

# Síntese do biodiesel: pensando processos mais verdes para a produção de energia renovável

MELO, Jocelene Reis de  
STADLER, João Paulo  
CHENDYNSKI, Letícia Thaís  
SANDRI, Marilei Casturina Mendes  
GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

## Resumo

A matéria graxa para a produção de biodiesel pode ser obtida de plantas e animais e, em uma postura ainda mais sustentável, pelo uso de óleo de frituras, fornecendo um emprego alternativo a esse resíduo. Ainda assim, a produção de combustível renovável e o seu uso como fonte de energia causam impactos ambientais devido a formação de subprodutos e emissão de poluentes. Nesse sentido, como forma de repensar a produção do biodiesel, a Química Verde (QV) se apresenta como uma metodologia de adaptação com o objetivo de melhorar a segurança à saúde e ao meio ambiente, além de possibilitar a economia de recursos e a minimização da formação de resíduos. Nessa perspectiva, objetivando verificar as dimensões que poderiam ser melhoradas para uma síntese mais verde de biodiesel, esse trabalho apresenta a síntese e a avaliação de verdura química de um protocolo clássico e uma proposta mais verde, podendo ser desenvolvida em aulas de Química e adaptada para a escala industrial. Para isso, fez-se o uso de métricas holísticas e de massa, que indicaram a substituição de metanol por etanol e ácido acético 4% e 39,88 % para síntese e isolamento do biodiesel, além do trabalho em temperatura ambiente e o emprego dos resíduos em uma formulação de sabão. Como resultados, têm-se bons rendimentos e se atende integralmente os princípios P1, P2, P5, P6, e P8, P9 e P10 e parcialmente o P7 da QV, podendo ser uma excelente alternativa para aulas experimentais de Química ou áreas afins.

**Palavras chave:** Transesterificação; Óleo residual; Biodiesel metílico; Biodiesel Etilico; Química Verde; Ensino Superior.

## Abstract

The fatty matter for the production of biodiesel can be obtained from plants and animals and, in an even more sustainable approach, through the use of frying oil, providing an alternative use for this waste. Still, the production of renewable fuel and its use as an energy source cause environmental impacts due to the formation of by-products and emission of pollutants. In this sense, as a way of rethinking biodiesel production, Green Chemistry (GC) presents itself as an adaptation methodology with the aim of improving health and environmental safety, in addition to enabling resource savings and minimizing waste formation. From this perspective, aiming to verify the dimensions that could be improved for a greener synthesis of biodiesel, this research presents the synthesis and evaluation of chemical greenness of a classic protocol and a greener proposal, which can be developed in Chemistry classes and adapted for industrial scale. For this, holistic and mass metrics were used, which indicated the replacement of methanol by ethanol and acetic acid 4% and 39.88% for the synthesis and isolation of biodiesel, in addition to working at room temperature and the use of residues in a soap formulation. As a result, good performance is achieved and the principles P1, P2, P5, P6, and P8, P9 and P10 are fully met and P7 of GC is partially met, and can be an excellent alternative for experimental classes in Chemistry or related areas.

**Keywords:** Transesterification; Residual oil; Methyl biodiesel; Ethyl Biodiesel; Green Chemistry.

## Resumen

La grasa para la producción de biodiésel puede obtenerse a partir de plantas y animales y, en un enfoque aún más sostenible, mediante el uso de aceite de fritura, proporcionando un uso alternativo para este residuo. Aún así, la producción del combustible renovable y su uso como fuente de energía causan impactos ambientales debido a la formación de subproductos y a la emisión de contaminantes. En este sentido, como forma de replantear la producción de biodiésel, la Química Verde (CG) se presenta como una metodología de adaptación con el objetivo de mejorar la seguridad sanitaria y medioambiental, así como posibilitar el ahorro de recursos y minimizar la formación de residuos. Desde esta perspectiva, con el objetivo de verificar las dimensiones que podrían mejorarse para una síntesis más verdes del biodiésel, este trabajo presenta la síntesis y evaluación del verdor químico de un protocolo clásico y de una propuesta más verde, que puede desarrollarse en las clases de química y adaptarse a escala industrial. Para ello, se utilizaron métricas holísticas y de masa, que indicaron la sustitución del metanol por etanol y ácido acético 4% y 39,88% para la síntesis y aislamiento del biodiesel, así como el trabajo a temperatura ambiente y la utilización de los residuos en una formulación de jabón. Los resultados muestran buenos rendimientos y total cumplimiento de los principios P1, P2, P5, P6, P8, P9 y P10 y parcialmente del P7 del QL, pudiendo ser una excelente alternativa para clases experimentales de química o áreas afines.

**Palabras clave:** Transesterificación; Aceite usado; Biodiésel metílico; Biodiésel etílico; Química verde; Enseñanza superior.

## INTRODUÇÃO

Desde 1970 o Brasil vem incentivando o desenvolvimento de fontes energéticas alternativas e somente a partir do século XXI foi incorporado o programa do biodiesel constituindo-se em fonte renovável de energia. Entre 2005 e 2007 tornou-se obrigatório no território nacional a adição de 2% de biodiesel (B2) ao óleo diesel, derivado do petróleo. Entre 2008 a 2013 foram aumentados para 5% (B5) de biodiesel misturado ao óleo diesel mineral (Mattei, 2010). De acordo com a Resolução CNPE nº 16 de 29 de outubro de 2018, a meta era atingir a substituição do diesel por biodiesel em 15% até 2023 (CNPE, 2018). Entretanto, complicações originadas pela pandemia do COVID-19 acarretaram a redução temporária do percentual obrigatório para 10 % (Brasil, 2022), porém há a previsão de alcançar 15% em 2026 (CNPE, 2023). O Brasil é considerado uma referência internacional por substituir as fontes fósseis por alternativas renováveis (Maintinguer, 2022).

O biodiesel é vantajoso por ser um produto renovável, biodegradável, não tóxico, reduz determinadas emissões poluentes como dióxido de carbono, monóxido de carbono e partículas; reduz a dependência energética do petróleo bruto, origina subprodutos utilizáveis, pode ser utilizado puro ou misturado, promoção do desenvolvimento da agricultura nas zonas rurais mais desfavorecidas. Ainda, são necessários estudos para diminuir as principais desvantagens: capacidade de produção limitada, pois depende das áreas agrícolas disponíveis, escassez de postos de reabastecimento, baixa eficiência do motor, preço elevado. Novas tecnologias poderão permitir reduzir os custos de produção, o que pode provocar competição com a produção de bens alimentares (Silva; Freitas, 2008; Clemente *et al.*, 2023)

A produção de biodiesel pode ser realizada através de uma reação de transesterificação, podendo utilizar óleo vegetal, gordura animal e também óleos/gorduras residuais, álcool e um catalisador. Além disso, as condições de tempo de reação e temperatura também devem ser controladas, pois variam de acordo com a matéria-prima empregada (Mantovani *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2011; Branco *et al.*, 2024; Angilelli; Mantovani; Chendynski, 2022). Dentre os álcoois mais utilizados na produção desse biocombustível está o metanol, por ter um bom rendimento e menor tempo de reação. Entretanto, outros álcoois também podem ser utilizados, tais como, etanol, propanol e álcool isopropílico (Geris *et al.*, 2007).

Na transesterificação em meio alcalino, o íon metóxido, obtido da reação entre metanol e uma base alcalina, é um bom nucleófilo para reagir com o carbono eletrofílico do triacilglicerídeo, sendo

bastante utilizado na indústria de biodiesel devido a cadeia carbônica menos volumosa, o que acelera a reação de transesterificação (Angilelli; Mantovani; Chendynski, 2022, p.14). Outro fator que contribui para a utilização do metanol em larga escala está relacionado ao seu baixo ponto de ebulição (65 °C), facilitando a recuperação do seu excesso, geralmente realizado por destilação. Além disso, o preço do metanol é mais baixo no mercado internacional em relação ao etanol anidro (Ramos *et al.*, 2016; Pinheiro, 2021).

Já o uso de álcoois de maior massa molar, como o etanol por exemplo, é pouco expressivo na indústria de biodiesel, pois gera um nucleófilo mais volumoso, com maior impedimento estérico, dificultando a reação de transesterificação devido a diminuição na eficiência da quebra da molécula do triacilglicerídeo em éster e glicerol. Além disso, ao final da síntese do biodiesel, a separação da glicerina por vezes é incompleta, havendo necessidade de reagentes auxiliares para seu isolamento, e mesmo assim, a purificação do biodiesel pode não acontecer de forma completa devido a formação de emulsões estáveis. Além disso, a temperatura de ebulição do etanol (78 °C) é levemente mais alta do que a do metanol e a recuperação do seu excesso é dificultada pela a formação de azeótropos, não sendo possível separá-las por destilação simples (Ramos *et al.*, 2016; Pinheiro, 2021).

Quanto aos catalisadores, os mais utilizados são os de natureza química e podem ser ácidos ou básicos. Dentre os ácidos pode-se citar o ácido sulfúrico e o ácido clorídrico, porém a transesterificação feita com catalisadores ácidos é de cinética mais lenta do que quando realizada com catalisadores básicos, como por exemplo o hidróxido de sódio, hidróxido de potássio, metóxido de sódio. Ainda, catalisadores heterogêneos como óxido de magnésio, dióxido de cério, óxido de zinco, óxido de alumínio e dióxido de titânio também podem ser empregados (Angilelli; Mantovani; Chendynski, 2022). Ainda, há catalisadores enzimáticos como as lipases que podem ser obtidas através de fontes animais, vegetais e microbianas. Contudo, esses catalisadores apresentam desvantagens em relação a custos, mas quando o processo é otimizado apresentam vantagens ao serem comparados com o processo químico (Ramos *et al.*, 2011).

