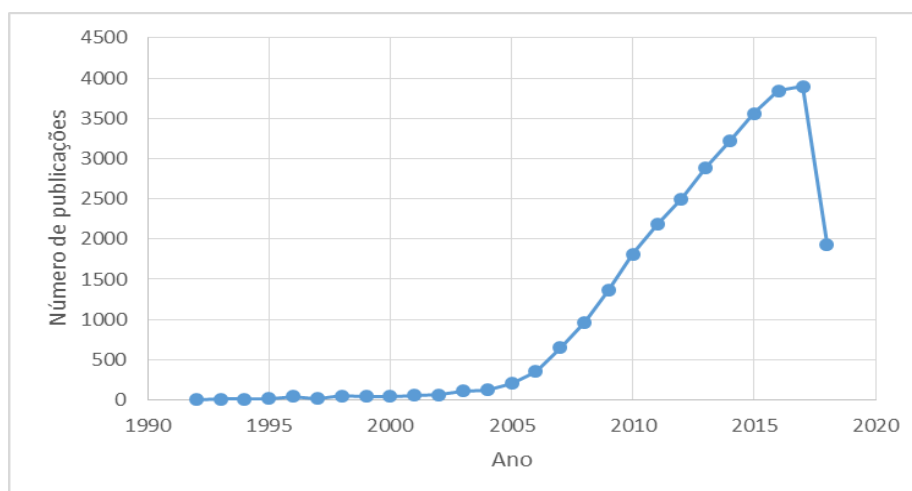
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os artigos foram organizados por número de citação em ordem decrescente, em seguida, foi feita a leitura do número final de artigos obtidos, sendo possível analisar aqueles de maior relevância e excluir os trabalhos que não possuíam concordância com o assunto procurado.

3. Resultados e Discussão

Com a pesquisa realizada na base *Web of Science*, o primeiro termo *biodiesel* foi inserido, sendo encontrados 29.671 artigos. Sendo a primeira publicação em 1992 (Figura 1). O primeiro artigo divulgado foi escrito por MAAS, PA; KROGER, J e SCHARMER, K; na Alemanha e divulgado na sexta 6ª Conferência Européia sobre Biomassa Energética, Indústria e Meio Ambiente.

Figura 2 – Número de publicações por ano com o termo *biodiesel*

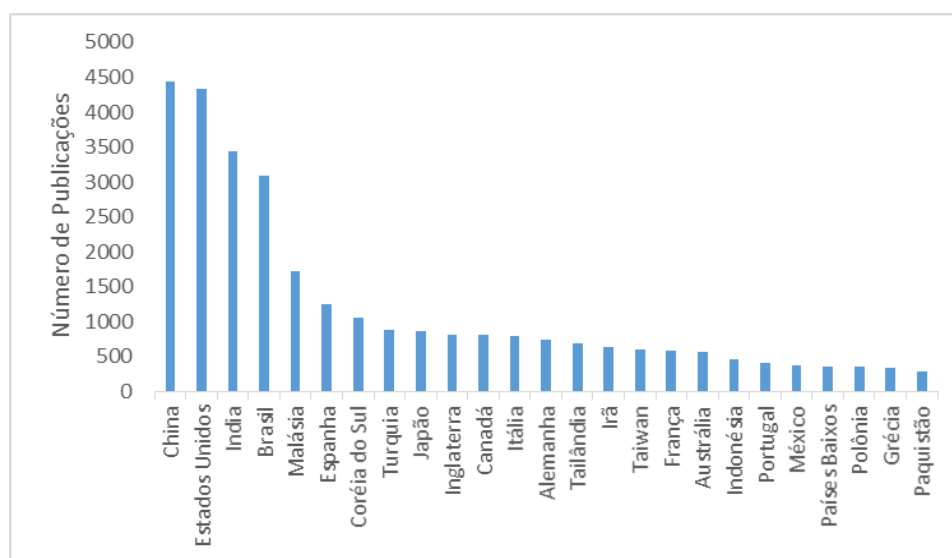


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 2, nota-se um constante crescimento a respeito do assunto relacionado a biodiesel. Não houve estagnação, a evolução é clara e observa-se que desde a década de 90 estudos têm sido divulgados em virtude da preocupação com a utilização da biomassa para fins energéticos.

