

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de **P&D** em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Análise do ciclo de vida do biodiesel produzido via rota metílica alcalina e etílica enzimática

AUTORES:

Marcia de Mello, André Young, Hugo Villardi, Fernando Pessoa, Andrea Salgado

INSTITUIÇÃO:

Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

Análise do ciclo de vida do biodiesel produzido via rota metálica alcalina e etílica enzimática

Abstract

A comparative environmental impact analysis of the soybean biodiesel production by two different technologies was done in this study. The production routes evaluated were the alkali-catalyzed (catalyst: sodium hydroxide) methylic transesterification and the enzyme-catalyzed (catalyst: lipase) ethylic transesterification. In an early work, simulations of the biodiesel production processes with the software Aspen HYSYS, from AspenTech Inc., were carried out. Now, a life cycle assessment (LCA) of the entire biodiesel production chain is done. This is a short and translated version of our recently published paper “Life cycle assessment of biodiesel produced by the methylic-alkaline and ethylic-enzymatic routes”, at Fuel, v. 208, p. 329-336 (2017), with additional comments. The inventories related to each production subsystem were developed based on the mass and energy balances obtained from the simulations and on literature information. The results clearly indicate the best environmental performance of ethanol over methanol and of the enzymatic technology over the traditional alkaline technology, but also demonstrated some bottlenecks that should be attacked in a seek for more sustainable solutions.

Keywords: Biodiesel, Life Cycle Assessment, Alkaline Catalysis, Enzymatic Catalysis

Introdução

O biodiesel é um combustível biodegradável constituído por uma mistura de alquil-ésteres de ácidos graxos, que pode ser produzido a partir de matérias-primas como óleos vegetais, gorduras animais e óleos residuais provenientes de frituras, do refino do óleo vegetal e, até mesmo, do esgoto sanitário ou qualquer outra fonte de ácidos graxos (CASTRO, 2009; CAVALCANTE, 2010).

Por apresentar um ciclo fechado de carbono, contribui para a diminuição da dependência de diesel mineral. Ele apresenta vantagens significativas, por exemplo, na combustão, pois emite baixas quantidades de monóxido de carbono, materiais particulados e CO₂. Além disso, o biodiesel melhora a lubricidade do motor, reduzindo o desgaste e aumentando sua vida útil. Somado a todas estas características tem-se o fato do biodiesel ser um combustível biodegradável, não tóxico e obtido parcial ou integralmente de fontes renováveis (KNOTHE, VAN GERPEN, KRAHL, 2005).

No entanto, na busca por soluções mais econômicas e sustentáveis, há uma evidente tendência na literatura científica pela busca de processos de produção que façam uso de catalisadores heterogêneos. Em especial, e já com aplicação industrial, destaca-se a catálise enzimática, onde lipases são usadas como catalisadores da transesterificação (MAGALHÃES, 2015; YOUNG, 2015). Dentre as vantagens da produção de biodiesel com lipases pode-se citar as condições mais brandas de reação, o menor custo de capital envolvido, a menor geração de efluentes, entre outras. O grande obstáculo para a implementação definitiva da tecnologia enzimática a nível industrial, no entanto, é o elevado preço do catalisador (YOUNG, 2015). Esse trabalho é uma versão reduzida e traduzida do artigo recentemente publicado por nosso grupo de pesquisa (MELLO et al., 2017), com alguns comentários adicionais.

Metodologia

Segundo ALMEIDA NETO et al (2008), as categorias de maior importância para análise de impacto ambiental de biocombustíveis são: o balanço energético por meio da razão output/input (O/I) e da diferença output-input (O-I), as emissões de gases do efeito estufa, as emissões com potencial para acidificação, eutrofização e destruição da camada de ozônio.