A Química Verde (QV) é compreendida como o desenho, desenvolvimento e implementação de processos e produtos químicos para reduzir ou eliminar o uso ou geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao ambiente, comumente encontrada em aplicações industriais, principalmente em países com controle mais rigoroso na emissão de poluentes (Lenardão *et al.*, 2003, Machado, 2014). Além disso, a QV também está sendo implantada ao meio acadêmico para que processos químicos que

geram problemas ambientais sejam substituídos por alternativas que causem menores prejuízos físicos, humanos e ambientais. Os processos da QV são divididos em três classes:

- I) A utilização de fontes renováveis ou recicladas de matéria-prima;
- II) A ampliação da aplicação de energia ou também usar menos energia para se produzir a mesma ou ainda maior quantidade de produto;
- III) Evitar o uso de substâncias persistentes, bioacumulativas e tóxicas (Lenardão *et al.*, 2003, Machado, 2011).

Yunes e Marques (2023) discutem a necessidade de abranger a Química Verde no Ensino de Química, apesar de ela ter pouco mais de 40 anos presentes na formação do químico. As razões para essa inclusão visa a formação de profissionais para assumir sua responsabilidade em: lidar com a poluição; comunicar a comunidade sobre suas pesquisas; participar da construção de currículos de Ensino de Química; apresentar uma nova forma de relacionamento da Química com o ambiente; desenvolver uma prática química mais segura para os alunos e educadores; enquadrar a inovação e criatividade a partir de valores ambientais; abordar a crise ambiental e promover a sustentabilidade (Yunes; Marques, 2023). De acordo com Pimenta, Gomes e Sandri (2018), inserir a QV na graduação, principalmente em aulas experimentais, possibilita a reflexão do estudante sobre as suas atitudes e tomadas de decisões cotidianas que podem ser benéficas ou maléficas ao meio ambiente.

Nesse contexto, acredita-se que as aulas práticas de Química no Ensino Superior, especialmente em disciplinas de Química Orgânica, componentes tecnológicos e até mesmo no Ensino Técnico e Educação Básica podem ser um elo para a inserção dos princípios da Química Verde. A síntese do biodiesel pode ser contemplada durante o ensino de reações de transesterificação (Geris *et al.*, 2007), sendo uma atividade experimental interessante, uma vez que o processo de obtenção do biodiesel permite a contextualização da temática de biocombustíveis e sua implicação com a Ciência, Tecnologia, Sociedade e com o Meio Ambiente, possibilitando que os educandos percebam a necessidade de buscar novas alternativas para suprir a demanda energética (Friedrich *et al.*, 2019).

De acordo com Geris *et al.* (2007), a síntese permite identificar e compreender a reação de transesterificação; evidenciar a diferença entre as propriedades do óleo de soja e do biodiesel em termos de relações entre estrutura, massa molar, volatilidade e inflamabilidade. Ainda, possibilita a discussão da diferença entre rendimento teórico e experimental do biodiesel e os fatores que interferem nessas diferenças, assim como reconhecer os reagentes limitantes e em excesso do processo.

A literatura apresenta uma variedade de protocolos que tratam do processo de obtenção de biodiesel com ênfase ao Ensino. Uma técnica comum e consideravelmente rápida para uma aula experimental é a produção de biodiesel através da rota metílica (Geris, *et al.*, 2007; Azevedo *et al.*, 2013). Contudo, devido à toxicidade deste álcool, é necessário um cuidado redobrado na sua produção, principalmente em espaços que não possuem uma boa instalação e ventilação e os equipamentos de proteção individual (Assis, 2010; Azevedo *et al.*, 2013). O metanol pode levar indivíduos expostos a diversos males como cegueira, paralisção e morte. Além disso, o metanol é produzido a partir de gases de combustão do carvão e grande parte provém do gás metano, um combustível fóssil, diminuindo as características de verdura e de sustentabilidade da síntese desse biocombustível (Renó *et al.*, 2011).

Nesse sentido, este estudo buscou apresentar uma alternativa para a produção de biodiesel com uma abordagem mais verde e sustentável e que seja exequível em Cursos de Graduação, em Cursos Técnicos ou até mesmo em aulas práticas de Química na Educação Básica. Uma possibilidade vislumbrada foi a substituição do metanol por etanol, um álcool menos tóxico, de origem vegetal e renovável. Entretanto, a transesterificação etílica não é tão favorável quanto a metílica, apresentando como pontos fracos o menor rendimento e baixa velocidade de reação. Assim, para melhorar o processo de síntese é necessário um maior tempo de reação, uso do etanol em excesso e maiores temperaturas, envolvendo um maior gasto energético, assim como maiores gastos no processo de purificação final do produto (Rade, 2015; Pinheiro, 2021).

Considerando a problemática apresentada em relação a toxicidade do metanol, as implicações da substituição deste álcool por etanol e a importância do tema para a formação dos estudantes da Química e áreas correlatas, este estudo propõe a avaliação da verdura química da síntese de Biodiesel com metanol e com etanol por meio de métricas da Química Verde e apontamentos para que a técnica de maior verdura seja exequível em aulas experimentais. Além disso, o artigo também se apresenta como um grande estimulador para iniciativas de inserção da Química Verde no Ensino Superior, cada vez mais necessário para formação de profissionais mais conscientes e preparados para resolução de problemas ambientais voltados aos processos de síntese.

## **METODOLOGIA**

Neste trabalho, as métricas da QV foram utilizadas para avaliar a verdura química de uma técnica tradicional usada para síntese de biodiesel metílico, visando o reconhecimento das

potencialidades e limitações em atender aos princípios da Química Verde conforme propõem os autores Machado (2014), Sandri, Gomes e Bolzan (2018), Stadler e Gomes (2023). A pesquisa também tem por objetivo apresentar um protocolo experimental com uma rota sintética mais verde. Para isso, seguiu-se as seguintes etapas:

- 1) Inventário de todos os reagentes da rota metilíca;
- 2) Análise interna *à priori* (antes das sínteses de laboratório) para a construção da Matriz Verde (MV) da rota sintética do biodiesel metilíco e análise externa da MV com proposta de uma rota sintética de biodiesel etílico (em resultados), visando aplicar as oportunidades vislumbradas e pontuar melhoria no que concerne sobre a verdura química do processo;
- 3) Avaliação da estequiometria das reações e cálculos de massa da QV (dados teóricos realizados *a priori* para avaliar a MV);
- 4) Produção de biodiesel metilíco e biodiesel etílico, purificação e testes para identificação, cálculos de rendimento e de massa da QV com os dados experimentais;
- 5) Projeção da Estrela Verde (EV) das rotas sintéticas do Biodiesel e outras possibilidades previstas para o tratamento dos resíduos gerados, objetivando facilitar a visualização comparativa da verdura química dos procedimentos explorados no trabalho.

## **1. Inventário das substâncias envolvidas na síntese de biodiesel**

Para a análise da verdura do protocolo experimental, inicialmente inventariou-se todas as substâncias envolvidas na síntese do biodiesel e buscou-se as informações de segurança dessas substâncias junto as Ficha de Informações Segurança de Produtos Químicos da Merck (MSDS - *Material Safety Data Sheet*) com o objetivo de identificar os códigos e frases de perigo para a saúde, físicos e ambientais. Além disso, verificou-se a degradabilidade e a renovabilidade de todas as substâncias e as condições experimentais (tempo de reação, temperatura e pressão) de acordo com Stadler e Gomes (2023).

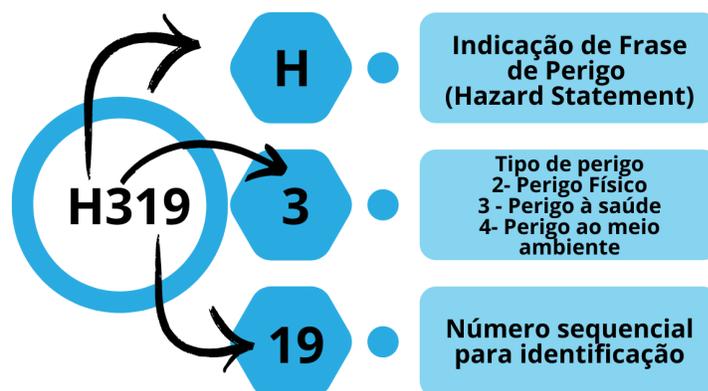
Em seguida, os perigos foram relacionados com o GHS (Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos) em que as pontuações correspondem aos seguintes graus de perigo: baixo (pontuação 1); moderado (pontuação 2); ou alto (Pontuação 3), conforme as instruções apresentadas por Ribeiro e Machado (2008), Stadler e Gomes (2023) e Yunes e Marques (2023).

## 2. Matriz Verde (MV)

O próximo passo consistiu na avaliação da análise interna da síntese do biodiesel empregando a Matriz Verde (MV), a qual se baseia em 10 princípios da Química Verde. Na sequência foi efetuado uma análise externa para identificar as oportunidades, que poderiam tornar a síntese mais verde e as ameaças, que poderiam comprometer o sucesso dos objetivos estabelecidos, propondo-se então uma nova MV (Sandri, Gomes e Bolzan e, 2018 ; Cavalheiro *et al.*, 2023; Stadler e Gomes, 2023).

As etapas para avaliação da MV com os critérios de análise são apresentados no Quadro 1. Importante destacar que a sigla inglesa GHS (*Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals*), que significa Sistema Mundial Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos está relacionada as frases de Perigo dos produtos Químicos. Conforme explicam Yunes e Marques (2023) essas frases são representadas por códigos, compostos pela letra H de *hazard* e uma sequência numérica que inicia com algarismo indicando o tipo de perigo (2 para riscos físicos, 3 para saúde e 4 para riscos ambientais), seguido por dois números correspondentes à numeração sequencial de perigos dentro da classe, conforme exemplificado na Figura 1. Ainda, de acordo com Ribeiro e Machado (2008) e a *United Nations* (2019), os códigos GHS recebem pontuação de malignidade máxima, moderada e mínima: pontuação 1 - perigo baixo ou não atribuído; 2 - perigo moderado; 3 - perigo elevado.

