

Conversão catalítica - livre de H₂ - para produção de bioquerosene e diesel verde a partir de óleos de palma

Fabiana Pereira de Sousa¹, Vânia Márcia Duarte Pasa¹

¹ Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

Resumo/Abstract

RESUMO - O desenvolvimento de rotas de conversão para produção de biocombustíveis “drop-in” tem estimulado estudos em todo o mundo, sendo a produção do SAF (*Sustainable Aviation Fuels*) ou bioquerosene um dos maiores desafios da atualidade. Neste trabalho, foram obtidos biohidrocarbonetos em uma única etapa a partir dos óleos de palma na faixa do diesel verde e do querosene de aviação usando o catalisador Nb₂O₅. O catalisador foi caracterizado por difração de raios X. As reações de desoxigenação dos materiais graxos ocorreram entre 200 e 400°C, sob atmosfera de N₂ com eficiência de desoxigenação de até 89%. O uso de H₂ é um dos principais custos desse tipo de processo, o que também eleva o investimento das unidades industriais, portanto, um processo sem uso de H₂, como o desenvolvido nesse estudo, tem grande relevância econômica. Os produtos foram analisados por espectroscopia de absorção na região do infravermelho e cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas. Os resultados obtidos mostram que o processo desenvolvido é eficiente, simples e promissor para uso em escala industrial.

Palavras-chave: Biogasolina, diesel verde, SAF, desoxigenação, catalisador de nióbio.

ABSTRACT - The biofuel sector has faced numerous challenges in developing conversion routes for the production of drop-in fuels. Studies worldwide have been stimulated to address this issue. One of the most challenging areas in the biofuel sector is the production of SAF. In this study, the catalyst Nb₂O₅ was used to obtain biohydrocarbons in a single step from palm oils. The deoxygenation reactions of fatty materials occurred in the range of 200 to 400°C, under N₂ atmosphere with a deoxygenation efficiency of up to 89%. The use of H₂ is one of the main costs of this type of process, which also increases the investment of industrial units, therefore, a process without the use of H₂, as the one developed in this study, has great economic relevance. The developed process shows promise for use on an industrial scale, as indicated by the results obtained from the analysis of the products.

Keywords: Biogasoline, Green diesel, SAF, deoxygenation, niobium catalyst

Introdução

Os biocombustíveis têm recebido grande destaque devido às questões ambientais envolvendo emissões de gases do efeito estufa. A demanda do setor de aviação para produção de biocombustíveis tem sido cada vez mais urgente, uma vez que este é o setor de transportes que mais cresceu nos últimos anos. Este seguimento se comprometeu a reduzir em 50% as emissões de dióxido de carbono (em relação aos níveis de 2005) até 2050, sendo a utilização de biocombustíveis uma ação considerada prioritária para atingir esta meta [1]. Os biocombustíveis aeronáuticos devem apresentar elevado poder calorífico, alta estabilidade térmica e baixo ponto de congelamento, o que requer hidrocarbonetos similares aos encontrados no querosene fóssil em sua composição, sem oxigênio na estrutura, com cadeias entre 9 e 15 átomos de carbono e que possuam baixas temperaturas de congelamento [2].

Neste contexto, os biocombustíveis “drop in” são bastante promissores, não apenas para o setor aeronáutico, mas também para utilização em veículos automotores, o que contribuiria para a diminuição do uso da gasolina e do diesel de origem fóssil. Estes biocombustíveis são inteiramente compatíveis com a mecânica dos veículos e aeronaves comercializados atualmente, além disso, não necessitam de infraestruturas diferentes das já utilizadas para estocagem e transporte [3], por serem quimicamente semelhantes aos respectivos análogos fósseis [4].

A hidredesoxigenação de óleos e de gorduras tem sido a rota mais usada industrialmente em países que já comercializam esses biocombustíveis *drop-in*. Entretanto, esse hidrotreatamento requer o uso de elevadas pressões de hidrogênio (50–200 bares) e altas temperaturas (250–450 °C), além do uso de catalisadores de alto custo (usualmente metais nobres suportados), o que requer grandes investimentos em equipamentos e altos custos operacionais quando comparados às produções de biodiesel e etanol. Assim, a produção de

biocombustíveis “drop in” a custos competitivos é o maior desafio dos pesquisadores da área energética, o que justifica os trabalhos desenvolvidos a fim de reduzir os custos de processo através de condições reacionais mais brandas e catalisadores mais baratos, que é o grande objetivo deste trabalho.

