

HIDRODESSULFURIZAÇÃO APLICADA À INDÚSTRIA NAVAL E DESAFIOS ENFRENTADOS POR GESTORES DE FROTAS MARÍTIMAS

HYDRODESULFURIZATION APPLIED TO THE MARINE INDUSTRY AND CHALLENGES FACED BY MARINE FLEET MANAGERS

HIDRODESSULFURACIÓN APLICADA A LA INDUSTRIA NAVAL Y RETOS ENFRENTADOS POR GESTORES DE FLOTAS MARÍTIMAS

Flavio Luiz França de Jesus¹
Lígia Fernanda Kaefer Mangini²

Resumo

A nova regulamentação da Organização Marítima Internacional (IMO), de janeiro de 2020, reduz a tolerância relativa ao teor máximo de enxofre no óleo combustível para conter a emissão de compostos organossulfurados produzidos por combustão, melhorar a qualidade do ar e evitar a formação dos ácidos sulfuroso e sulfúrico nas nuvens. Isto contribui para diminuir chuvas ácidas, degradação biológica e estrutural. O objetivo deste artigo, de caráter qualitativo, é tornar público o comprometimento do segmento naval com o meio ambiente através da redução dos teores de enxofre incinerados e lançados à atmosfera no processo de combustão dos motores de navios mercantes e de guerra que utilizam óleo combustível pesado. Aborda-se o processo de Hidrodessulfurização (HDS), sua finalidade, bem como meios alternativos de atendimento à regulamentação da *International Maritime Organization* (IMO 2020), tais como a aquisição de combustíveis com baixo teor de enxofre e alto valor agregado, a utilização de *scrubbers* de ciclos aberto ou fechado e a conversão para Gás Natural Liquefeito (GNL). Além disso, discutem-se os desafios enfrentados por gestores de frotas marítimas, as consequências da redução do teor de enxofre para as embarcações e os métodos de fiscalização das autoridades marítimas (*Port State Control*). Portanto, este trabalho pretende fornecer informações sobre redução de enxofre e os métodos alternativos para fins de consulta acadêmica e empresarial.

Palavras-chave: chuva ácida; hidrodessulfurização; craqueamento catalítico.

Abstract

New International Maritime Organization (IMO) regulations from January 2020 reduce tolerance on maximum sulfur content in fuel oil to reduce organosulfur compounds emissions produced by combustion, improve air quality, and prevent sulfurous and sulfuric acids formation in clouds. This contributes to decrease acid rain, biological and structural degradation. This article objective, of qualitative nature, is to make public the naval segment's commitment to the environment through the reduction of the sulfur contents incinerated and released to the atmosphere in combustion process of the engines of merchant and warship vessels that use heavy fuel oil. The Hydrodesulfurization (HDS) process is addressed, its purpose, as well as alternative means of compliance with International Maritime Organization (IMO 2020) regulations, such as the acquisition of fuels with low sulfur content and high added value, the use of open or closed cycle scrubbers and conversion to Liquefied Natural Gas (LNG). In addition, the challenges faced by marine fleet managers, the consequences of sulfur content reduction for vessels, and the enforcement methods of maritime authorities (Port State Control) are discussed. Therefore, this paper aims to provide information on sulfur reduction and the alternative methods for academic and business consultation purposes.

Keywords: acid rain; hydrodesulfurization; catalytic cracking.

Resumen

¹ Graduando do curso de Química pelo Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: f.flaviolfj@gmail.com.

² Professor Orientador no Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: lfkaefer@klabin.com.br.

La nueva reglamentación de la Organización Marítima Internacional (IMO), de enero de 2020, reduce la tolerancia relativa al contenido máximo de azufre en el aceite combustible para contener la emisión de compuestos organosulfurados producidos por combustión, mejorar la calidad del aire y evitar la formación de ácido sulfuroso y sulfúrico en las nubes. Eso contribuye para disminuir lluvias ácidas, degradación biológica y estructural. El objetivo de este artículo, de carácter cualitativo, es hacer público el compromiso del sector naval con el medio ambiente a través de la reducción de los contenidos de azufre incinerados y lanzados a la atmósfera, en el proceso de combustión de motores de navíos mercantes y de guerra, que utilizan combustible pesado. Se estudia el proceso de hidrodesulfuración (HDS), su finalidad, así como medios alternativos de atención a la reglamentación de la *International Maritime Organization* (IMO 2020), tales como la adquisición de combustibles con bajo contenido de azufre y alto valor agregado, la utilización de *scrubbers* de ciclo abierto y la conversión para Gas Natural Licuado (GNL). Además, se discuten los retos enfrentados por gestores de flotas navales, las consecuencias de la reducción del grado de azufre para las embarcaciones y los métodos de fiscalización de las autoridades marítimas (*Port State Control*). Por lo tanto, este trabajo pretende ofrecer informaciones sobre reducción de azufre y los métodos alternativos para fines de consulta académica y empresarial.