Figura 1: Estrutura da frase de perigo e seus códigos



Fonte: Adaptado de United Nations (2019); Yunes e Marques (2023).

**Quadro 1. Critérios para Análise da Verdura Química de Experimentos**

Critérios de Análise		Pontos Fortes	Pontos Fracos
Princípio 1 – Prevenção	1. Riscos físicos de todos os reagentes utilizados	Substâncias sem indicação de perigo físico ou perigo moderado (pontuação 2 na GHS)	Substâncias com indicação de perigo elevado (pontuação 3 na GHS)
	2. Riscos à saúde de todos os reagentes utilizados	Sem indicação de perigo baixo ou moderado à saúde (pontuação 2 na GHS)	Substâncias com indicação de perigo elevado (pontuação 3 na GHS)
	3. Riscos ao ambiente de todos os reagentes utilizados	Sem indicação de perigo para o ambiente	Substâncias tóxicas ao ambiente (pontuação 2 ou 3 na GHS)
	4. Geração de resíduos	Não se formam resíduos ou os resíduos gerados são inócuos.	São gerados resíduos e estes representam algum tipo de perigo físico, à saúde ou ao ambiente
	5. Fator E	Fator E $\leq 2$	Fator E $> 2$
P2- Economia Atômica	6. Uso de reagentes em excesso	Não utiliza	Utiliza
	7. % do excesso de reagente	$\leq 10\%$ de excesso	$> 10\%$ de excesso
	8. Economia Atômica (%)	$\geq 33,3\%$	$< 33,3\%$
P3- Síntese de Produtos menos perigosos	9. Riscos físicos, à saúde ou ambientais decorrentes dos produtos	Os produtos não representam qualquer tipo de perigo ou apresentam perigos baixos	O produto apresenta perigos físicos, a saúde ou ao ambiente, moderados ou severos
P5- Uso de solventes e outras substâncias auxiliares	10. Consumo de solventes e auxiliares além dos reagentes iniciais	Não se faz necessário o uso de solventes e auxiliares ou estes são inofensivos	Os solventes e/ou os auxiliares representam perigo moderado ou elevado para a saúde ou ambiente
	11. Consumo de água como solvente ou reagente	Não é utilizado ou o consumo é baixo ( $V \leq 50$ mL)	Consumo $> 50$ mL
	12. Consumo de água como facilidade (resfriamento/banhos)	Não é utilizado ou o consumo é baixo ( $V \leq 200$ mL)	Com consumo elevado ( $V > 200$ mL)
	13. Consumo de outros solventes ou auxiliares além da água	Não é utilizado ou o consumo é baixo ( $V \leq 50$ mL)	Consumo $> 50$ mL
P6 – Eficiência energética	14. Consumo de energia	Realiza-se a temperatura e pressão ambientes	Realiza-se em temperatura ou pressão diferentes da do ambiente
P7 – Uso de substâncias renováveis	15. Utilização de substâncias renováveis	Todas as substâncias são renováveis	Pelo menos uma das substâncias não é renovável
P8. Evitar a Formação de Derivados	16. Uso de grupos bloqueadores, ou mudanças temporárias que geram resíduos	Não se faz necessário o uso de bloqueadores	Pelo menos uma etapa exige o uso de bloqueadores
9. Catálise.	17. Utilização de catalisador	Não se faz necessário ou o catalisador não é nocivo	É necessário catalisador e este não é nocivo

	18. Tipo de catalisador (homogêneo/heterogêneo / biocatalisador)	Heterogêneo ou biocatalisador	Homogêneo
	19. Recuperação do catalisador	É possível reutilizar	Não é possível reutilizar
P10 – Planificação para a degradação	20. Uso de produtos degradáveis a produtos não nocivos	Todos os reagentes usados e produtos obtidos são degradáveis ou tratáveis para a degradação	Pelo menos uma das substâncias não é degradável ou gera substância nociva em sua decomposição
	21. Utiliza ou gera substâncias que podem ser reutilizadas em outras experiências ou recicladas após o uso	Utiliza	Não utiliza
P12 – Química intrinsecamente segura	22. Riscos de acidentes devido às substâncias envolvidas	Utiliza substâncias de perigo baixo ou moderado à saúde, ambiente e físico (pontuação 2 na GHS)	Utiliza substâncias de perigo alto à saúde, ambiente ou físico (pontuação 3 na GHS)
	23. Risco de acidente devido ao uso de equipamentos (centrífuga; estufa, mantas; evaporador rotativo, bomba de vácuo e banho termostaticado)	Com perigos baixos ou moderados	Com perigos elevados (Ex: banhos a altas temperaturas, mufas, prensas)
	24. Risco devido ao uso de outros materiais comuns	Com perigos baixos ou moderados (Ex: vidrarias comuns, termômetros, densímetros, multímetros, etc)	Com perigos elevados (Ex:gás; fogões; bicos de Bunsen; etc); termômetros de mercúrio

Fonte: Sandri, Gomes e Bolzan (2018); Cavalheiro et al., (2023); Stadler e Gomes (2023).

### 3. Estequiometria da reação de transesterificação e métricas de massa da QV

Para cálculos estequiométricos e de massa da QV determinou-se a massa molar (MM) de cada substância envolvida na reação de obtenção do biodiesel, a quantidade de matéria (n) em mols, a massa (m) em gramas, o reagente em excesso e o reagente limitante. A Economia atômica (AE) é determinada teoricamente (*à priori*), admitindo que as proporções dos reagentes são as estequiométricas e o rendimento é 100%. É também usada para determinar o grau máximo de incorporação dos reagentes no produto, métricas importantes para análise de verdura holística pela Matriz Verde (MV) e Estrela Verde (EV) (Machado, 2014). A eficiência de massa da reação (RME) indica a razão entre a massa do produto efetivamente obtido e a massa total de reagentes estequiométricos usados na reação, expressa em porcentagem. Já Eficiência de massa (ME) é uma métrica prática, cujo cálculo exige valores experimentais e é de aplicação à posteriori da execução das reações (Machado, 2014). O Quadro 2 apresenta as expressões e fórmulas das métricas de massa.

**Quadro 2. Métricas de massa**

Expressões	Fórmulas
AE	MM do produto/Soma das MM de todos os reagentes
RME	Massa do produto/Massa total de todos os reagentes estequiométricos
ME	Massa de produto/Massa total de todos os reagentes

Fonte: Machado (2014).

#### 4. Síntese do biodiesel metílico, purificação e testes

O protocolo do Quadro 3 com a técnica de produção de biodiesel metílico proposto por Geris e colaboradores (2007), foi avaliado inicialmente por meio da métrica MV, objetivando levantar aspectos que possibilitassem melhorias a verdura química.

**Quadro 3. Síntese e purificação do biodiesel metílico**

<p><i>A - Síntese do Biodiesel metílico</i></p> <p>- <b>Obtenção do metóxido de potássio:</b> Dissolver 1,5 g de hidróxido de potássio em 35 mL de metanol com o auxílio de agitação e controle de temperatura (45 °C).</p> <p>- <b>Reação de transesterificação:</b> Adicionar 100 mL do óleo de soja residual em um balão de óleo residual em um balão de fundo chato de 500mL; aquecer o óleo de soja em banho-maria sob agitação com o auxílio de uma barra magnética até atingir a temperatura de 45 °C. Em seguida, adicionar à solução de metóxido de sódio recentemente preparada; manter a mistura reacional por 10 min a 45 °C sob agitação; posteriormente, a mistura reacional deve ser transferida para um funil de separação de 250 mL para permitir a decantação e separação das fases. O tempo de espera para separação das fases é de 15 minutos).</p> <p><i>B - Purificação do Biodiesel (Procedimento para as lavagens)</i></p> <p>- Se o pH do biodiesel estiver maior que 7, lavar com 50 mL da solução aquosa, de ácido clorídrico a 0,5% (v/v); Em seguida, realizar lavagem com 50 mL de solução saturada de cloreto de sódio e, finalmente, com 50 mL de água destilada. A ausência do catalisador básico no biodiesel pode ser confirmada através da medida do pH da última água de lavagem (pH próximo a 7). Quando houver a formação de emulsão, a mesma pode ser desfeita com auxílio de um bastão de vidro, agitando-se lentamente a camada emulsificada; Tempo gasto para os procedimentos de lavagem varia de 30 minutos à 1 hora e 30 minutos. Para remoção dos traços de umidade, adicionar sulfato de sódio anidro ao biodiesel e filtrar.</p> <p><i>C - Determinação do Rendimento</i></p> <p>- Determinar o rendimento a partir da estequiometria da reação. Partindo da massa molar média do óleo de soja ou para fins didáticos, selecionar um dos ésteres constituintes do óleo de soja, por exemplo a trimestina.</p> <p><i>D - Determinação da densidade</i></p> <p>- Para determinação da densidade utiliza-se a técnica a relação entre massa e volume do biodiesel. Medir exatamente determinado volume da amostra (10 mL) com auxílio de uma proveta de 10 mL ou um picnômetro, com posterior determinação da massa e cálculo da densidade.</p> <p><i>E - Teste de combustão</i></p> <p>- Utilizar cadinhos ou cápsulas de porcelana contendo chumaços de algodão embebidos com óleo de soja e biodiesel. Como fonte de calor para promoção da combustão pode-se usar um palito de fósforo.</p> <p><i>F - Teste de solubilidade do biodiesel com água, etanol e hexano e comparação com a solubilidade do óleo alimentar utilizado</i></p> <p>- Colocar em dois tubos de ensaio cerca de 2 mL água identificados com as letras A e B. Repetir para etanol absoluto e hexano; Adicionar uma pequena quantidade de produto obtido ao tubo de ensaio A e de óleo residual ao tubo de ensaio B. Agitar vigorosamente. Tirar conclusões quanto à miscibilidade das duas substâncias nos diferentes solventes.</p> <p><i>G - Cor e aspecto</i></p> <p>- O Biodiesel aparece como um líquido límpido de coloração amarela.</p>
---

Fonte: adaptado de Geris *et al.*, (2007).