O uso de catalisadores de nióbio pode ser interessantes no processo de desoxigenação de óleos e gorduras para produção de biohidrocarbonetos, devido, principalmente, ao caráter ácido destes compostos [5–9]. Porém, apesar do potencial uso destes catalisadores para este processo, ainda não são apresentados na literatura muitos trabalhos utilizando compostos de nióbio para esta finalidade [6,10,11], tendo o nosso grupo de pesquisas concentrado esforços nessa área.

Este trabalho tem como objetivo promover a desoxigenação do palmiste (gordura extraída da amêndoa da palma) e oleína de palma (extraída da polpa); e de seus respectivos ácidos graxos livres (obtidos através da prévia hidrólise de seus óleos) utilizando catalisador Nb_2O_5 sem a presença de H_2 . Este processo é inovador, visto que compostos de nióbio ainda são pouco estudados para esta finalidade. Importante destacar que o catalisador estudado é significativamente mais barato que os catalisadores mais comumente usados para processos de desoxigenação, como Pd/C, NiMo/ Al_2O_3 , Ni/ Al_2O_3 , e metais sob zeólitas [3,12–20].

Experimental

Hidrólise dos óleos de palma.

A cromatografia gasosa com detector de ionização de chama (CG-FID) foi usada para determinar o perfil de ácidos graxos do palmiste e da oleína de palma, conforme Sousa et al [4]. Para a hidrólise do palmiste foram realizadas reações de saponificação com 23,5 g (0,42 mol) de KOH e 50 g da gordura. O KOH (Vetec) foi dissolvido em água destilada (cerca de 50 mL) e em seguida completou-se o volume para 250 mL com etanol. As reações de saponificação ocorreram sob refluxo, a 600 rpm durante 1h. O produto foi lavado com uma solução 2M de HCl e com água destilada até pH 6. A oleína de palma foi hidrolisada por rota similar.

Preparo e caracterização do catalisador

Para a produção do catalisador Nb_2O_5 , o precursor comercial $\text{Nb}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, foi calcinado em um forno tipo mufla para remoção de H_2O e outros adsorventes. A análise estrutural foi feita por difração de raios X (DRX). Os difratogramas foram obtidos em difratômetro Shimadzu, modelo 6000, tubo de Cu, voltagem de 30KV, corrente de 30 mA e velocidade de varredura de $1^\circ/\text{min}$, em um intervalo 2θ de 5 a 70° . As análises de adsorção e dessorção de N_2 foram realizadas em um equipamento Quantachrome ASiQwin 2.0, com 50 pontos coletados. Cerca de 200 mg de Nb_2O_5 foram desgaseificadas à temperatura de 200°C , durante 12h antes da análise. A área superficial foi calculada pelo método BET.

Reações de desoxigenação dos materiais graxos de palma

As reações de desoxigenação ocorreram em um reator Parr 4348, onde foram realizadas reações usando-se de 5 a 15% do catalisador. A reação foi estudada em uma faixa de temperatura de 200 a 400°C , sob pressão de N_2 (10 a 20 bar), agitação de 700 rpm, e os tempos de reação variaram de 3 a 12h, conforme literatura. Foram realizadas reações com H_2 para fins comparativos. As matérias-primas usadas foram o palmiste, palmiste previamente hidrolisado, a oleína de palma, e oleína de palma previamente hidrolisada. O grau de desoxigenação das diferentes reações foi estimado utilizando-se espectroscopia na região do infravermelho médio com transformada de Fourier (FTIR), monitorando as bandas em 1712 e 1742 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ de ácidos carboxílicos e ésteres, respectivamente) através de curva de calibração, construída baseando-se na norma europeia EN 14078 [21,22]. A composição dos produtos foi avaliada via GC-MS em um equipamento Shimadzu, QP5050, utilizando coluna Pona 100, com 100m de comprimento e 0,25 mm de diâmetro. As temperaturas do injetor e do detector foram de 280°C . A coluna foi aquecida de 100 a 185°C a uma razão de $2,5^\circ\text{C}/\text{min}$, em seguida até 280°C a $5^\circ\text{C}/\text{min}$, e então permaneceu a 280°C por 15 min. Os produtos foram identificados e semi-quantificados com a ajuda do banco de dados GCMS PostrunAnalysis.