Palabras-clave: lluvia ácida; hidrodesulfuración; craqueo catalítico.

1 Introdução

O petróleo é conhecido também como “ouro negro”, devido a gama de seus derivados utilizados em larga escala por indústrias e consumidores finais. O petróleo bruto é formado majoritariamente por hidrocarbonetos, compostos de Carbono (C) e Hidrogênio (H) ligados entre si, com alguns ligantes heterogêneos, como Enxofre (S) e Nitrogênio (N). O petróleo pode ser encontrado em bacias sedimentares, em terreno seco ou em áreas de mar. Quando encontrado, o petróleo bruto é extraído e passa por processo de decantação para separar a água emulsionada, de modo que o óleo apresente maior teor de pureza. Então, é submetido a refino que produz derivados separados — à temperatura e pressão elevadas — por densidade no interior de torres de destilação, segregados quanto à pureza. Cada destilado é um produto diferente, como alcatrão, óleo combustível marítimo, óleo lubrificante, diesel, querosene, gasolina, nafta e GLP.

Os derivados têm sua importância e destinação final no mercado financeiro conforme sua aplicação e composição química. A quantidade dos derivados é consequência da característica do petróleo extraído, de maneira que fatores como densidade, viscosidade, propriedades parafínicas ou asfálticas são determinantes à produção dos derivados.

Este artigo trata do processo de hidrodesulfurização (HDS) aplicada à indústria naval, que consiste no craqueamento catalítico para redução das concentrações do contaminante enxofre (S), ainda no refino do petróleo bruto. O processo de HDS garantirá teores mais brandos de enxofre no óleo combustível marítimo para reduzir sua emissão à atmosfera após combustão no interior de navios. A necessidade desse abrandamento se deve à ocorrência de chuvas ácidas, produto da reação de compostos organosulfurados (SO_x) emitidos por gases de exaustão com oxigênio elementar (O_2), naturalmente encontrado na atmosfera, que, associado a moléculas de

água (H₂O) retidas nas nuvens, produzem ácido sulfuroso (H₂SO₃) ou até mesmo ácido sulfúrico (H₂SO₄). Estes são corrosivos para o meio ambiente e seres vivos, bem como tóxicos para o corpo humano, seja por emissão direta dos gases de exaustão ou em forma de solução nas chuvas.

Entretanto, como ter boa combustão sem impactar negativamente o meio ambiente, evitando penalizações por infringir acordos internacionais relacionados à qualidade dos gases de exaustão? O tema, ainda pouco abordado, origina-se na normativa IMO (2021), em vigor a partir de janeiro de 2020, cujo descumprimento gera multa. Portanto, é de suma relevância para tripulantes e gestores de frotas marítimas o entendimento dessa normativa, por ainda haver pouca informação disponível sobre os reais motivos do enquadramento analítico dos combustíveis comburidos a bordo. Além disso, motiva este estudo a explanação do conteúdo a outros segmentos do mercado para promover interesse e adaptação, visando desacelerar impactos ambientais. O objetivo deste artigo é tornar público o comprometimento do segmento naval com o meio ambiente, a exemplo da redução dos teores de enxofre incinerados e lançados ao meio ambiente no processo de combustão dos motores de navios mercantes e de guerra que utilizam óleo combustível pesado. Visa, ainda, oferecer fundamentação teórica a respeito da hidrodessulfurização, incentivar indústrias a utilizarem métodos sustentáveis de combustão e fornecer material de acesso e consulta para estudantes de escolas marítimas, como o Colégio Naval, a Escola Naval, a EFOMM e a ASOM/ASON.

2 Motivação, conceito e aplicação de hidrodessulfurização

Para dissertar a respeito da hidrodessulfurização (HDS) é preciso introduzir o leitor à origem de tal necessidade. Sabe-se que o petróleo é um combustível fóssil oriundo da decomposição de matérias orgânicas, lentamente formado sob temperatura e pressão durante milhares de anos.

[...] o planeta Terra tendo bilhões de anos, sabemos que com o passar do tempo ele sofreu inúmeras modificações, devido às mesmas, grandes quantidades de animais e vegetais ficaram soterrados e expostos a grande pressão e calor, formando hoje, após muito tempo, temperatura e pressão, o que conhecemos como petróleo, um líquido denso, viscoso e altamente inflamável (SILVA, 2011, [n.p.]).