Segundo SALLABERRY (2009), estudos que revisaram várias ACV (Análises de Ciclo de Vida) de biocombustíveis verificaram que a categoria de impacto ambiental mais discutida foi o aquecimento global. Segundo o mesmo autor, outras categorias também estudadas foram a acidificação, a eutrofização, a oxidação fotoquímica, a toxicidade, a destruição da camada de ozônio e a redução dos recursos abióticos. Em função da falta de dados confiáveis para avaliação da categoria toxicidade, o autor optou por analisar a oxidação fotoquímica e por avaliar o uso de energia não renovável em substituição à análise dos recursos abióticos. Na consideração do uso de energia não renovável, o autor utilizou as quantidades utilizadas de petróleo, gás natural, lenhita, carvão e urânio como referência.

Segundo MARZULLO (2007), para realização de uma ACV não existem categorias definidas como padrões, pois as diferenças entre os diversos objetivos e escopos definidos podem requerer a análise de diferentes categorias e a execução de diferentes metodologias. Neste trabalho, foram comparadas as vias metilica alcalina e etilica enzimática. Foi contemplada também a questão da localidade, avaliando-se as diferenças entre a instalação de uma planta de produção de biodiesel nos Estados de Goiás e Rio Grande do Sul. Seguindo procedimento adotado por MARZULLO (2007) e VIANA (2008), foram analisados o balanço de CO₂, o consumo de petróleo, gás natural, carvão e água para cada sistema de produto analisado, bem como a contribuição de cada subsistema constituinte. Foram avaliados também diversos fatores de impacto ambiental, como potencial de causar efeito estufa (PEE), potencial de destruição da camada de ozônio (PDCO), potencial de formação de ozônio fotoquímico (PFOF) e potencial de acidificação (PA). Além disso, foram avaliados em cada processo: uso de energia não renovável (UE), geração de efluentes líquidos (GFL), geração de resíduos sólidos (GRS), potencial de causar efeito estufa (PEE), potencial de destruição da camada de ozônio (PDCO), potencial de formação de ozônio fotoquímico (PFOF) e potencial de acidificação (PA).

Para o cálculo do uso da energia não renovável (UE), foram utilizadas as correlações indicadas na Tabela 1. Estes dados foram correlacionados com as massas de entrada referentes a petróleo, carvão e gás natural retiradas dos inventários de cada sistema de produto e alocados como fontes de energia. A Tabela 2 sintetiza as fórmulas e as definições para cada um dos demais fatores de impacto abordados neste trabalho.

Tabela 1: Relação energia-massa das fontes de energia não renováveis consideradas.

Recurso	MJ/kg	Referência
Petróleo	4,58E+01	SALLABERRY (2009)
Gás natural	3,80E+01	RIBEIRO (2009)
Carvão	1,91E+01	SALLABERRY (2009)

Tabela 2: Fatores de caracterização: fórmulas e definições.

Fator	Fórmula (unidade)	Contribuição
PA	$\sum_i PA_i \cdot e_i (kg_{eq} SO_2)$	Mede a propensão de emissão de H de certa substância comparada com o dióxido de enxofre.
PDCO	$\sum_i PDCO_i \cdot e_i (kg_{eq} CFC)$	Mede a capacidade que certa substância apresenta de favorecer a destruição da camada de ozônio em comparação com o CFC.
PEE	$\sum_i PEE_i \cdot e_i (kg_{eq} CO_2)$	Mede a absorção de radiação infravermelha absorvida por certa substância em comparação com o CO ₂ .
PFOF	$\sum_i PFOF_i \cdot e_i (kg_{eq} C_2H_4)$	Mede a quantidade de massa que certa substância tem para formar oxidante em comparação com o eteno.

Nas fórmulas acima, “ e_i ” representa as emissões atmosféricas e os fatores associados a cada categoria são representados pelos índices PA_i , $PDCO_i$, PEE_i e $PFOF_i$.

Para obtenção dos indicadores ambientais, utilizou-se uma adaptação da metodologia utilizada por MARZULLO (2007) e VIANNA (2006), onde os fatores de impacto são calculados pelas fórmulas presentes na Tabela 2, com base nos fatores de impacto ambiental associados às emissões atmosféricas apresentados na Tabela 3.