Na Figura 3, a posição de destaque da China em produções de trabalhos relacionados ao tema se deve ao fato desse país ter enfrentado desafios em relação a energia, explorando soluções para esse problema e aquele de cunho ambiental, oriundo da emissão de gases poluentes, como o CO₂ (ZHAO; YAN, 2012).

Figura 3 – Número de publicações por país com o termo *biodiesel*



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Brasil ocupa a 4ª posição, podendo ser considerado, que esse país também têm evoluído em pesquisas, mesmo apresentando-se como economia subdesenvolvida. A geração de resíduos e preocupação com a diversificação energética têm incentivado estudos voltados ao aproveitamento da biomassa.

Das 29.671 publicações com o termo *biodiesel*, selecionou-se os 10 artigos mais citados entre 1945 e 2018 (Tabela 1).

Tabela 1 - Tabela dos 10 artigos mais citados em ordem decrescente, com a palavra-chave *biodiesel*

Artigo	Referência	Nº de Citações
Biodiesel from microalgae	Yusuf (2007)	4234
Biodiesel production: A review	Ma e Hanna (1999)	2967
Microalgae for biodiesel production and other	Mata <i>et al.</i> (2010)	

applications: A review		2045
Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products.	Brennan e Owende (2010)	1655
Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review	Meher <i>et al.</i> (2006)	1594
Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines	Agarwal (2007)	1324
Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor	Rodolfi <i>et al.</i> (2009)	1286
Biodiesel fuel production by transesterification of oils	Fukuda <i>et al.</i> (2001)	1131
Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines	Graboski e McCormick (1998)	1107
Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters	Knothe (2005)	1086

Fonte: Elaborado pelo autor.

Yusuf (2007) discute a competitividade econômica do biodiesel obtido a partir do óleo de microalgas, justificando que com uso dessa matéria-prima seria possível atender a demanda global por combustíveis para transporte, visto a produtividade de óleo das microalgas. Os autores consideram o biodiesel microalgal tecnicamente viável e com competitividade atingível com o petrodiesel. Para redução dos custos, há necessidade de um maior desenvolvimento no processo de produção, estudos para melhorias na biologia das algas através de engenharia genética e metabólica, bem como avanços na engenharia de fotobiorreatores.

Ma e Hanna (1999) abordam a transesterificação como o método mais usado na produção do biodiesel, mostrando que essa reação química é afetada pela razão molar entre triglicerídeos e álcool, catalisadores, temperatura, tempo, ácidos graxos livres e o teor de água de óleos e gorduras. Os pesquisadores concluem que os principais desafios para produção do biodiesel são o custo e disponibilidade limitada de óleos e gorduras, que competem com o setor alimentício. Os custos que envolvem a matéria-prima (gorduras e óleos) são responsáveis por

60 a 75% do custo total do biodiesel e os custos de produção englobam o processo de transesterificação e a recuperação do subproduto (glicerol).

Mata *et al.* (2010) analisam o uso de microalgas para a produção de biodiesel, incluindo seu cultivo, colheita e processamento. Verificou-se que as limitações atuais para maior utilização dessa matéria-prima na produção de biodiesel dizem respeito à otimização da colheita, processos de extração de óleo e fornecimento de CO₂. Além disso, os níveis de luz, nutrientes, temperatura, turbulência, CO₂ e O₂ precisam ser ajustados para fornecer condições ótimas para as microalgas, visando maiores conteúdos de óleo e rendimento de biomassa. Logo, são necessários investimentos consideráveis em tecnologia e conhecimentos técnicos esse produto seja economicamente viável e possa tornar-se uma realidade. Isso deve ser realizado em conjunto com planejamento estratégico, apoio político e econômico.

Brennan e Owende (2010) fazem uma revisão de literatura sobre as tecnologias que sustentam os sistemas de microalgas para biocombustíveis, com foco na produção de biomassa, colheita, tecnologias de conversão e extração de coprodutos úteis. Descobriu-se que, embora existam questões pendentes relacionadas à eficiência fotossintética e à produção de biomassa, os biocombustíveis derivados de microalgas poderiam substituir progressivamente uma proporção significativa dos combustíveis fósseis necessários para atender à crescente demanda por energia.