Resultados e Discussão

Caracterização da matéria-prima

Dados da Tabela 1 mostram que o palmiste apresenta um grande percentual de ácidos graxos saturados, cerca de 84%. Já a oleína de palma apresenta 52% de ácidos graxos insaturados. Importante destacar que as insaturações podem influenciar diretamente na síntese dos hidrocarbonetos, uma vez que matérias-primas muito insaturadas podem consumir maior quantidade de H_2 em reações de hidrogenação, caso se use o gás hidrogênio[20]. Por outro lado, as ligações π são sítios importantes para as reações de isomerização e craqueamento [23], o que torna a oleína especialmente interessante para a produção de biohidrocarbonetos com propriedades a frio adequadas para uso do combustível em regiões frias ou como combustível de aviação. Observa-se também que mais de 81% do palmiste é constituído por ácidos graxos de cadeias curtas, iguais ou inferiores a 16 átomos de carbono, com predominância do ácido láurico ($\text{C}_{12:0}$), como esperado para um óleo de amêndoa e desejado para a produção do bioquerosene. Já na oleína de palma nota-se um grande teor de cadeias com 18 átomos de carbono, 57% [24,25].

Tabela 1. Composição graxa das matérias-primas utilizadas na síntese dos biohidrocarbonetos.

Ácido graxo	Palmiste (% m/m)	Oleína (% m/m)
-------------	---------------------	-------------------

C8:0	2,2	-
C10:0	2,6	-
C12:0	49,0	0,6
C14:0	15,5	0,8
C16:0	11,8	41,6
C16:1	-	-
C18:0	2,5	5,1
C18:1	13,6	44,1
C18:2	0,8	7,4
C18:3	-	0,2
20:0	0,1	0,2
C20:1	2,0	-
Teor de Saturados (%)	83,6	48,3
Teor de Insaturados (%)	16,4	51,7
MM (g/mol)	657	845

Caracterização dos catalisadores

O difratograma apresentado na Figura 1 mostra que o catalisador exibe apenas duas bandas nas regiões de 2 theta entre 10 e 40° e 40-65°, não apresentando nenhum pico bem definido no intervalo investigado, indicando a pouca cristalinidade deste material [6]. A área específica do Nb₂O₅, após o tratamento térmico, foi de 68 m²/g.

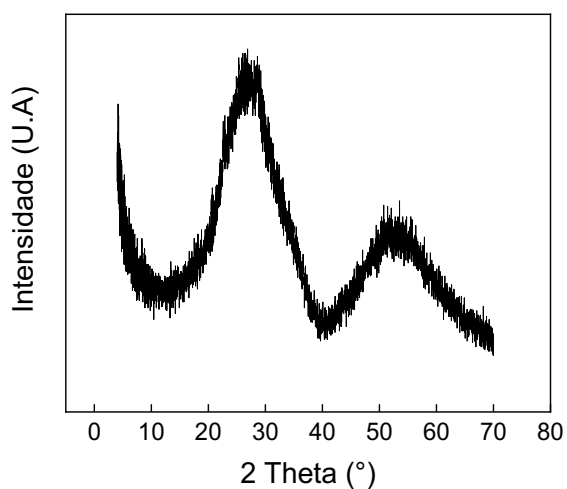


Figura 1. Difração de raios X do catalisador após o tratamento térmico.

Caracterização dos produtos

A Figura 2 mostra os espectros FTIR das matérias-primas e dos respectivos produtos obtidos utilizando o catalisador Nb₂O₅. Notou-se uma significativa redução da intensidade relativa das bandas em 1742 e/ou 1712 cm⁻¹, característicos do estiramento C=O, predominantes nos triglicerídeos devido aos grupos ésteres, e nos ácidos graxos pelos grupamentos carboxílicos, respectivamente [26]. Como os hidrocarbonetos possuem apenas ligações do tipo C-C e C-H, as diminuições nas

intensidades relativas dos picos referentes à carbonila indicam a desoxigenação do material graxo.