Os fatores GFL e GRS foram obtidos com base no somatório dos efluentes e resíduos gerados em cada rota analisada, com algumas particularidades. São elas:

a) no cálculo da GRS excluiu-se, em todas as rotas, a contribuição do item “resíduos no solo”. Isto ocorreu em função da diferença de unidades;

b) na obtenção da GFL, para obtenção do volume de efluentes referente à DBO e à DQO, foi calculada a quantidade de água necessária para promover a diluição destes parâmetros até limites críticos adotados pelo “*Regulationon Requirements for the Discharge of Waste Water into Surface Waters*” de 1997, que se baseiam na relevância ambiental destes parâmetros (75 mg/L e 15 mg/L, para a DQO e a DBO, respectivamente). Outra consideração feita foi a exclusão do dado referente à radioatividade para água. Os demais dados foram somados diretamente.

Tabela 3: Fatores de impacto ambiental associados às emissões atmosféricas

Emissões atmosféricas	Efeito estufa (EE)	Destruição da camada de ozônio (DCO)	Formação fotoquímica de ozônio (FFO)	Chuva ácida (CA)
CO ₂	1.00	-	-	-
SO ₂	-	-	-	1
NO _x	-	-	-	0.7
CH ₄	21.00	-	0.01	-
Hidrocarbonetos	-	-	0.42	-
Hidroc . halogenados	4000.00	1	-	-
NH ₃	-	-	-	1.88
N ₂ O	310.00	-	-	-
HCl	-	-	-	0.88
HF	-	-	-	1.20

Em todas as análises realizadas, a avaliação dos recursos consumidos e dos efluentes sólidos, líquidos ou gasosos emitidos para cada um dos sistemas e subsistemas estudados foi baseada no fluxo de referência adotado neste trabalho: produção de 1.000 kg de biodiesel.

A escolha dos aspectos ambientais a serem analisados ocorreu em função da importância que estes assumem no contexto atual, não somente considerando o nível econômico, como também o ambiental. Os resultados podem ser vistos nas Tabelas 4 e 5.

Resultados

Balanco de CO₂. Os subsistemas de produção de cana-de-açúcar e de grãos de soja possibilitam a captura de carbono na forma de CO₂, que participa do inventário não somente como emissão atmosférica, mas também como fluxo de entrada, por ser um recurso natural (SUGAWARA, 2012).

Para o cálculo da absorção de carbono na produção da cana-de-açúcar, utilizou-se a produtividade do Estado de São Paulo (local de instalação da usina de etanol utilizada como referência neste trabalho)

na safra 2012/2013, bem como a capacidade de absorção deste tipo de cultura. Os dados foram retirados do MAPA (2013) e EMBRAPA (2001), respectivamente. A produtividade considerada foi de 74,94 t de cana/ha e o total de carbono fixado anualmente pela cana foi de 16,2 t/ha.

De acordo com esta consideração e com a relação estequiométrica de 12 kg de carbono para 44 kg de CO₂, pode-se inferir a captura de cerca de 793 kg de CO₂ por tonelada de cana produzida. Contudo, SUGAWARA (2012) diz que a captura de CO₂ seria da ordem de 653 kg por tonelada de cana produzida. Deste modo, no presente trabalho foi utilizada a média entre os dois valores supracitados (723 kg) para o cálculo da quantidade de CO₂ absorvida nos inventários em análise. Com isso, para produção de 172,03 kg de etanol, necessários para produção de 1.000 kg de biodiesel, há uma capacidade de absorção correspondente a 1.711,52 kg de CO₂ nesta etapa agrícola.