Meher *et al.* (2006) estudaram vários métodos de preparação de biodiesel com diferentes combinações de óleo e catalisadores, bem como algumas ferramentas técnicas e processos para monitorar a reação de transesterificação. De acordo com a literatura relatada, a maioria dos estudos de transesterificação foi feito com óleos comestíveis (colza, soja, girassol e canola), usando metanol e NaOH/KOH como catalisador. Vários padrões foram especificados para verificar a qualidade do biocombustível, sendo que o método de cromatografia líquida de alta eficiência foi adequado para analisar os intermediários e produtos da reação.

Agarwal (2007) investigaram sobre o desempenho do biodiesel em motores de ignição por compressão, análise de combustão, desgaste a longo prazo do motor e viabilidade econômica. Observa-se que um motor a diesel pode funcionar satisfatoriamente em misturas de biodiesel sem nenhuma modificação do motor, sendo que 20% de biodiesel foi a concentração ideal. Verifica-se uma eficiência térmica maior em 2,5%, com reduções de emissões de escape e consumo de energia específico do freio. O teste de resistência provou que o biodiesel pode ser usado para substituir o diesel mineral no longo prazo. O desgaste de várias peças vitais

reduziu em até 30% devido às propriedades adicionais de lubricidade do biodiesel. Portanto, o biodiesel pode ser considerado como substituto do diesel.

Rodolfi *et al.* (2009) selecionam quatro linhagens (duas marinhas e duas de água doce) de microalgas para pesquisar sobre a produtividade de biomassa e o conteúdo lipídico das mesmas. As microalgas foram cultivadas sob diversas condições. A espécie marinha *Nannochloropsis sp.* foi a que mais se destacou, demonstrando potencial para uma produção anual de 20 e 30 toneladas de lipídios por hectare no clima mediterrâneo e em áreas tropicais ensolaradas, respectivamente.

Fukuda *et al.* (2001) elaboram uma revisão sobre os métodos de produção de biodiesel e perceberam que a transesterificação enzimática usando lipases tem se destacado recentemente, uma vez que o glicerol produzido como subproduto pode ser facilmente recuperado. Entretanto, o custo da produção de lipase é o principal obstáculo para a comercialização. Visando a redução do custo e aplicação industrial, faz-se necessário estudos para o desenvolvimento da tecnologia de engenharia genética, bem como a produção de lipases com altos níveis de expressão e estabilidade em relação ao metanol.

Graboski e McCormick (1998) relatam acerca das propriedades do biodiesel no desempenho de motores e nas emissões geradas. O principal obstáculo ao uso generalizado do biodiesel é o alto custo relativo ao petróleo, determinado pelo preço da matéria-prima utilizada (gordura ou óleo). O biocombustível é completamente miscível com óleo diesel de petróleo e é geralmente testado como uma mistura, apresentando lubricidade superior ao diesel convencional e reduzindo significativamente as emissões de material particulado.

Knothe (2005) observa que as propriedades dos ácidos graxos presentes nas diversas fontes oleaginosas usadas para produção do biodiesel e o álcool influenciam nas propriedades globais do combustível, tais como o número de cetano, emissões de escape, fluxo a frio, estabilidade oxidativa, viscosidade e lubricidade. Concluiu-se que geralmente, o número de metano, calor de combustão, ponto de fusão e a viscosidade das matérias-primas oleaginosas aumentam quanto maior o comprimento da cadeia e diminuem quanto mais insaturado for o óleo.

Adicionando a segunda palavra-chave *technology*, encontrou-se 2.548 artigos, conforme (Tabela 2), com o intervalo de tempo de 1945-2018.