## 5. Estrela Verde (EV)

O procedimento analítico para determinação da estrela verde foi realizado utilizando as planilhas do Excel<sup>®</sup> propostas por Ribeiro e Machado (2008), disponíveis no site da Universidade do Porto (Portugal), com acesso direto no Link: <http://educa.fc.up.pt/pedagogiadaquimicaverde/>.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Inventário e Análise Externa e Interna da Matriz Verde

Para fins didáticos, apresenta-se os códigos de perigo das substâncias utilizadas na síntese do biodiesel com a sua respectiva pontuação GHS, indicadas na análise de verdura, nos Quadros 4, 7 e 11: **Metanol e etanol** - H225- Líquido e vapores altamente inflamáveis (GHS 3); **Metanol** - H301+ H311+ H331- tóxico se ingerido, em contato com a pele ou se inalado (GHS 3) e H370 - Provoca danos aos órgãos - Olhos, Sistema nervoso central, (GHS 3); **Soluções diluídas de ácido acético** - não apresentam perigo; **Hidróxido de potássio e Hidróxido de sódio** - H290- Pode ser corrosivo para os metais (GHS 2), H302 - nocivo se ingerido (GHS 2), H314 - provoca queimadura severa à pele e dano aos olhos (GHS 3), H402- nocivo para os organismos aquáticos (GHS 2) (MSDS, 2024).

No Quadro 4, apresenta-se a análise interna da MV da síntese de biodiesel obtido com metanol à temperatura ambiente, vislumbrando uma síntese mais verde e sustentável. Os resultados compreendem 24 critérios relacionados aos princípios da Química Verde, avaliados conforme recomendações de Sandri, Gomes e Bolzan (2018) e Stadler e Gomes (2023).

**Quadro 4. Análise Interna da MV para a síntese do Biodiesel Metílico**

Pontos fortes	Pontos fracos
8. Economia atômica maior que $\geq 33,3\%$ (AE = 88,7%)	1. Metanol com indicação de riscos físicos elevados (GHS 3).
9. O produto (biodiesel) apresenta riscos baixos ao ambiente.	2. Metanol e hidróxido de potássio com riscos elevados a saúde (GHS 3).
10. Não utiliza outros solventes ou auxiliares	3. Óleo residual de fritura, causa riscos ao meio ambiente (não é biodegradável).
11. Não utiliza água como reagente.	4. Geração de resíduos com perigo físico e a saúde (excesso de metanol 107,58%).
12. Não utiliza água com facilidade: 150 mL de água em banho maria.	5. Fator E teórico $> 2$ (aproximadamente 11,3 % de resíduos).
13. Não faz uso de solventes auxiliares.	6. Utiliza metanol.
16. Não faz uso de bloqueadores.	7. Excesso maior que 10% (107,58% de excesso de metanol).
21. realização de testes com o biodiesel gerado e tratamento dos resíduos.	14. Realiza-se em um tempo de 10 minutos em temperatura 45 °C.
23. Não utiliza equipamentos que possam causar acidentes.	15. Apesar do óleo de soja ser renovável o metanol não é renovável.

<p>24. Riscos baixos relacionados ao uso de vidrarias comuns e termômetro.</p>	<p>17. Uso de catalisador com riscos físicos e a saúde (KOH).                  18. Catalisador homogêneo para a produção do metóxido de potássio (não é possível recuperar).                  19. Não é possível reutilizar o catalisador (KOH).                  20. Pelo menos uma das substâncias não é degradável ou gera substância nociva em sua decomposição.                  22. Utiliza substâncias com perigo alto pra saúde (GHS 3)</p>
<p><b>10 pontos fortes</b></p>	<p><b>14 pontos fracos</b></p>

A MV da síntese do Biodiesel Metílico (Quadro 4) mostra um baixo grau de verdura (41,7 %), pois dos 24 critérios avaliados, apenas 10 são compreendidos como pontos fortes. Esse baixo índice de verdura ocorre principalmente pelo não atendimento do Princípio 1 - prevenção, avaliado pelos critérios 1 a 4, que indicam riscos físicos e riscos elevados à saúde e ao ambiente devido ao uso do metanol e hidróxido de potássio.

Assis et al. (2017) apresentou que a inalação de vapores é uma das principais exposições ocupacionais para os 42 trabalhadores da Usina de Processamento de Biodiesel Quixadá, no Ceará. Durante os processos diários de transesterificação, filtragem e lavagem do biodiesel, pré-tratamento de glicerina e recuperação do metanol, os trabalhadores estavam expostos a vapores dessa substância. Já as equipes de apoio operacional eram expostas nas atividades de limpeza de filtro e manutenção das linhas. Dos 27 funcionários que trabalhavam nessas seções, 71,42% relataram dores de cabeça e 42% apresentaram formigamento. Além disso, 40,5% demonstraram sintomas de irritabilidade e 35,7% relataram ansiedade, sendo estas queixas relacionadas a efeitos neurotóxicos da exposição ao metanol.

O Princípio 2 também foi atendido parcialmente, considerando que critérios 5, 6 e 7 não foram atendidos em razão do excesso de metanol (107,58%) e a formação de resíduos (38%), o que diminui a verdura química e a segurança do processo e aumenta a toxicidade. Já o critério 8 é considerado ponto forte por indicar consideráveis AE (88,7%) e ME (62%). Isso se deve ao fato de ser uma reação de substituição nucleofílica, que geralmente possui baixo rendimento (Luz *et al.*, 2019). Outro ponto fraco diz respeito ao critério 14, uma vez que o processo de obtenção do biodiesel é realizado a uma temperatura diferente da ambiental (45 °C), afetando a eficiência energética prevista pelo princípio 6. O critério 15 referente ao princípio 7, também não é atendido, considerando que o metanol não é um álcool renovável.

O uso de KOH como catalisador, não recuperável, com riscos físicos e à saúde, contribuiu para o não atendimento ao princípio 9 (critérios 17, 18 e 19). Em trabalhos futuros será avaliada a substituição do hidróxido de potássio por um catalisador heterogêneo de menor toxicidade com possibilidade de reuso, assim como a redução do excesso de etanol para alternativas de métodos mais verdes e viáveis economicamente. Em relação à química intrinsecamente segura, princípio 12 da Química Verde, observa-se que os riscos das substâncias relacionados aos critérios 20 e 22 são consideráveis.

Apresenta-se no Quadro 5, após a avaliação da verduza química do processo de síntese do biodiesel metílico, a análise externa da verduza que indica oportunidades para adaptação do método e as ameaças.

**Quadro 5. Análise Externa da síntese de Biodiesel Metílico**

Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"><li>- Redução do excesso de metanol.</li><li>- Substituição do metanol por etanol.</li><li>- Síntese do biodiesel etílico utilizando ácido acético 39,88 % (20 mL de ácido acético 99,7% e 30 mL de água) a temperaturas entre 50 à 60°C, conforme como Friedrich (2019).</li><li>- Proposta para adaptações da síntese etílica:</li><li>- Temperatura ambiente; utilização de vinagre (ácido acético 4 %); utilização dos resíduos para produção de sabão (CAVALHEIRO et al., 2023).</li><li>- Redução e/ou substituição do catalisador homogêneo por um catalisador heterogêneo;</li><li>- Redução do excesso de etanol.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- A redução do excesso de metanol na síntese do biodiesel não diminui os riscos à saúde.</li><li>- As substâncias envolvidas não são degradáveis a produtos inócuos.</li><li>- A substituição de metanol por etanol diminui perigos a saúde, mas não diminui os riscos físicos.</li><li>- A eliminação do etanol no biodiesel etílico consome mais energia que a remoção de etanol no biodiesel metílico.</li></ul>

A partir das oportunidades previstas na análise externa da MV (Quadro 5), propõe-se um protocolo para a síntese do biodiesel etílico (Quadro 6).

**Quadro 6. Protocolo mais verde para síntese do biodiesel etílico**

<ul style="list-style-type: none"><li>- <b>Obtenção do etóxido de potássio:</b> Em um erlenmeyer de 500 mL, contendo 5,0 g de hidróxido de potássio, adicionar 100 mL (79,8 g) de etanol e agitar magneticamente a temperatura ambiente até o desaparecimento completo do catalisador básico.</li><li>- <b>Reação de transesterificação:</b> Transferir 114,3 g de óleo residual de fritura, equivalente a 120 mL de óleo residual de fritura para o erlenmeyer de 500 mL e, submeter a agitação por 30 minutos à temperatura ambiente. Após esse tempo, adicionar ao meio reacional, sob agitação, vinagre (ácido acético 4 % e ácido acético 39,88%). Manter a agitação até a separação das fases. Interromper a agitação e transferir a mistura para um funil de separação de 500 mL.</li><li>- Purificação de acordo com Geris et al., (2007).</li></ul>
--

A possibilidade de substituição do metanol por etanol, um solvente menos tóxico à saúde e ao ambiente, renovável e de baixo custo, melhora em 4 pontos fortes a MV, ou seja, aumenta de 41,7% para 58,33% de verdura química (Quadro 7).