No caso do cálculo da absorção de carbono na produção da soja, para cada 4,6 t de matéria seca por hectare, há um sequestro equivalente a 2,3 t de carbono/ha. Desta forma, com base na relação estequiométrica entre carbono e CO₂, tem-se a absorção de 8.433,33 kg deste composto para cada hectare de soja plantado. Ainda, segundo EPE (2005), como são necessários 0,35 ha para se produzir 1 tonelada de soja, há uma fixação de 2.926,37 kg de CO₂ para cada tonelada de soja produzida. Esta é apenas uma condição considerada como o melhor caso ambiental, uma vez que há indicações de que esta absorção pode ser menor (2.553,92 kg), o que seria o equivalente a apenas 1,60 kg de CO₂ por kg de matéria seca. Os valores considerados acima seriam equivalentes a 1,83 kg CO₂/kg de matéria-seca.

Em função das diferenças entre o total de carbono absorvido e emitido nos sistemas de produto de biodiesel, a Tabela 4 mostra o balanço total de CO₂ envolvido na produção de biodiesel em Goiás e no Rio Grande do Sul, considerando as duas rotas de produção em análise neste trabalho.

Tabela 4: Balanço de CO₂ nos sistemas de produção de biodiesel.

Subsistemas	Rota etílica (GO)	Rota metílica (GO)	Rota etílica (RS)	Rota metílica (RS)
Subsistema de produção de óleo	-2,76E+03	-2,72E+03	-2,74E+03	-2,70E+03
Subsistema de produção de etanol	-1,68E+03	-	-1,68E+03	-
Subsistema de produção de metanol	-	1,61E+03	-	1,61E+03
Subsistema de produção da soda	-	3,61E+00	-	3,61E+00
Subsistema de transporte	4,76E+01	5,91E+01	7,39E+01	5,82E+01
Subsistema parcial de produção de biodiesel	6,12E+01	8,57E+01	6,12E+01	8,57E+01
Balanço Total	-4,33E+03	-9,60E+02	-4,28E+03	-9,41E+02

Observa-se que, em todas as rotas analisadas, o balanço total de CO₂ é negativo, pois as quantidades deste gás absorvidas nos subsistemas de produção do etanol e do óleo de soja (devido às etapas agrícolas de produção da cana-de-açúcar e da soja, respectivamente) são maiores do que a soma das quantidades emitidas em todos os subsistemas.

Outra observação que pode ser feita é que a rota etílica, independentemente do local da instalação da usina de biodiesel, apresenta um balanço mais negativo do que a rota metílica. Isto ocorre porque a

primeira apresenta a contribuição de duas etapas agrícolas (cana-de-açúcar e soja) que realizam o sequestro de carbono, enquanto a segunda, além de contemplar apenas a contribuição da etapa agrícola da soja, ainda tem uma emissão significativa atribuída ao subsistema de produção de metanol.

Acerca do subsistema de produção de metanol, vale ressaltar que a significativa emissão de CO₂ ocorre devido ao subsistema ter uma grande contribuição das etapas de produção e consumo de gás natural, tanto para produção de energia térmica como para a produção de metanol propriamente dita.

Em ambas as rotas metílica e etílica, verifica-se que as emissões devido ao subsistema de transporte e de produção de biodiesel apresentam pouca relevância frente aos demais subsistemas.

Consumo de insumos energéticos. A análise da demanda por insumos energéticos pode utilizar como referência qualquer fluxo de entrada ou de saída que componha o inventário do sistema do produto. Assim, entre os recursos energéticos que serão analisados estão o petróleo, o gás natural e o carvão, todas fontes não renováveis de energia, responsáveis por atender a mais de 50 % da matriz energética brasileira e mais de 80 % do consumo mundial de energia (EPE, 2015). Além da importância de caráter econômico, o uso destes recursos contribui de forma significativa para a emissão de poluentes de caráter local ou global, como, por exemplo, a emissão de hidrocarbonetos e CO₂, que contribuem para formação de smog e aumento do efeito estufa.