Tabela 2- 10 artigos mais citados em ordem decrescente utilizando os termos *biodiesel e technology*

Artigo	Referência	Nº de Citações
Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products.	Brennan e Owende (2010)	1655
Biodiesel fuel production by transesterification of oils	Fukuda <i>et al.</i> (2001)	1131
Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review	Naik <i>et al.</i> (2010)	1000
Catalytic conversion of biomass to biofuels	Alonso <i>et al.</i> (2010)	993
Progress and recent trends in biofuels	Demirbas (2007)	902
Industrial applications of microbial lipases	Hasan <i>et al.</i> (2006)	876
An Outlook on Microalgal Biofuels	Wijffels e Barbosa (2010)	853
Possible methods for biodiesel production	Marchetti <i>et al.</i> (2007)	701
Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review	Chen <i>et al.</i> (2011)	691
Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel.	Balat e Balat (2009)	622

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dois primeiros artigos já foram discutidos na Tabela 1. Dando sequência a análise, Naik *et al.* (2010) focaram em tecnologias econômicas e nos processos de conversão de biomassa em biocombustíveis e bioprodutos líquidos úteis. Verificou-se uma preocupação crescente nos últimos anos com os biocombustíveis de primeira geração devido ao impacto nos preços dos alimentos. Uma alternativa apresentada são os combustíveis derivados de lignocelulose, ou seja, biocombustíveis de segunda geração. Porém, a tecnologia ainda não está totalmente

desenvolvida, necessitando de estudos para melhoria da eficiência do processo, bem como do projeto do reator e catalisador usados.

Alonso *et al.* (2010) fornecem uma breve visão geral dos biocombustíveis de primeira geração, especificamente bioetanol e biodiesel, considerando as implicações de utilizar as reservas de amido e triglicerídeos dos alimentos tradicionais. Posteriormente, abordam sobre as tecnologias de segunda geração para processar os principais constituintes da biomassa lignocelulósica, tais como rotas termoquímicas (gaseificação, pirólise, liquefação) que processam diretamente a lignocelulose inteira para geração de gás de síntese, biomassa e bio-óleo.

Demirbas (2007) discute os biocombustíveis destinados ao setor de transporte. Observou que o bioetanol e o biodiesel são os combustíveis mais modernos à base de biomassa. O bioetanol é um aditivo/substituto da gasolina, que pode ser obtido a partir de materiais como madeira, palha e até resíduos domésticos. Além disso, verificou um interesse no uso de óleos vegetais para a produção de biodiesel, devido à sua natureza menos poluente e renovável, em comparação com o diesel convencional de petróleo.

Hasan *et al.* (2006) descrevem várias aplicações industriais de lipases microbianas no detergente, alimentos, indústria de aromas, resolução biocatalítica de produtos farmacêuticos, ésteres e derivados de aminoácidos, fabricação de produtos químicos finos, agroquímicos, uso como biossensor, biorremediação e cosméticos e perfumaria. Notou-se que as lipases constituem o grupo mais importante de biocatalisadores para aplicações biotecnológicas e estão atualmente recebendo muita atenção com o rápido desenvolvimento da tecnologia de enzimas.

Wijffels e Barbosa (2010) relatam que as microalgas são consideradas uma das matérias-primas mais promissoras para biocombustíveis. A produtividade desses microrganismos fotossintéticos na conversão de dióxido de carbono em lipídios ricos em carbono, supera em muito a das oleaginosas agrícolas, sem competir por terras aráveis. Dessa forma, programas de pesquisa estão sendo realizados para desenvolver a tecnologia necessária para expandir a produção dos lipídios de algas. Avanços recentes nos métodos de biologia de sistemas, engenharia genética e biorrefinação, apresentaram oportunidades para o desenvolvimento desse processo de maneira sustentável e econômica nos próximos 10 a 15 anos.

Marchetti *et al.* (2007) realizam uma revisão dos métodos tecnológicos alternativos que podem ser usados para produzir o biodiesel. Estudos foram realizados utilizando diversos