**Quadro 7. Análise Interna da MV da síntese do Biodiesel Etilico**

Pontos fortes	Pontos fracos
2. Etanol com riscos moderados à saúde (GHS 2). 4. Utilizar os resíduos do biodiesel para produção de sabão. 8. Economia atômica maior que $\geq 33,3\%$ (AE = 89,0%). 9. O produto (biodiesel) apresenta riscos baixos ao ambiente. 11. Não utiliza água como reagente na síntese. 10. Usa vinagre 4% como auxiliar que é inofensivo 12. Não consome água com facilidade. 13. Faz uso de vinagre como solvente auxiliares, mas o consumo é baixo ( $V \leq 50$ mL), 14. Realiza-se em um tempo de 30 minutos em temperatura ambiente. 16. Não faz uso de bloqueadores. 21. Utiliza (testes com o biodiesel gerado e tratamento dos resíduos). 23. Não utiliza equipamentos que possam causar acidentes. 24. Riscos baixos relacionados ao uso de vidrarias comuns e termômetro. 15. O óleo de soja e o etanol são renováveis.	1. Etanol com indicação de riscos físicos elevados (GHS = 3). 3. Óleo residual de fritura, causa riscos ao meio ambiente (não é biodegradável). 5. Fator E teórico $> 2$ (Aproximadamente 11,0% de resíduos) 6. Utiliza etanol em excesso (excesso de etanol 261,26 %) 7. Excesso maior que 10% (261,26 % de excesso de metanol). 17. Uso de catalisador com riscos físicos e a saúde (KOH). 18. Catalisador homogêneo para a produção do etóxido de potássio (não é possível recuperar). 19. Não é possível reutilizar o catalisador (KOH). 20. Pelo menos uma das substâncias não é degradável ou gera substância nociva em sua decomposição. 22. Utiliza substâncias com alto riscos (etanol, com GHS = 3).
<b>14 pontos</b>	<b>10 pontos</b>

Contudo, é importante enfatizar que a substituição de metanol por etanol implica em maior tempo de síntese (30 minutos) em comparação com a rota metílica (10 minutos), possibilidades na perda de rendimento pela formação de emulsão e maiores gastos energéticos nas etapas de purificação para eliminação do etanol, que deve ser feito em estufa, placas de aquecimento ou rotaevaporação sob pressão reduzida (Pinheiro, 2021). Entretanto, para atividades de ensino parece ser uma excelente possibilidade, uma vez que diminui danos à saúde ocasionados pela exposição ao metanol e permite explorar os princípios da Química Verde, de forma a possibilitar que o futuro profissional da Química ou áreas afins, repense os métodos de forma consciente, sustentável e ambientalmente benigna.

### **Síntese do Biodiesel Metílico do Biodiesel Etilico: Estequiometria da transesterificação, rendimento e métricas de massa**

*Estequiometria da reação*

O óleo de soja é constituído por uma mistura complexa de ácidos graxos e triacilglicerídios, com uma massa molar média de  $873,02 \text{ g.mol}^{-1}$  (Pinheiro, 2021). Para o estudo da reação de transesterificação proposto nesse trabalho, cálculos estequiométricos e cálculos de massa da Química Verde, considerou-se o uso de: 1 mol de trimesitina, um dos triésteres constituintes do óleo de soja de massa molar  $722 \text{ g.mol}^{-1}$ ; 3 mols de metanol/etanol e o hidróxido de potássio como catalisador básico em ambas as reações. Em razão dessa escolha, os cálculos apresentam pequenas variações em relação outros constituintes do óleo ou a massa molar média.

*Rendimento e métricas de massa da QV*

Na sequência, no Quadro 8, os resultados obtidos na síntese do Biodiesel com metanol e com etanol são comparados.

**Quadro 8. Rendimento (%), métricas de massa e propriedades do Biodiesel produzido com metanol e etanol**

<b>Biodiesel Metílico à uma temperatura de 45°C, tempo 10 minutos</b>							
<b>Rendimento (%)</b>	<b>AE (%)</b>	<b>RME (%)</b>	<b>ME (%)</b>	<b>Resíduos (%)</b>	<b>Densidade g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Combustão</b>	<b>Cor</b>
79,8	88,7	62,0	62,0	38,0	0,87	Excelente	Amarelo límpido
<b>Biodiesel Etílico à temperatura ambiente e isolamento realizado com ácido acético 39,88 % tempo 30 min.</b>							
<b>Rendimento (%)</b>	<b>AE (%)</b>	<b>RME (%)</b>	<b>ME (%)</b>	<b>Resíduos (%)</b>	<b>Densidade g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Combustão</b>	<b>Cor</b>
96,2	89,0	60,5	59,0	41,0	0,86	Excelente	Amarelo límpido
<b>Biodiesel Etílico à temperatura ambiente e isolamento com ácido acético 4 % (vinagre), tempo 30 min.</b>							
<b>Rendimento (%)</b>	<b>AE (%)</b>	<b>RME (%)</b>	<b>ME (%)</b>	<b>Resíduos (%)</b>	<b>Densidade g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Combustão</b>	<b>Cor</b>
93,7	89,0	48,0	47,0	53,0	0,88	Excelente	Amarelo límpido

Fonte: Autores (2023).

Em termos quantitativos/estequiométricos (Quadro 8), teve-se um rendimento de 79,8% de biodiesel metílico. O rendimento se apresentou um pouco abaixo do esperado devido ao emprego do óleo de soja como matéria-prima proveniente de descarte de frituras para que aumentasse a verduza do biodiesel obtido. Geris *et al* (2007) obtiveram um rendimento de 89,5 e 88%. Rabelo (2001) realizou reações de transesterificação em pequena escala para determinar o volume de metanol (35 mL) e a massa de hidróxido de potássio (1,5 g), tendo obtido o melhor rendimento de 93 %. Rossi *et al.*, (2018) apresentaram um rendimento de 98,45% para o biodiesel proveniente do óleo refinado; 98,10% utilizando óleo residual sem tratamento e 90,77% com óleo residual tratado (Geris et al., 2007).

O rendimento do biodiesel produzido pela rota etílica com ácido acético 39,88 % para isolamento à temperatura ambiente foi 96,2 %, possuindo variações de rendimento em diferentes testes

entre 85 a 96 %, enquanto utilizando vinagre (ácido acético 4%) para o isolamento foi de 93,7 % com variações de rendimento entre 70 e 93 %. As variações encontradas são justificadas pelo emprego do óleo residual de fritura sem tratamento prévio, uma vez que possui um alto teor de água e, conseqüentemente, de ácidos graxos livres (Nurtifri *et al.*, 2013). Os resultados foram superiores em comparação com rendimento em massa de 85,6% pela rota etílica de Pinheiro (2021) e 87% pela síntese de Gaio (2019).

Quanto as métricas de massa, a Economia Atômica (AE) foi de 88,7 % para o biodiesel metílico e 89,0% para o biodiesel etílico. Estes resultados mostram o valor máximo possível do grau de incorporação dos átomos reagentes no biodiesel obtidos a partir da estequiometria da reação *a priori*, admitindo um rendimento de 100%. Todavia a eficiência de massa da reação (RME), calculados *a posteriori*, indicam com bastante clareza a massa de átomos reagentes que são incorporados no biodiesel, uma vez que consideram a razão entre a massa biodiesel e a massa total de todos os reagentes estequiométricos, incluído o excesso do metanol e etanol. Dessa forma, os resultados do Quadro 3, indicam que o biodiesel metílico teve uma maior incorporação de átomos com um RME 62,0 %, enquanto o biodiesel etílico teve uma incorporação de 60,5 % da massa dos reagentes, utilizando ácido acético 39,88 %, contra um RME de 48 % quando usado o vinagre.

A Eficiência de Massa (ME) indica o valor real do grau de incorporação dos átomos dos reagentes no produto principal e é calculada pela razão entre a massa do biodiesel efetivamente obtido no laboratório pela soma da massa de todos os reagentes empregados na reação, inclusive o catalisador. A ME para o biodiesel metílico mostrou uma incorporação de 62% dos átomos reagentes no Biodiesel, sendo cerca de 38% da massa dos reagentes incorporada na massa final dos resíduos. Por outro lado, o biodiesel etílico isolado respectivamente com ácido acético 39,88 % e vinagre apresentou um ME de 59 % e 47 %.

A síntese do biodiesel etílico utilizando vinagre no isolamento apresenta uma ME um pouco inferior provavelmente devido às perdas ocorridas pela maior facilidade de formar emulsão em mistura com etanol e na etapa de purificação em meio aquoso. Ainda, a menor concentração de ácido acético resulta numa menor proporção em reação com a glicerina, responsável pela separação. A utilização de ácido acético na síntese do biodiesel etílico é importante para a produção de mono, di ou triacetatos de glicerol formados por meio da reação da glicerina com o ácido acético, considerando que um dos maiores problemas da rota etílica é a permanência de glicerina no biodiesel (Mota, Pestana, 2011; Pinheiro, 2021). De acordo com Mota e Pestana (2011, p. 421): “A seletividade para a reação de

acetilação do glicerol é fortemente influenciada pela razão molar, tempo de reação e a natureza do catalisador”.

Importante enfatizar que os valores de rendimento estequiométrico e as métricas de massa variam com o tipo de óleo utilizado e com perdas decorridas das lavagens para purificação, podendo haver formação de emulsões, além dos erros aleatórios ocorridos durante a síntese do biodiesel em aulas experimentais, pois os rendimentos geralmente variam muito em cada grupo de trabalho. Ainda, de acordo com Angilelli *et al.* (2022) quando o óleo vegetal possui alto teor de ácidos graxos livres, a catálise básica geralmente se torna inviável, devido à formação de sabão que consome o catalisador e cria emulsões. Isso dificulta a separação da glicerina e do biodiesel no final da reação, prejudicando as etapas de separação, lavagem e purificação. A água é outro fator agravante, pois a hidrólise dos ésteres gera a formação de ácidos graxos e, conseqüentemente, sabão. Nesses casos pode-se empregar catalisadores ácidos como o ácido sulfúrico e sulfônico (Ramos, 2011). Esses apontamentos podem ter sido a causa de o rendimento do biodiesel metílico ter apresentado um rendimento estequiométrico um pouco inferior ao biodiesel etílico (Quadro 8).