Nesta análise, para o cálculo do consumo material de gás natural total, considerou-se a inclusão de gás natural cru, que teve sua quantidade em m³ convertida a massa, e de gás natural utilizado como fonte de energia, que também teve sua quantidade em MJ convertida a massa. Tais conversões foram feitas com base nos dados de densidade igual a 0,740 kg/m³ (EPE, 2013) e de poder calorífico igual a 38 MJ/kg (RIBEIRO, 2009).

Os dados mostram que o principal consumo da rota metílica alcalina é o de gás natural, que não só é utilizado em grande quantidade para produção de energia térmica nas unidades de processamento, mas, principalmente, como matéria-prima para produção de metanol (nas respectivas proporções de 96 % e 4 %). Em ambas as rotas, o consumo de petróleo é expressivo. Ele se deve principalmente à etapa agrícola. Como para na via etílica se incorporou também a etapa de produção da cana-de-açúcar e como não há produção de metanol, este passa a ser, com grande diferença, o principal insumo energético.

Tabela 5: Perfil de consumo de recursos materiais por rota produtiva. (%)

Rota	Petróleo	Gás natural	Carvão	Total
Metílica (GO)	23,2%	76,0%	0,8%	100%
Metílica (RS)	24,1%	75,1%	0,8%	100%
Etílica (GO)	89,9%	7,0%	3,1%	100%
Etílica (RS)	90,6%	6,6%	2,8%	100%

Caso a energia térmica utilizada no subsistema de produção de metanol não fosse à base de gás natural, esta seria proveniente de alguma outra fonte material, o que manteria o consumo da rota metílica superior ao da etílica. Neste caso específico haveria a redução do consumo de gás natural, porém seria aumentado o da fonte substituta, por exemplo, o petróleo, se fosse utilizado óleo diesel.

Quanto às diferenças de localidade, não foi observada variação significativa quando se considera os Estados de Goiás e Rio Grande do Sul (no máximo 0,01 %, que foi verificado na rota etílica).

As diferenças referentes às localidades influenciam somente nos subsistemas de transporte e nas etapas de transporte inseridas nos demais subsistemas. Isto ocorre em função do maior consumo de óleo diesel e, conseqüentemente, dos materiais envolvidos na produção deste combustível.

No caso do subsistema de transporte, as distâncias referentes à movimentação do biodiesel para a base de distribuição, nas duas rotas, e da soda até a usina de biodiesel, na rota metálica, apresentam pequenas variações quando se compara as unidades instaladas em Goiás e no Rio Grande do Sul. Contudo, quando se analisa as distâncias que precisam ser percorridas para que os alcoóis sejam entregues nas usinas, as diferenças entre os Estados analisados se mostraram maiores, principalmente para a rota etílica.

Especificamente em relação ao petróleo, observa-se que há um consumo ligeiramente maior quando a usina de biodiesel está localizada, em ambas as rotas, no Estado do Rio Grande do Sul. Isto ocorre porque, em todas as rotas analisadas, o principal consumo de petróleo se deve à mecanização do subsistema de produção do óleo de soja (SPO), que contempla a produção agrícola da soja. Este subsistema apresenta um consumo cerca de 2,5 vezes maior de óleo diesel (e consecutivamente de petróleo) nas etapas de transporte de fertilizante e de calcário quando a usina é instalada no Rio Grande do Sul, devidos às maiores distâncias que deverão ser percorridas.

Os subsistemas que envolvem etapas agrícolas, tanto para a produção da cana-de-açúcar como para a produção de soja, também consomem gás natural em quantidades razoáveis (aproximadamente, 7 kg/1.000 kg biodiesel), o qual é utilizado na produção de energia e como matéria-prima na produção de fertilizantes. Entretanto, a demanda deste insumo pelo SPM requer uma quantidade superior deste recurso (aproximadamente, 500 kg/1.000 kg biodiesel).