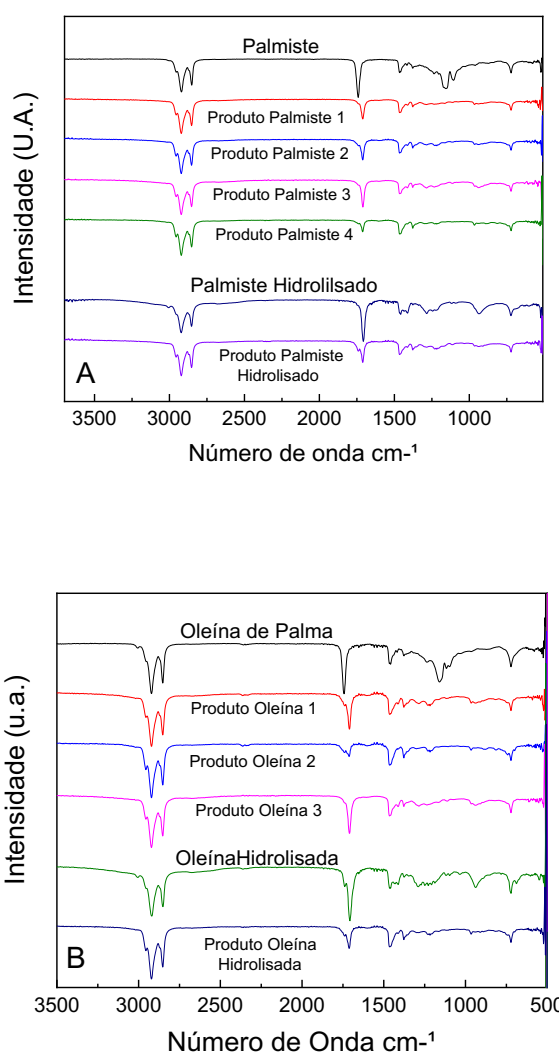
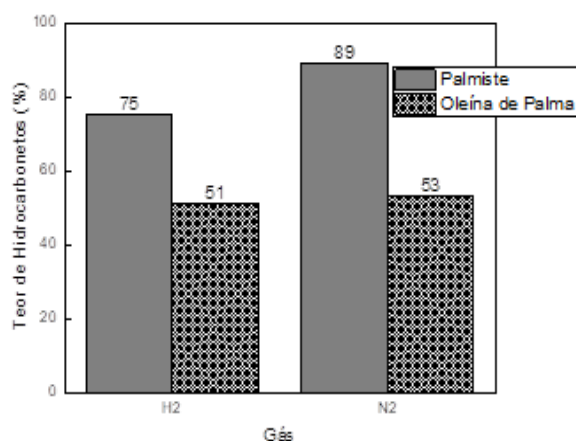


Figura 2. Espectros obtidos na região do IR para os produtos obtidos utilizando o Nb₂O₅: (A) para o palmiste e o palmiste previamente hidrolisado e (B) para a oleína de palma e para a oleína de palma hidrolisada.

Conforme observado na Fig. 3, o uso do nitrogênio ao invés do hidrogênio não trouxe perdas ao sistema, ao contrário, foi observada uma pequena melhora nos teores de produtos

desoxigenados quando se usou o N_2 ao invés do H_2 . Vale ressaltar que, nos processos de hidrodesoxigenação, o gás H_2 é um reagente nas reações de descarbonilação e desidratação,



portanto, este é consumido no processo. Por outro lado, o gás N_2 é inerte neste sistema e agirá apenas como um agente de pressurização, favorecendo os processos de craqueamento, de tal forma que os mecanismos associados à utilização deste gás se assemelham aos que ocorrem nos processos de pirólise, em que é possível obter produtos similares aos da hidrodesoxigenação.

Figura 3. Influência do gás utilizado na desoxigenação dos óleos de palma sob 10 bares de N_2 ou H_2 .