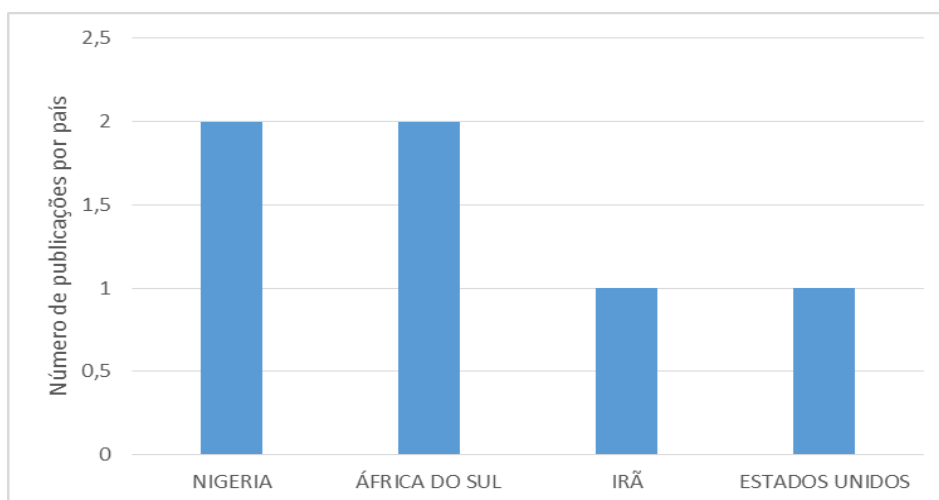
óleos como matéria-prima, diferentes tipos de álcool (metanol, etanol, butanol), bem como catalisadores distintos, homogêneos como hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, ácido sulfúrico e fluidos supercríticos, e heterogêneos como lipases. Por fim, listou-se as vantagens e desvantagens das tecnologias e para todas foi introduzido um modelo de cinética.

Chen *et al.* (2011) apresentam os avanços recentes no cultivo de microalgas, *design* de fotobiorreatores e nas tecnologias de colheita, com foco no óleo das microalgas visando a produção de biodiesel. Concluiu-se que o desempenho da produção de óleo microalgal é dependente da tensão e do metabolismo. O cultivo heterotrófico geralmente exhibe produtividade de óleo significativamente maior devido à densidade celular e taxa de crescimento ser superior. A coleta e concentração de biomassa de microalgas dos sistemas de cultivo contribuem fortemente para o custo de operação do processo global. Portanto, uma tecnologia de colheita mais eficiente e econômica deve ser desenvolvida para aumentar a viabilidade comercial da indústria de biocombustíveis de microalgas.

Balat e Balat (2009) pesquisam sobre o bioetanol e perceberam que esse biocombustível é o mais utilizado no setor de transporte mundialmente. Concluiu-se que o uso de gasolina misturada com bioetanol em automóveis pode reduzir significativamente o uso do petróleo e a emissão de gases de efeito estufa. As tecnologias de conversão para a produção de bioetanol a partir de recursos de biomassa celulósica estão em desenvolvimento e ainda não foram demonstradas comercialmente. Entretanto, verificou-se que a produção global de bioetanol aumentou de 17,25 bilhões de litros em 2000 para mais de 46 bilhões de litros em 2007. Estima-se que a demanda global total de bioetanol pode exceder 125 bilhões de litros até 2020.

Considerando a importância em dar robustez ao estudo, refinou-se a busca entre os anos de 1945-2018, adicionando as três palavras-chave, no mecanismo de busca avançada do *Web of Science*, adicionando a terceira palavra *system dynamics* como conteúdo de título dos artigos. Conforme Figura 4, publicações aliando sistemas dinâmicos a biodiesel, têm sido objeto de estudo para Nigéria e África do Sul. Esses dois países representam as duas maiores economias da África e tem estudado a implantação do Biodiesel no seu sistema energético. Políticas de Incentivo para Aproveitamento de Biomassa como combustível foram implantadas recentemente (MUSANGO et al, 2012; AZADEH e ARANI, 2016).

Figura 4 - Número de publicações por país com o termo *biodiesel, technology, system dynamics*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionando a terceira palavra-chave *system dynamics*, encontrou-se 5 artigos, conforme (Tabela 3), com o intervalo de tempo de 1945-2018. Somente 4 artigos estavam alinhados com o tema, sendo um por sua vez excluído. Na Figura 4, os dois artigos citados para cada país: Nigéria e África do Sul, dizem respeito a trabalho em conjunto por autores nigerianos e sul-africanos.