Quanto as características físicas, o biodiesel metílico e o etílico se apresentaram lípidos e com cor amarelo pálido. A densidade do biodiesel metílico foi 0,87 g/cm<sup>3</sup> e do biodiesel etílico variou de 0,86 g/cm<sup>3</sup> (isolamento com ácido acético 39,88 %) a 0,88 g/cm<sup>3</sup> (isolamento com vinagre). A densidade do biodiesel pode variar de 0,85 a 0,90 g/cm<sup>3</sup>, em função da temperatura e da composição da matéria graxa utilizada (Geris *et al.*, 2007; Rossi *et al.*, 2018). Ambos apresentaram excelente combustão quando comparada à combustão do óleo residual de fritura, que tem dificuldades para iniciar e manter a queima. Esse fato é explicado pela menor massa molecular do biodiesel (monoésteres) em relação aos triacilglicerídios do óleo de soja (Geris *et al.*, 2007).

Os resultados de solubilidade confirmam a reação de transesterificação do óleo de soja (triésteres) na produção de biodiesel metílico e etílico (monoésteres), uma vez que óleo é insolúvel em água e etanol e o biodiesel forma uma emulsão em água e é totalmente solúvel em etanol. A solubilidade do biodiesel em etanol é explicada pela menor massa molecular do biodiesel, maior semelhança de polaridade e interações de hidrogênio com o etanol (Quadro 9).

**Quadro 9 - Solubilidade do biodiesel em água, etanol e hexano**

Testes de solubilidade/solvente	Biodiesel metílico	Biodiesel etílico	Óleo de soja residual
Solubilidade em água	Insolúvel/Emulsão Separação lenta	Insolúvel/Emulsão Separação lenta	Insolúvel
Solubilidade em etanol	Solúvel	Solúvel	Insolúvel
Solubilidade em hexano	Solúvel	Solúvel	Solúvel

O processo de purificação do Biodiesel é necessário, uma vez que parte dos reagentes se convertem em coproduto (glicerina) e resíduo. O resíduo é constituído por água, biodiesel residual, catalisador, sabão, álcool, óleo não reagido e glicerina. Dessa forma, a água de lavagem não pode ser descartada no meio ambiente sem passar por um tratamento adequado (Pinheiro, 2021). O emprego destes resíduos para incorporação em formulações de sabões pode fornecer uma alternativa sustentável (Schwartz *et al.*, 2019). Quanto aos resíduos da água de lavagem do biodiesel, conforme previsto nas possibilidades, propõe-se sua adição em uma formulação de sabão para limpeza pesada (Quadro 10).

**Quadro 10. Protocolo para tratamento dos resíduos da lavagem do biodiesel: Produção de sabão**

**Procedimento experimental sabão:** Em um Béquer de 1 L colocar 125 g de NaOH e dissolver usando 125 mL de água. Misturar bem até dissolver toda a base. Lentamente e misturando sempre acrescentar 500 mL de óleo de usado. Misturar por 20 minutos. Em seguida, adicionar o resíduo da síntese de biodiesel acrescido de 100 mL de álcool etílico. Misturar até ficar pastoso. Verter em moldes. Deixar em repouso até endurecer.

Fonte: Cavalheiro *et al.*, (2023).

**Estrelas Verdes (EV)**

Para fins comparativos entre a rota de biodiesel metílico (Quadro 3 e 4) e as oportunidades vislumbradas na análise externa da MV (Quadro 5) para produção de biodiesel etílico (Quadro 6) utilizando ácido acético 4% no isolamento e emprego dos resíduos em formulações de sabão (Quadro 10), apresenta-se a análise semi-quantitativa utilizando a estrela verde (EV), conforme critérios de análise recomendados por Ribeiro e Machado 2008; Machado, 2014; Cavalheiro *et al.*, (2023) e Stadler e Gomes 2023 (Quadro 11).

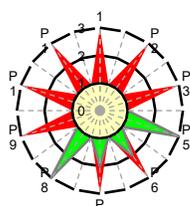
**Quadro 11. Critérios de análise das Estrelas Verdes referentes à síntese do Biodiesel Metílico e do Biodiesel Etílico**

Síntese e isolamento do Biodiesel metílico			Síntese do Biodiesel etílico/isolamento com ácido acético 4% (vinagre)		Síntese do Biodiesel e Tratamento do resíduo para a Produção sabão	
Princípios	(P) EV	Explicação	(P) EV	Explicação	(P) EV	Explicação
P1 Prevenção	1	Meio básico. excesso de metanol (perigo graves a saúde e perigo físicos - GHS 3)	1	Meio Básico. Excesso de etanol (perigo físico, GHS 3),	3	Produção de sabão – sem resíduo
P2 Economia Atômica	1	Formação de coproduto (glicerol) e excesso de metanol (>10%)	1	Formação de coproduto (glicerol) e excesso de etanol (>10%) coprodutos	3	Sem excessos
P3 Sínteses menos perigosas	1	Hidróxido de potássio (perigo à saúde GHS 3) e metanol (perigo à saúde e perigos físicos - GHS 3)	1	Hidróxido de potássio (risco à saúde - GHS 3) e etanol H225 (perigos físicos GHS 3)	1	Uso de NaOH (risco a saúde - GHS 3).
P5 Solventes	3	Não usa auxiliares	(3)	Vinagre (4%)	1	Etanol (GHS 3)

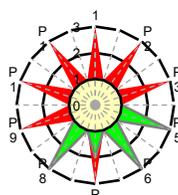
e outras substâncias auxiliares mais seguras						
P6 Planificação para conseguir eficácia energética	2	45 °C ( $0\text{ °C} \leq T \leq 100\text{ °C}$ )	3	Temperatura ambiente	3	Sabão feito a frio
P7 Uso de matérias primas renováveis	2	Óleo vegetal/ biodiesel renováveis. (hidróxido de potássio e metanol não são renováveis)	2	Óleo/Biodiesel e etanol renováveis (hidróxido de potássio não renovável)	2	Hidróxido de potássio e de sódio não são renováveis
P8 Redução de derivatizações	3	Uma só etapa (sem derivatizações)	3	Uma só etapa (sem derivatizações)	3	Não há derivatizações
P9 Catalisadores	1	Hidróxido de potássio (GHS 3)	1	Hidróxido de potássio (GHS 3)	3	Não usa catalisadores
P10 Planificação para a degradação	1	Substâncias não degradáveis a produtos inócuos	1	Substâncias não degradáveis a produtos inócuos	3	Sabão é um produto biodegradável
P12 Química inerentemente mais segura quanto à prevenção de acidentes	1	Metanol (GHS 3)	1	Etanol (GHS 3)	1	Uso de hidróxido de sódio com GHS 3)

A partir das informações extraídas do Quadro 11, apresenta-se EV para as rotas sintéticas do biodiesel (Figuras 1a e 1b) e para a reação global de síntese (reação e isolamento), considerando o aproveitamento o do resíduo em formulações de sabão (Figura 1 c), desconsiderando a etapa de purificação do Biodiesel. É importante ressaltar que caso não haja a remoção da umidade do biodiesel, há a diminuição da qualidade do mesmo, pois a água é catalisadora da reação de oxidação do biodiesel e, conseqüentemente, há a diminuição do período de indução, parâmetro que estima de forma acelerada o período de armazenamento do biodiesel (Chendynski *et al.*, 2018).

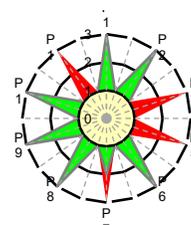
**Figura 1 – Estrelas verdes da síntese do biodiesel**



(a) EV rota metilica  
\*IPE: 30 %  
30%



b) EV rota etílica com ácido  
acético 4 % (vinagre)  
\*IPE: 45 %  
35%



c) EV rota etílica com  
aproveitamento resíduo para sabão  
\*IPE: 65%

\*IPE – Índice de Preenchimento da Estrela Verde

Fonte: Os autores.

O baixo IPE da Estrela Verde apresentado na Figura 1a (30%) está relacionado aos princípios não atendidos da prevenção (P1), de economia atômica (P2), de síntese menos perigosa (P3), de uso de catalisador (P9), da planificação para degradação (P10) e da química intrinsecamente segura (P12). Isso ocorre devido ao uso de metanol e o seu excesso, que permanece nos resíduos da reação, apresentando altos perigos físicos e pelo emprego de hidróxido de sódio como catalisador, conferindo perigo elevado à saúde e perigo ambiental moderado.

Em relação à eficiência energética (P6), observa-se atendimento parcial da verdura, pois o processo é conduzido entre 0 e 100 °C (45 °C) e a pressão ambiente. Ainda, por utilizar pelo menos um reagente de origem renovável (óleo vegetal residual), atende-se parcialmente o princípio 7. Por fim, atende-se completamente o P5, referente aos solventes e auxiliares, pois não há uso desse tipo de substância nessa síntese e o princípio 8, pois não ocorrem derivatizações no processo.

O IPE da EV do biodiesel produzido com etanol e ácido acético 4 % teve o IPE melhorado em 5 % (IPE 35 %), pois atende aos princípios P5, P6, P8 e atendimento parcial do P7, conforme mostra o Quadro 10 e a Figura 1b. Contudo, se considerarmos a reação global, considerando a síntese do biodiesel e o aproveitamento desse resíduo para produção de sabão, a verdura química das rotas sintéticas melhora, pois se atinge totalmente os princípios 1, 2, 9 e 10 (Figura 1c).

Destacamos que nesse trabalho se avaliou apenas a verdura química dos protocolos de síntese do biodiesel. Destacamos que as métricas MV e EV podem ser utilizadas separadamente para síntese, purificação e também de forma global (síntese + purificação + tratamento de resíduos) para fins comparativos. Observa-se ainda que partir dos princípios da QV pode ser proposto protocolos alternativos, mais verdes para procedimentos experimentais em laboratórios acadêmicos e industriais.