A influência da quantidade relativa de catalisador foi significativa na desoxigenação dos materiais graxos utilizados neste artigo (Fig. 4A). Após 5 horas de reação, sob pressão de 10 bares de N_2 , utilizando o palmiste como matéria-prima, observou-se um decréscimo de 24 % no teor de desoxigenado no produto ao diminuir a quantidade de catalisador de 15% para 5%. Ao analisar o efeito da matéria-prima utilizada (Fig. 4B), observou-se que os materiais graxos brutos obtiveram conversões ligeiramente maiores para os materiais não hidrolisados, indicando que a hidrólise prévia não é necessária, o que diminui significativamente o custo do processo.

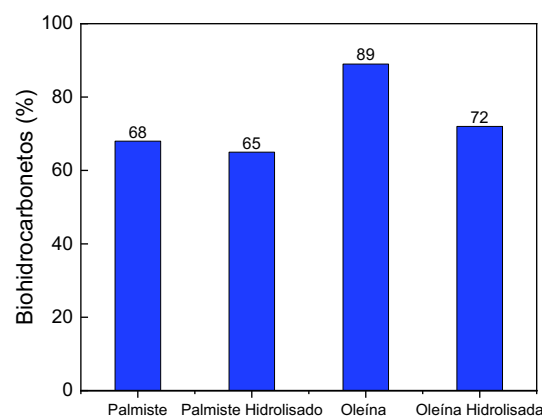
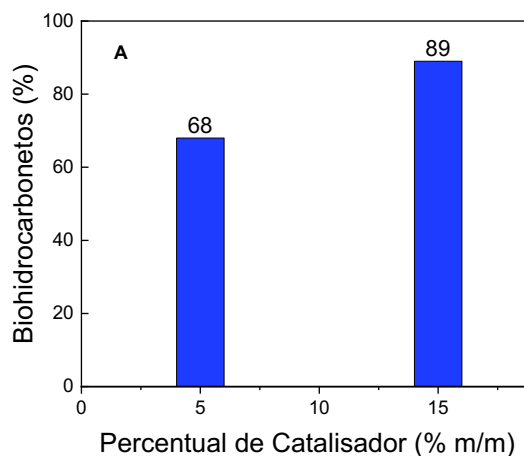


Figura 4. (A) Influência da quantidade de catalisador na desoxigenação do palmiste, e (B) influência da matéria-prima nas reações de desoxigenação dos diferentes materiais graxos, usando 10 bares de N_2 , durante 5h.

A Tabela 2 mostra os percentuais relativos de hidrocarbonetos lineares, ramificados, cíclicos, alcenos e aromáticos para os produtos de maiores rendimentos em hidrocarbonetos. A presença de compostos ramificados, cíclicos e aromáticos nos produtos evidencia a ocorrência de reações de isomerização e aromatização em pequena proporção.

Tabela 2. Teores de hidrocarbonetos, lineares, ramificados, cíclicos, alcenos e aromáticos nos produtos obtidos.

Matéria-prima	Palmiste	Oleína
Lineares	83	87
Ramificados	8	1
Cíclicos	0	4
Alcenos	8	4
Aromáticos	1	4

Os hidrocarbonetos ramificados foram obtidos nos teores de 8% e 1%, para os produtos provenientes do palmiste e da oleína,

respectivamente. Os compostos cíclicos foram obtidos apenas no produto proveniente da oleína de palma (4%). Tanto os compostos ramificados quanto os cíclicos contribuem para a melhora das propriedades a frio do combustível sem que haja perda de estabilidade oxidativa [27]. Além disso, foram obtidos compostos aromáticos, 1% e 4%, a partir do palmiste e da oleína de palma, respectivamente. Estes compostos apresentam piores características de combustão, favorecendo a formação de fuligem e a radiação da chama [28]. Por outro lado, estes são importantes na composição dos combustíveis, em especial nos combustíveis de aviação, para garantir a qualidade das vedações elastoméricas em componentes da aeronave, prevenindo vazamentos de combustível [29].

Conforme pode ser observado na Figura 5, os produtos passíveis de serem obtidos a partir da desoxigenação das matérias graxas estudadas possuem um grande potencial para a produção de biocombustíveis “drop in”. Apesar do palmiste possuir cadeias menores em sua composição (Tab. 1), seu produto apresentou maior teor de hidrocarbonetos na faixa de destilação do diesel, com predominância de hidrocarbonetos de cadeias mais longas. O maior teor de hidrocarbonetos a faixa da gasolina e do querosene no produto oriundo da desoxigenação da oleína pode ser explicado pelo maior número de insaturações dos ácidos graxos presentes na matéria-prima (Tab. 1), que são importantes sítios de craqueamento e isomerização [23]. Vale ressaltar que esta classificação se restringe apenas ao tamanho das cadeias carbônicas, desconsiderando as propriedades físico-químicas de cada combustível.