Tabela 3- Refinamento de 4 artigos encontrados em ordem decrescente utilizando os termos *biodiesel, technology e system dynamics*

Artigo	Referência	Citações
A system dynamics approach to technology sustainability assessment: The case of biodiesel developments in South Africa	Musango <i>et al.</i> (2012)	14
Technology sustainability assessment of biodiesel development in South Africa: A system dynamics approach.	Musango <i>et al.</i> (2011)	9
Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics-mathematical programming approach	Azadeh e Arani (2016)	7
Understanding US biodiesel industry growth using system dynamics modeling	Bantz e Deaton (2006)	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Musango *et al.* (2011) introduziram a Avaliação de Sustentabilidade da Tecnologia de Bioenergia (BIOTSA) baseada em uma abordagem de dinâmica de sistemas. O modelo foi demonstrado e avaliado com um caso específico: a avaliação dos efeitos do desenvolvimento do biodiesel em indicadores de sustentabilidade selecionados para a Província do Cabo Oriental da África do Sul. As forças e limitações do modelo foram discutidas e as perspectivas futuras delineadas. Os autores ressaltaram que o desenvolvimento do biodiesel implica em interações complexas de atores, tais como os desenvolvedores de tecnologia, o governo em diferentes níveis, as comunidades, bem como o ambiente natural. Dessa forma, diferentes ações ou respostas no sistema maior podem impedir ou minar os efeitos positivos de tal desenvolvimento.

Musango *et al.* (2012) utilizaram a modelagem dinâmica de sistemas para avaliar o impacto do desenvolvimento da produção de biodiesel em indicadores de sustentabilidade selecionados na Província do Cabo Oriental, África do Sul. Para isso, foi aplicado um modelo de avaliação da sustentabilidade da tecnologia de bioenergia (BIOTSA), visando analisar os resultados do projeto de produção de biodiesel proposto, testando alguns cenários. Os resultados do modelo foram úteis para comparar as consequências dinâmicas e as respectivas políticas e decisões que podem ser advindas do desenvolvimento do projeto na região.

Azadeh e Arani (2016) desenvolveram uma abordagem de programação matemática-dinâmica de sistemas híbridos para projetar e planejar uma cadeia de suprimento de biodiesel a partir de campos de biomassa para os mercados de consumo. As limitações enfrentadas pela cadeia de suprimentos na produção de biodiesel envolvem recursos hídricos, terra para aquisição de biomassa e questões tecnológicas. A competição entre combustíveis fósseis e biodiesel foi levada em conta. A metodologia proposta estimou os parâmetros mais importantes na cadeia de suprimento de biodiesel em um dado horizonte de planejamento. Então, os parâmetros estimados foram utilizados como entradas do modelo matemático e as decisões ótimas da cadeia foram feitas por meio de um modelo de programação de números inteiros estocásticos. Cenários foram definidos para modelar os riscos de interrupção de links e campos de biomassa. Finalmente, um experimento numérico foi apresentado para mostrar a aplicabilidade da metodologia de acordo com algumas entrevistas com especialistas no Irã.

Bantz e Deaton (2006) destacaram que o forte e contínuo crescimento da capacidade de produção de biodiesel depende da rentabilidade do produtor/ fornecedor, que será influenciada por diversos fatores, como preços da matéria-prima de óleo de biomassa, preços de produtos/co-produtos, tecnologias de produção e regulamentações/incentivos

governamentais. Para analisar a dependência e o comportamento desses fatores, os pesquisadores formularam um modelo de dinâmica de sistemas do mercado de biodiesel dos EUA. Por meio da modelagem, foram visualizados os possíveis cenários de comportamento de crescimento para este setor na próxima década.

4. Considerações finais

A incipiente revisão bibliométrica apresentada nesse trabalho, permite apresentar os avanços na utilização de sistemas dinâmicos para modelar cenários no setor de biocombustíveis. Por meio da pesquisa no *Web of Science*, pode-se observar que dinâmica de sistemas tem sido uma abordagem em princípio de uso para análise de desenvolvimento e implantação de tecnologias para obtenção de biocombustíveis em cadeias energéticas, por meio de cenários pré-estabelecidos. Portanto, apesar de um método consolidado, a dinâmica de sistemas ainda não foi muito empregada nesta área, o que pode ser interpretado como uma oportunidade para pesquisas futuras. Os estudos já desenvolvidos na África do Sul, Estados Unidos e Irã são um indicativo dessa possibilidade.