Adicionalmente, deve-se dar destaque, também, ao consumo de petróleo no subsistema de transporte (ST) e no subsistema de produção de biodiesel (SPB), que se encontra entre 20 e 30 kg/1.000 kg biodiesel. No SPB, esta demanda está relacionada à produção de energia elétrica e, principalmente, térmica por meio do consumo de óleo diesel. Quanto ao consumo de carvão, este se apresenta em pequenas quantidades envolvidas na geração de energia elétrica e produção de óleo diesel.

Como mencionado, na rota metálica todos os recursos, exceto o gás natural, apresentam seu maior consumo no SPO. No caso do petróleo, isto ocorre porque este recurso está presente na produção de defensivos, fertilizantes, calcário, energia elétrica, no consumo de óleo diesel para uso nos maquinários agrícolas e no transporte de calcário e fertilizante. Vale citar que no SPO, além da contribuição da etapa agrícola, também está incluída a energia elétrica e térmica (base óleo combustível) necessárias para a etapa de processamento e obtenção do óleo de soja.

A presença do petróleo no SPB está relacionada à geração de energias elétrica e, principalmente, térmica, a qual foi considerada como obtida por meio da queima de óleo diesel. Já o consumo de carvão nos subsistemas de produção de soda (SPS) e de metanol (SPM) está relacionado à quantidade de energia elétrica utilizada.

No caso da rota etílica, os maiores consumos continuam a ser representados pelo SPO, pelos mesmos motivos apresentados na análise da rota metálica. Contudo, neste caso, como não há influência do SPM, o principal consumo de gás natural se verifica somente nos dois subsistemas que apresentam contribuições agrícolas (o subsistema de produção de óleo de soja e o de produção de etanol), nos quais este insumo apresenta sua participação mais significativa na produção de fertilizantes.

A diferença observada para o consumo de gás natural e petróleo no ST nas duas localidades avaliadas para o caso da rota etílica pode ser explicada em função do maior deslocamento envolvido quando a usina se encontra no Rio Grande do Sul (o que proporciona um maior consumo de óleo diesel para esta

localização). Neste contexto, vale citar que o gás natural contribui para produção de óleo diesel por meio da geração do hidrogênio, insumo necessário ao processo de hidrotratamento no refino.

Conclusões

Neste trabalho, foi realizada uma análise do ciclo de vida do biodiesel, desde as etapas de produção dos insumos até a distribuição do produto final. Foram comparados os desempenhos ambientais de duas rotas para produção de biodiesel: a via metílica alcalina e a via etílica enzimática. Os inventários usados como base para o estudo foram montados com base em informações disponíveis na literatura. A análise considerou a produção de biodiesel no Brasil, considerando que as unidades produtoras de biodiesel poderiam estar localizadas nos Estados de Goiás e do Rio Grande do Sul.

Os resultados referentes ao consumo de materiais e à avaliação das categorias de potencial de impacto indicaram que a rota metílica teve como destaque o fato de apresentar elevado consumo de gás natural. Este foi o principal fator responsável pelo resultado ruim apresentado na categoria UE e pode ser considerado um gargalo significativo que precisa ser tratado para que esta rota possa apresentar melhoria em seu desempenho ambiental.

Como a etapa agrícola da soja se destacou como a de maior contribuição para os impactos ambientais apresentados para cada uma das categorias analisadas, esta também pode ser tratada como um gargalo inerente à produção de biodiesel. Neste caso, este gargalo aplica-se às duas rotas avaliadas. Deve-se sempre buscar o aprimoramento das tecnologias envolvidas no manejo agrário e na produção de fertilizantes, visto que estas são as etapas que contribuíram mais significativamente para o resultado observado no subsistema de produção de óleo de soja.

Outro aspecto verificado foi o maior potencial de impacto apresentado para a rota etílica na categoria PFOF. Este resultado está ligado à quantidade significativa de hidrocarbonetos gerados pela queima incompleta da palha no subsistema de produção de cana-de-açúcar. Para sua mitigação, é importante que técnicas agrícolas que minimizem a necessidade desta queima sejam gradativamente adotadas.