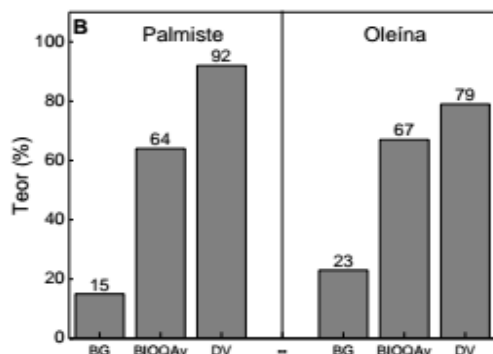


Figura 5. Percentual de biocombustíveis obtido via GC-MS baseado exclusivamente no tamanho das cadeias carbônicas (BG=biogasolina, BIOQAv= bioquerosene de aviação e DV= diesel verde).

Conclusões

A desoxigenação dos materiais graxos de palma catalisada por Nb_2O_5 se mostrou eficiente para a síntese biohidrocarbonetos com elevadas eficiências de desoxigenação (89%) sem a utilização de H_2 . Houve também isomerização simultânea parcial, em pequena escala, com formação de compostos ramificados, cíclicos e aromáticos.

Não foi observada diferença significativa quando se utilizou o gás N_2 ao invés do H_2 , o que deixa o processo mais barato e seguro.

O processo desenvolvido foi capaz de produzir até 15% de fração típica de biogasolina, 64% de hidrocarbonetos na faixa do querosene de aviação e 92% na faixa de composição do diesel quando se utilizou o palmiste como matéria-prima. Para a oleína foram produzidos 23% de biogasolina, 67 % de bioquerosene e 79% de diesel verde.

Os resultados apresentados mostram que o processo desenvolvido neste trabalho possui grande potencial para aplicação industrial, visto que se trata de um catalisar de baixo custo, além de ser um processo livre H_2 e não exigir altas pressões de N_2 .

Agradecimentos

Agradecemos o suporte financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI e ao Programa de Recursos Humanos ANP Para o setor de óleo e gás– PRH – ANP/MCTI).

Referências

- [1] Unicamp, Fapesp, Embraer, Boeing. Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: Plano de ação 2013;1:60.
- [2] ASTM. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons D7566. 2015. <https://doi.org/10.1520/D7566-15>.
- [3] Wang WC, Thapaliya N, Campos A, Stikeleather LF, Roberts WL. Hydrocarbon fuels from vegetable oils via hydrolysis and thermo-catalytic decarboxylation. Fuel 2012;95:622–9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.041>.
- [4] de Sousa FP, Cardoso CC, Pasa VMD. Producing hydrocarbons for green diesel and jet fuel formulation from palm kernel fat over Pd/C. Fuel Process Technol 2016;143:35–42. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.10.024>.
- [5] Tanabe K. Catalytic application of niobium compounds. Catal Today 2003;78:65–77. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00343-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00343-7).
- [6] Reguera FM, Araujo LRR De, Picardo MC, Bello FDO, Scofield CF, Pastura NMR, et al. The use of niobium based catalysts for liquid fuel production. Mater Res 2004;7:343–8. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000200021>.
- [7] Ziolek M. Niobium-containing catalysts—the state of the art. Catal Today 2003;78:47–64. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00340-1).
- [8] Nowak I, Ziolek M. Niobium Compounds:

Preparation, Characterization, and Application in Heterogeneous Catalysis. *Chem Rev* 1999;99:3603–24. <https://doi.org/10.1021/cr9800208>.

[9] Paulis M, Martín M, Soria D., Díaz a, Odriozola J., Montes M. Preparation and characterization of niobium oxide for the catalytic aldol condensation of acetone. *Appl Catal A Gen* 1999;180:411–20. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(98\)00379-2](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(98)00379-2).