Um panorama em nível de Brasil é passível de ser desenvolvido para avaliar opções mais vantajosas de aplicabilidade do biodiesel para diversificação da matriz energética nacional, por meio de indicadores selecionados e embasados em experiências de estudo internacionais. Portanto, cenários envolvendo o impacto da utilização de biodiesel como alternativa gradual para a substituição de combustíveis fósseis podem ser trabalhados futuramente. A dinâmica de sistemas pode ser utilizada para modelar o comportamento dos atores envolvidos setor no Brasil, bem como envolver o impacto de regulamentação e legislação específica.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

AGARWAL, A. K. Progress in Energy and Combustion Science Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 3, p. 233-271, 2007.

ALONSO, D. M.; BOND, J. Q.; DUMESIC, J. A. Catalytic conversion of biomass to biofuels. **Green Chemistry**, v. 12, n. 9, p. 1493-1513, 2010.

AZADEH, A.; ARANI, H. V. Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics-mathematical programming approach. **Renewable Energy**, v. 93, p. 383-403, 2016.

BALAT, M.; BALAT, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, v. 86, n. 11, p. 2273-2282, 2009.

BANTZ, S. G.; DEATON, M. L. Understanding US biodiesel industry growth using system dynamics modeling. **Systems and Information Engineering Design Symposium**, p. 156, 2006.

BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2010.

CHEN, C.; YEH, K.; AISYAH, R.; LEE, D.; CHANG, J. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 71-81, 2011.

CHIA, R. S.; CHEW, K. W.; SHOW, P. L.; YAP, Y. J.; ONJ, H. C.; LINJ, T. C.; CHANG, JO-SHU. Analysis of Economic and Environmental Aspects of Microalgae Biorefinery for Biofuels Production: A Review. **Biofuels Production**, v. 13, p. 1-10, 2018.

DEMIRBAS, A. Progress and recent trends in biofuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 1, p. 1-18, 2007.

FUKUDA, H.; KONDO, A.; NODA, H. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 92, n. 5, p. 405-416, 2001.

GRABOSKI, M. S.; MCCORMICK, R. L. Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 24, n. 2, p. 125-164, 1998.

HASAN, F.; SHAH, A. A.; HAMEED, A. Industrial applications of microbial lipases. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 39, n. 2, p. 235-251, 2006.

KNOTHE, G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. **Fuel Processing Technology**, v. 86, n. 10, p. 1059-1070, 2005.

LIMA, K.F. P.; PORTO, PORTO, P. S. DA S. Métodos de extração de bio-óleo a partir da microalga *Nannchloropsis oculata*: uma análise bibliométrica. **Research, Society and Development**, v.7, n. 6, p. 01-22, 2018.

MA, F. R.; HANNA, M. A. Biodiesel production: A review. **Bioresource Technology**, v. 70, n. 1, p. 1-15, 1999.

MARCHETTI, J. M.; MIGUEL, V. U.; ERRAZU, A. F. Possible methods for biodiesel production. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 6, p. 1300-1311, 2007.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.

MEHER, L. C.; SAGAR, D. V.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 3, p. 248-268, 2006.

MUSANGO, J. K.; BRENT, A. C.; AMIGUN, B.; PRETORIUS, L.; MULLER, H. A system dynamics approach to technology sustainability assessment: The case of biodiesel developments in South Africa. **Technovation**, v. 32, p. 639-651, 2012.

MUSANGO, J. K.; BRENT, A. C.; AMIGUN, B.; PRETORIUS, L.; MULLER, H. Technology sustainability assessment of biodiesel development in South Africa: A system dynamics approach. **Energy**, v. 36, n. 12, p. 6922-6940, 2011.

NAIK, S. N.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; DALAI, A. K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 578-597, 2010.

RODOLFI, L.; ZITTELLI, G. C.; BASSI, N.; PADOVANI, G.; BIONDI, N.; BONINI, G.; TREDICI, M. R. Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 102, n. 1, p. 100-112, 2009.

TESCH, T.; DESCAMPS, P.; WEILER, R. The COSMOPAD modelling framework: Conceptual system dynamics model of plenary agricultural and biomass development. Digital Earth Conference, BRNO, Czech Republic, 2003.

ZHAO, Z.; YAN, H. Assessment of the biomass power generation industry in China. **Renewable Energy**, v. 37, n. 1, p. 53-60, 2012.

WIJFFELS, R. H.; BARBOSA, M. J. An Outlook on Microalgal Biofuels. **Science**, v. 329, p. 796-799, 2010.

YUSUF, C. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.