Dessa forma, os 12 princípios da QV, citados por autores como Lenardão (2003), Machado (2014) Mendes, Gomes e Bolzan (2018), Stadler e Gomes (2023) podem servir como um guia quando se pretende implantar a Química Verde em indústrias, Instituições de Ensino ou Pesquisa.

De forma geral, este trabalho reforça a ideia de autores como Geris *et al.*, (2007), Ramos *et al.*, (2011) e Azevedo *et al.*, (2013), que a produção de biodiesel em aulas de Química no Ensino Superior permite o estudo de relações estequiométricas por meio da reação de transesterificação, essencial para apresentar o rendimento das reações e, principalmente as relações teórico-experimentais com os princípios da Química Verde e integração dos dados experimentais com as métricas da QV - a MV, EV e as métricas de massa.

## CONCLUSÕES

Considerando os aspectos positivos para o ensino da reação de transesterificação a partir da produção do biodiesel e, por outro lado, a toxicidade do metanol comumente utilizado nessa reação, acredita-se que o levantamento de protocolos na literatura e o estudo da química desses procedimentos possibilitará apresentar alternativas experimentais cada vez mais eficazes e mais verdes. Atendendo os princípios da Química Verde com o protocolo proposto, há a redução de riscos físicos, à saúde e ao ambiente, utilização de reagentes renováveis, redução no uso de resíduos e também preservação em gastos energéticos, visando combinar um melhor do índice de verde sem afetar negativamente as métricas de massa e energética. Por fim, é evidente a importância da química verde para avaliação de protocolos experimentais para difusão no Ensino de Química, principalmente em cursos de graduação, vislumbrando a formação de profissionais mais conscientes em relação a segurança de trabalho e redução dos perigos a saúde e ao meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

ANGILELLI, K. B; MANTOVANI, A. C. G; CHENDYNSKI, L. T. *Mathematical modeling of biofuel synthesis and storage*. EDUEL, 2022. (ISBN 978-65-89814-44-3).

ASSIS, C. S. ; JESUS, L.F.; MIRANDA, A. C. ; MOREIRA, M. F. R. Uso do metanol e risco de exposição dos trabalhadores de uma usina de biodiesel. *REVISTA BRASILEIRA DE MEDICINA DO TRABALHO*, v. 15, p. 29-41, 2017. (DOI: 10.5327/Z1679443520177031).

AZEVEDO, L. A.; BEJAN, C. C. C.; CAMPOS, A. F. DE ALMEIDA, M. A. V. Biodiesel a partir de óleo de fritura: uma temática atual para abordagem das relações CTS em uma sala de aula de química. *Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Tecnologia*, v. 6, n. 2, 2013. (DOI: 10.3895/S1982-873X2013000200003 ).

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 14, n. 1, jan./jun. 2024. P. 86-113

*Síntese do biodiesel: pensando processos mais verdes para a produção de energia renovável*

MELO, Jocelene Reis de; STADLER, João Paulo; CHENDYNSKI, Letícia Thaís; SANDRI, Marilei Casturina Mendes; GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

BRANCO, I. G.; CAMPOS, J. W.; SILVA, N. F.; CLEMENTE, M. A. J.; MANTOVANI, A. C. G.; CHENDYNSKI, L. T.; BORSATO, D. (2024). Mathematical modeling of the biodiesel oxidation process in the presence of natural ethanolic extracts of jabuticaba peels, gabirola leaves, and hibiscus flowers. *Química Nova*, 47, e-20230090. (DOI: doi.org/10.21577/0100-4042.20230090).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CNPE mantém percentual de 10% de biodiesel no diesel em 2022. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/ptbr/assuntos/noticias/cnpe-mantem-percentual-de-10-de-biodiesel-no-diesel-em-2022-3>. Acesso em: 21 jan. 2022.

CAVALHEIRO, N.; STADLER, J. P.; GIUSTI, E. D.; CHENDYNSKI, L. T.; GOMES, S. I. A. A. Ecological soap production using green chemistry principles. *Acta Scientiarum. Technology (Online)*, v. 46, p. 1-10, 2023. (DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v46i1.64409>).

CHENDYNSKI, L. T.; ROMAGNOLI, E. S.; MANTOVANI, A. C. G.; KIMURA, M.; MARQUES, L. C.; BORSATO, D. Influence of Copper and Metallic Alloys on the Oxidation Reaction of Commercial Biodiesel in Mixture with Natural Antioxidant. *JOURNAL OF THE BRAZILIAN CHEMICAL SOCIETY*, v. 30, p. 90-96, 2019. (DOI: [dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20180157](https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180157)).

CLEMENTE, M. A. J.; MARCHEAFAVE, G. G. ; BRANCO, I. G. ; CANESIN, E. A. ; MANTOVANI, A. C. G. ; CHENDYNSKI, L. T. ; ANGILELLI, K. B. ; BORSATO, D. Study of the addition of Gabirola leaves extract in the biodiesel oxidation reaction in the presence of metal ions. *BIOFUELS*, v. 1, p. 1-6, 2023. (DOI: [doi.org/10.1080/17597269.2023.2191388](https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2191388)).

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética. Resolução n.º 16, de 29 de outubro de 2018. Dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional. Brasília: DOU de 08/11/2018.

CNPE. (2023a). Resolução n.º 03, de 20 de março de 2023. Altera a Resolução CNPE n.º 16, de 29 de outubro de 2018, que dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel; e dá outras providências. Conselho Nacional de Política Energética. Brasília: Diário Oficial da União. Acesso em 12 de abril de 2023. Disponível em <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-docnpe/2023/ResCNPE32023.pdf>

FRIEDRICH, L. *Contextualização do Biodiesel na aprendizagem de funções orgânicas e reações de transesterificação na disciplina de química*. Dissertação do Curso de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Medianeira. Medianeira (2019). Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5314/1/biodieselfuncoesorganicastransesterificacao.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2022.

GAIO, S. R.G. *PRODUÇÃO DE BIODIESEL ETÍLICO COM NaOH DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA DA COLETA SELETIVA DE FOZ DO IGUAÇU/PR*. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), como requisito parcial

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 14, n. 1, jan./jun. 2024. P. 86-113

*Síntese do biodiesel: pensando processos mais verdes para a produção de energia renovável*

MELO, Jocelene Reis de; STADLER, João Paulo; CHENDYNSKI, Letícia Thaís; SANDRI, Marilei Casturina Mendes; GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Energia. 2019. Disponível em:  
<https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/5967/Produ%C3%A7>.

GERIS, R. *et al.* Biodiesel de Soja – Reação de Transesterificação para Aulas Práticas de Química Orgânica. *Química Nova*, v. 30, n. 5, pp. 1369-1373, 2007. Disponível em:  
[http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/Vol30No5\\_1369\\_52-ED06158.pdf](http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/Vol30No5_1369_52-ED06158.pdf). Acesso em: 20 jul. 2022. (doi.org/10.1590/S0100-40422007000500053).

LENARDÃO, E. J.; FREITAG, E. A.; DABDOUB, M. J.; BATISTA, A. C. F.; SILVEIRA, C. C. “Green Chemistry” – Os 12 princípios da Química Verde e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. *Química Nova*, v. 26, n. 1, p. 123-129, 2003 (DOI: doi.org/10.1590/S0100-40422003000100020).

LUZ, Leslie Tauany Schneider da *et al.* Avaliação e otimização das condições de obtenção do ácido acetilsalicílico para fins didáticos. *Educación química*, v. 30, n. 2, p. 54-69, 2019 (DOI:doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.2.67393 ).

MACHADO, A. *Introdução às métricas da química verde: uma visão sistêmica*. Editora da UFSC, Florianópolis, 2014 (ISBN: 978.85.328.0677-2).

MACHADO, C. S. A. Da Gênese ao Ensino da Química verde. *Química Nova*, vol. 34, n. 3, p. 535-343, 2011 DOI: doi.org/10.1590/S0100-40422011000300029.

MAINTINGUER, S, I, *et al.* Cenários das políticas públicas adotadas do programa nacional de produção do biodiesel no Brasil. *Revista Tecnologia e Sociedade*, Curitiba, v. 18, n. 52, p. 189-206, jul, 2022. Disponível em: <https://revistas.utfpr.edu.br/rts/article/viewFile/14623/8822>. Acesso em: 11 ago. 2022 (DOI: 10.3895/rts.v18n51.14623 ).

MANTOVANI, A. C. G.; CHENDYNSKI, L. T.; SALVIATO, A.; BORSATO, D.; SANTANA, V. T.; DI MAURO, E.;. Monitoring free radicals formation in the biodiesel oxidation reaction via electronic paramagnetic resonance. *Fuel*, v. 224, p. 255-260, 2018 (DOI: doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.114).

MATTEI, L. Programa Nacional para Produção e Uso do Biodiesel no Brasil (PNPB): trajetória, situação atual e desafios. *Revista Econômica do Nordeste*, Nordeste, v. 41, n. 4, p. 731-740, out/dez. 2010 (doi.org/10.61673/ren.2010.335).

MOTA, C. J. A.; PESTANA, C. F. M. Co-produtos da Produção do Biodiesel. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 5, p. 416-425, 2011 (DOI: 10.5935/1984-6835.20110045).

NURTIFRI, I.; MANIAM G. P.; HINDRYAWATI, N; YUSOFF, M. M.; GANESAN, S. Potencial of feedstock and catalysts from waste in biodiesel preparation: A review. *Energy conversion and Management*, v. 74, p. 395-402, 2013.