[10] Scaldaferri CA, Pasa VMD. Hydrogen-free process to convert lipids into bio-jet fuel and green diesel over niobium phosphate catalyst in one-step. *Chem Eng J* 2019;370:98–109. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.063>.

[11] Scaldaferri CA, Pasa VMD. Production of jet fuel and green diesel range biohydrocarbons by hydroprocessing of soybean oil over niobium phosphate catalyst. *Fuel* 2019;245:458–66. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.179>.

[12] Lestari S, Mäki-Arvela P, Simakova I, Beltramini J, Lu QM, Murzin DY. Catalytic deoxygenation of stearic acid and palmitic acid in semibatch mode. *Catal Letters* 2009;130:48–51. <https://doi.org/10.1007/s10562-009-9889-y>.

[13] Harnos S, Onyestyák G, Kalló D. Hydrocarbons from sunflower oil over partly reduced catalysts. *React Kinet Mech Catal* 2012;106:99–111. <https://doi.org/10.1007/s11144-012-0424-6>.

[14] Zuo H, Liu Q, Wang T, Ma L, Zhang Q, Zhang Q. Hydrodeoxygenation of methyl palmitate over supported niobium catalysts for diesel-like fuel production. *Energy and Fuels*, vol. 26, 2012, p. 3747–55. <https://doi.org/10.1021/ef300063b>.

[15] Hoekman SK, Broch A, Robbins C, Cenicerros E, Natarajan M. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:143–69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>.

[16] Liu Q, Bie Y, Qiu S, Zhang Q, Sainio J, Wang T, et al. Hydrogenolysis of methyl heptanoate over Co based catalysts: Mediation of support property on activity and product distribution. *Appl Catal B Environ* 2014;147:236–45. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.08.045>.

[17] Ma L, Jia I, Guo X, Xiang L. Catalytic activity of Ag/SBA-15 for low temperature gas phase selective oxidation of benzyl alcohol to benzaldehyde. *Chinese J Catal* 2014;35:108–19. <https://doi.org/10.1016/S1872>.

[18] Krár, M ; Kovács, S; Boda, L; Leveles, L;Thernes, A; Wáhlne IH, Hancsók J. Fuel purpose hydrotreating of vegetable oil on NiMo/γ -Al₂O₃catalyst. *Hungarian J Ind Chem* 2009;37:107–11.

[19] Mohammad M, Kandaramath Hari T, Yaakob Z, Chandra Sharma Y, Sopian K. Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;22:121–32. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.026>.

[20] Choudhary T V., Phillips CB. Renewable fuels via catalytic hydrodeoxygenation. *Appl Catal A Gen* 2011;397:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.02.025>.

[21] Silva LN, Fortes ICP, de Sousa FP, Pasa VMD. Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C. *Fuel* 2016;164:329–38. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.081>.

[22] Silva LN. Síntese e caracterização de biodiesel a partir dos óleos da macaúba para usos especiais incluindo blends com querosene de aviação. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

[23] Reaume SJ, Ellis N. Synergistic effects of skeletal isomerization on oleic and palmitic acid mixtures for the reduction in cloud point of their methyl esters. *Energy and Fuels* 2012;26:4514–20. <https://doi.org/10.1021/ef3006564>.

[24] Cristina C, Guilherme V, Vinicius E, Castro R De, Márcia V, Pasa D. Comparison of the properties of special biofuels from palm oil and its fractions synthesized with various alcohols. *Fuel* 2014;135:406–12.

[25] Cristina C, Bejan C, Celante VG, Castro R De. Effect of Different Alcohols and Palm and Palm Kernel (Palmist) Oils on Biofuel Properties for Special Uses. *Energy and Fuels* 2014;5128–35. <https://doi.org/10.1021/ef500776u>.

[26] Silverstein, Robert M.; Webster, Francis X.; Kiemle DJ. Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos; 2006.

[27] Brasil, Nilo Indio do ; Araújo, Maria Adelina Santos ; Sousa ECM de. Processamento de Petróleo e Gás. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional; 2011.

[28] Farah MA. Petróleo e seus derivados: definição, constituição, aplicação, especificações, características de qualidade. Rio de Janeiro: 2013.

[29] Roitman T. Perspectivas e Propostas de Inserção de Bioquerosene de Aviação no Transporte Aéreo de Passageiros no Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.