Observou-se também que as diferenças decorrentes da localização influenciaram os dados do ACV por meio do subsistema de transporte, mas se mostraram pouco significativas diante do todo.

Em geral, apesar dos gargalos apresentados, por meio da análise individual do potencial de impacto de cada categoria e, também, por meio da verificação dos indicadores ambientais calculados, observa-se que, dadas as considerações adotadas neste trabalho, a rota etílica enzimática se destaca como a tecnologia de melhor desempenho ambiental.

Neste contexto, diante da tendência à adoção de soluções sustentáveis, a busca pela viabilidade econômica desta via de produção de biodiesel se faz bastante interessante do ponto de vista ambiental. Para isso, propõe-se uma investigação mais profunda sobre as formas de aumentar a produtividade e a resistência do catalisador enzimático, bem como o levantamento de informações que viabilizem o uso dos dados relacionados a este tipo de catalisador durante uma análise de ACV. Isto é importante com o objetivo de minimizar os efeitos que as simplificações adotadas podem causar sobre os resultados.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA NETO, J. A.; ROBRA, S.; CRUZ, R. S.; BARRETO, T. **Aspectos ambientais de produção comercial de biodiesel comercial a partir de diferentes matérias-primas na Bahia**. In: Congresso Brasileiro de Mamona, Temática: Energia e Ricinoquímica, Salvador/BA, 2008.

CASTRO, B. C. S. **Otimização das condições da reação de transesterificação e caracterização dos rejeitos dos óleos de fritura e de peixe para obtenção de biodiesel.** Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2009.

CAVALCANTE, R. M. **Predição da densidade de biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas. Dissertação de mestrado em tecnologia de processos químicos e bioquímicos,** Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2010.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Efeito estufa e sequestro de carbono em sistemas de cultivo com espécies florestais e na cultura de cana-de-açúcar.** Documento nº 133, ISSN 1517-8498, 2001.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional,** 2013.

KNOTHE, G., GERPEN, J. VAN, KRAHL, J. **The Biodiesel Handbook.** AOCS Press, Champaign/IL, Estados Unidos, 2005.

MAGALHÃES, S. P., PESSOA, F. L. P., ALVES, T. L. M. Production of Biodiesel via Enzymatic Palm Oil Ethanolysis: Kinetic Study. **Comput. Aided Chem. Eng.**, v. 37, p. 539–544, 2015.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Secretaria de produção e agroenergia. Estatísticas. **Evolução da produtividade da cana-de-açúcar no Brasil por regiões e por Estados produtores,** 2013.

MELLO, M. C. S. de; VILLARDI, H. G. D.; YOUNG, A. F.; PESSOA, F. L. P.; SALGADO, A. M. Life cycle assessment of biodiesel produced by the methylic-alkaline and ethylic-enzymatic routes, **Fuel**, v. 208, p. 329-336, 2017.

MARZULLO, R. C. M. **Análise de ecoeficiência dos óleos vegetais oriundos da soja e palma, visando a produção de biodiesel.** Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2007.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados.** Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2009.

SALLABERRY, R. R. **Emprego da avaliação do ciclo de vida para levantamento dos desempenhos ambientais do biodiesel de girassol e do óleo diesel.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2009.

SUGAWARA, E. T. **Comparação dos desempenhos ambientais do B5 etílico de soja e do óleo diesel por meio da avaliação de ciclo de vida (ACV).** Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2012.

VIANA, M. M. **Inventário ao ciclo de vida do biodiesel etílico do óleo de girassol.** Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2008.

VIANNA, F. C. **Análise de ecoeficiência: avaliação do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e do petrodiesel.** Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

YOUNG, A. F., PESSOA, F. L. P., QUEIROZ, E. M. Comparison between Biodiesel Production from Soybean Oil and Palm Oil with Ethanol: Design and Economic Evaluation. **Chem. Eng. Trans.**, v. 43, p. 325–330, 2015.