PIMENTA, S. F; GOMES. S. I. A. A; SANDRI, M. C. M. Análise de Experimentos de Química Orgânica sob uma perspectiva de Química Verde. *Revista Debates em Ensino de Química* (ISSN: 2447-

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 14, n. 1, jan./jun. 2024. P. 86-113

*Síntese do biodiesel: pensando processos mais verdes para a produção de energia renovável*

MELO, Jocelene Reis de; STADLER, João Paulo; CHENDYNSKI, Letícia Thaís; SANDRI, Marilei Casturina Mendes; GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

6099), v. 4, n. 1, p. 180-207, 2018. Disponível em:

<https://www.journals.ufrpe.br/index.php/REDEQUIM/article/view/1742/482482615> Acesso em: 26 ago. 2023.

PINHEIRO, S. D. L. R. *PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM ÓLEO RESIDUAL E ROTA ETÍLICA COM REMOÇÃO DO EXCESSO DE ETANOL*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologias e Geociências, como requisito para a obtenção do título de mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Fontes renováveis. 2021.

RADE, L. L.; ARVELOS, S.; BARROZO, M. A. S.; ROMANIELO, L. L.; WATANABE, E. O.; HORI, C. E. Evaluation of the use of degummed soybean oil and supercritical ethanol for non-catalytic biodiesel production. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 105, p. 21-28, 2015 (DOI: [doi.org/10.1016/j.supflu.2015.05.017](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.05.017)).

RAMOS, L.; SILVA, F. R.; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, C. S. Tecnologias de Produção de Biodiesel. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 5, p. 385-405, 2011. Disponível em: <https://rvq-sub.s bq.org.br/index.php/rvq/article/view/190/191> Acesso em: 20 jul.2022 (DOI: 10.5935/1984-6835.20110043).

RAMOS, L. P.; KOTHE, V.; CÉSAR-OLIVEIRA, M. A. F.; MUNIZ-WYPYCH, A. S.; NAKAGAKI, S.; KRIEGER, N.; WYPYCH, F.; CORDEIRO, C. S. Biodiesel: Matérias-Primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis. *Revista Virtual de Química*, v. 9, n. 1, p. 317-369, dez. 2016 (DOI: [10.21577/1984-6835.20170020](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170020)).

RENÓ, M. L. G.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; BUCHGEISTER, J.; OLMO, O. A. A LCA (life cycle assessment) of the methanol production from sugarcane bagasse. *Energy* (Oxford), v. 36, p. 3716-3726, 2011 (DOI:[doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.010](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.010)).

RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. *Pedagogia da Química Verde – Educação para a Sustentabilidade*. 2008. Disponível em: <http://educa.fc.up.pt/pedagogiadaquimicaverde/>. Acesso em 5 jul. 2022.

ROSSI, G. Z.; BORGES, I. R.; PEREGO, T. F.; TOLEDO, V. D. M.; FERREIRA, L. F. P. Análise técnica da produção do biodiesel a partir do óleo de fritura residual. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 4, n. 1, p. 0101-0108, 2018 (DOI: [doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0101-0108](https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0101-0108)).

SANDRI, M. C. M; GOMES, S. I. A. A; BOLZAN, J, A. *Química Orgânica Experimental - Aplicação de Métricas Holísticas de Verdura: Estrela Verde e Matriz Verde*. Curitiba: Editora IFPR, 2018. p. 1-173 (ISBN: 978-85-54373-14-6).

SILVA, F. R. P.; FREITAS, S. F. T. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. *Ciência Rural*, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 jul. 2022 (DOI: [doi.org/10.1590/S0103-84782008000300044](https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000300044)).

SCHWANTZ, P. I.; ROTH, J. C. G.; SANTOS, E. F.; LARA, D. M. Reciclagem de resíduos oleosos: ação de sensibilização ambiental com alternativas de reciclagem pela produção artesanal de

Bioenergia em revista: diálogos, ano/vol. 14, n. 1, jan./jun. 2024. P. 86-113

*Síntese do biodiesel: pensando processos mais verdes para a produção de energia renovável*

MELO, Jocelene Reis de; STADLER, João Paulo; CHENDYNSKI, Letícia Thaís; SANDRI, Marilei Casturina Mendes; GOMES, Sandra Inês Adams Angnes

sabão. *Revista Estudo & Debate*, v. 26, n. 1, 2019 (DOI:dx.doi.org/10.22410/issn.1983-036X.v26i1a2019.1874 ).

STADLER, J. P.; GOMES, S. I. A. A. Relato de vivências no âmbito da Química Verde no curso de Química do Instituto Federal do Paraná - campus Palmas Sandra Inês Adams Angnes Gomes. In: *Química verde: propostas, experiências de ensino e reflexões para a formação de professores*. [livro eletrônico]. Organizado por Marilei Casturina Mendes Sandri *et al.* Ponta Grossa: Texto e Contexto, 2023. 232 p. Disponível em: <https://www.textoecontextoeditora.com.br/produto/detalhe/quimica-verde-propostas-experiencias-de-ensino-e-reflexoes/94> (ISBN: 978-85-94441-81-2).

UNITED NATIONS (Org.). Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS). Eighth revised edition ed. New York Geneva: United Nations, 2019. Disponível em: <https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/ghs-rev9-2021> . Acesso em: 18 jan. 2024.

YUNES, F. S; MARQUES, A. C. **A MÉTRICA HOLÍSTICA ESTRELA VERDE: ANÁLISE DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE QUÍMICA**. Ponta Grossa: Atena, 2023. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/a-metrica-holistica-estrela-verde-analise-de-atividades-experimentais-no-ensino-de-quimica>. Acesso em: 26 ago. 2023. (ISBN 978-65-258-1357-8/ DOI: doi.org/10.22533/at.ed.578232704).

MELO, Jocelene Reis de. Instituto Federal do Paraná Campus Palmas, Avenida Bento Munhoz da Rocha Neto, PRT-280 – Trevo Codapar, CEP 85555-000. Palmas - PR. Brasil.

STADLER, João Paulo. Doutorando em Ensino de Ciências e Matemática no Programa de Pós Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica na UTFPR na área de Formação de Professores, com período de doutorado sanduíche no Centro de Estudios para el Perfeccionamiento de. La Educación Superior na Universidad de La Habana, Cuba (2020-2024). Mestre em Ensino de Ciências no Programa de Pós Graduação em Formação Científica, Educacional e Tecnológica na UTFPR na área de Formação de Professores e Aspectos Sociocientíficos no Ensino de Química (2015). Especialista em Educação Especial e Inclusiva (Uninter 2015) e em Materiais Didáticos no Ensino de Ciência e Matemática (PUC-PR 2016). Licenciado em Química e Bacharel em Química Tecnológica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR 2013). Atuou, de 2011 a 2017, na Educação Básica (Ensino Médio) como professor contratado e efetivo na Secretaria de Estado de Educação do Paraná. Desde 2018, atua como professor do Colegiado de Química no IFPR (campus Palmas) atendendo turmas de Ensino Médio Técnico Integrado e do curso de Licenciatura em Química e Licenciatura em Pedagogia. Instituto Federal do Paraná Campus Palmas, Avenida Bento Munhoz da Rocha Neto, PRT-280 – Trevo Codapar, CEP 85555-000. Palmas - PR. Brasil.

CHENDYNSKI, Letícia Thaís. Doutora em Química pelo programa de pós-graduação integrado UEL/ UEPG / UNICENTRO. Mestra em Química pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Graduada do curso de Bacharelado em Química com Habilitação em Tecnológica pela Universidade Estadual de Londrina. Atuou em projetos de pesquisa utilizando métodos com HPLC e NIR em análises de alimentos e bebidas, síntese de biodiesel a partir de diferentes matérias primas e catalisadores e aplicação de antioxidantes naturais, mecanismo de oxidação do biodiesel e delineamento experimental. Atualmente é docente do Instituto Federal do Paraná Campus Ivaiporã. Instituto Federal do Paraná Campus Ivaiporã, Rua Max Arthur Greipel, nº 505 - 17 Parque Industrial Ivaiporã-PR, Brasil, CEP 86870-000. Autora correspondente: leticia.chendynski@ifpr.edu.br.

SANDRI, Marilei Casturina Mendes. Possui graduação em Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (2005), mestrado em Química Aplicada pela mesma universidade (2008) e doutorado em Educação Para a Ciência e o Ensino de Matemática pela Universidade Estadual de Maringá (2016). Atualmente é professora da Universidade Estadual de Ponta Grossa, no curso de Licenciatura em Química, com atuação na área de Ensino de Química. É professora permanente do Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática (PPGCEM) da UEPG. Realiza pesquisas na área de Ensino de Química, atuando principalmente nos seguintes temas: Ensino Química Verde, Educação para a Sustentabilidade, Formação de Professores, Saberes docentes e Experimentação. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Avenida Gen. Carlos Cavalcanti 4748. CEP 84030-900. Bloco L, Sala 37.

GOMES, Sandra Inês Adams Angnes. Licenciada em Química pelas Faculdades Reunidas de Administração, Ciências Contábeis e Ciências Econômicas de Palmas FACEPAL, (1999). Mestra em Química pela Fundação Universidade Regional de Blumenau - FURB (2005). Experiência como auxiliar de laboratório de ensino de Química entre 1999 e 2003. Experiência

como Docente de Química no Ensino Superior desde 2003. Docente do curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal do Paraná campus Palmas, desde 2011. Coordenadora do Estágios Supervisionados de Química. Professora das disciplinas de Química Orgânica e Estágio Supervisionado. Coordenadora do projeto de Pesquisa e de Ensino e Aprendizagem: Avaliação de Verdura Química dos Experimentos de Química Orgânica. Coordenadora do Laboratório dinâmico Interdisciplinar para o Ensino de Ciências. Vice Coordenadora do projeto de Extensão Fábrica Escola de Detergentes. Coordenadora do projeto de pesquisa Extração de Bioativos a partir de Resíduos Vegetais para Aplicação em Sistemas Emulsionados. Instituto Federal do Paraná Campus Palmas, Avenida Bento Munhoz da Rocha Neto, PRT-280 – Trevo Codapar, CEP 85555-000. Palmas - PR. Brasil.