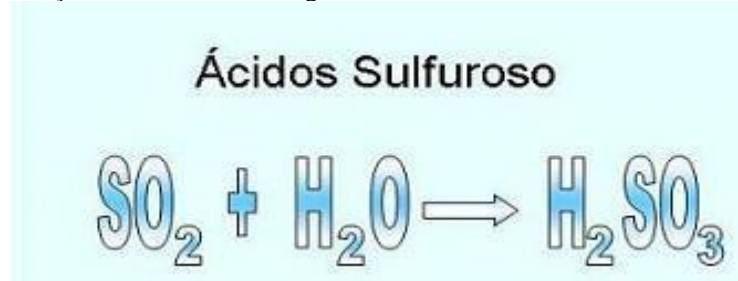
Após extraído de rochas sedimentares, o petróleo não pode ser imediatamente designado para as diversas finalidades que o empregam atualmente, que vão do óleo combustível residual até o gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizado nas residências (SILVA, 2011). O petróleo bruto

precisa ser refinado por meio de vários tratamentos físicos nas instalações de refinarias, como a decantação, a filtração e as destilações fracionada e a vácuo (BATISTA, 2019).

De acordo com a ASTM – American Society for Testing and Materials: “O petróleo é uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente de hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e/ou oxigenados, o qual é, ou pode ser removido da terra no estado líquido” (ASTM apud PEREIRA, 2010, p. 04).

Entre muitos compostos, o petróleo bruto tem os óxidos de enxofre (SO_x), agentes nocivos ao meio ambiente. “No refino do petróleo, durante a destilação, são formados produtos oriundos da decomposição térmica de compostos de enxofre e esses produtos são grandes fontes de corrosão.” (CANCIAN, 2010, p. 6). Durante a combustão dos produtos finais, como do óleo pesado e do diesel marítimo, existe a liberação de SO_x diretamente à atmosfera, que entra em contato com moléculas de água (H_2O) contidas nas nuvens e forma chuvas ácidas. A reação de formação de ácido sulfuroso na nuvem ocorre pela interação entre uma molécula de dióxido de enxofre e uma molécula de água $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$, síntese da reação representada na Figura 1.

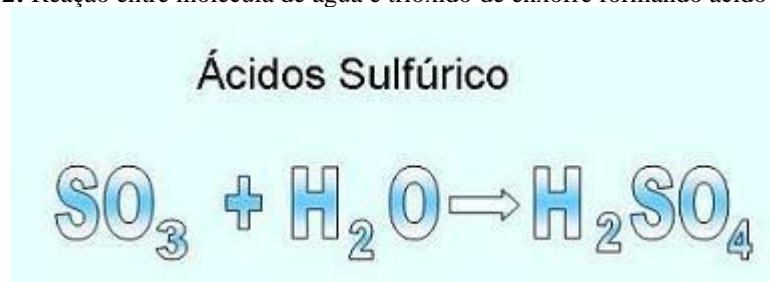
Figura 1: Reação entre molécula de água e dióxido de enxofre formando ácido sulfuroso.



Fonte: Pbworks (2007).

A reação de ácido sulfúrico na nuvem acontece pela interação entre uma molécula de trióxido de enxofre e uma molécula de água $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$, síntese da reação representada na Figura 2.

Figura 2: Reação entre molécula de água e trióxido de enxofre formando ácido sulfúrico.



Fonte: Pbworks (2007).

Quando esses ácidos se formam nas nuvens, ocorrem as chuvas ácidas. Segundo relata Coelho (2013), a chuva ácida está diretamente relacionada à destruição de árvores, morte de peixes, ao envenenamento do solo e de águas subterrâneas, assim como à corrosão e ao desgaste de prédios e monumentos. Portanto, a cadeia gerada pelo consumo dos derivados petrolíferos causa prejuízos sociais e ambientais. Observa-se a necessidade de reduzir ao máximo possível o percentual de enxofre do petróleo para minimizar problemas ambientais, e disto surgiu o conceito de hidrodessulfurização ou dessulfurização.

A hidrodessulfurização (HDS), também chamada dessulfurização, é um processo químico catalítico aplicado em larga escala por refinarias em todo o mundo pela adição de hidrogênio para remover compostos de enxofre de petróleo bruto. Segundo Pereira (2010, p. 33), os processos de dessulfurização são “[...] usados na remoção efetiva dos compostos de enxofre do óleo cru, tais como: gás sulfídrico, mercaptanas, sulfetos e dissulfetos. Este processo melhora a qualidade desejada para o produto final.” Isto é necessário por conta das elevadas concentrações de compostos de enxofre nas matérias orgânicas do petróleo bruto e produtos derivados, agregando maior valor e qualidade ao produto final, possibilitando comercialização de óleo combustível com menor índice de poluição após combustão.

Em razão da nova regulamentação da Organização Marítima Internacional, comumente chamada IMO 2020, foi preciso controlar os níveis de enxofre para reduzir os impactos sobre o meio ambiente e a saúde de seres vivos através da adoção de manobras de hidrotratamento.

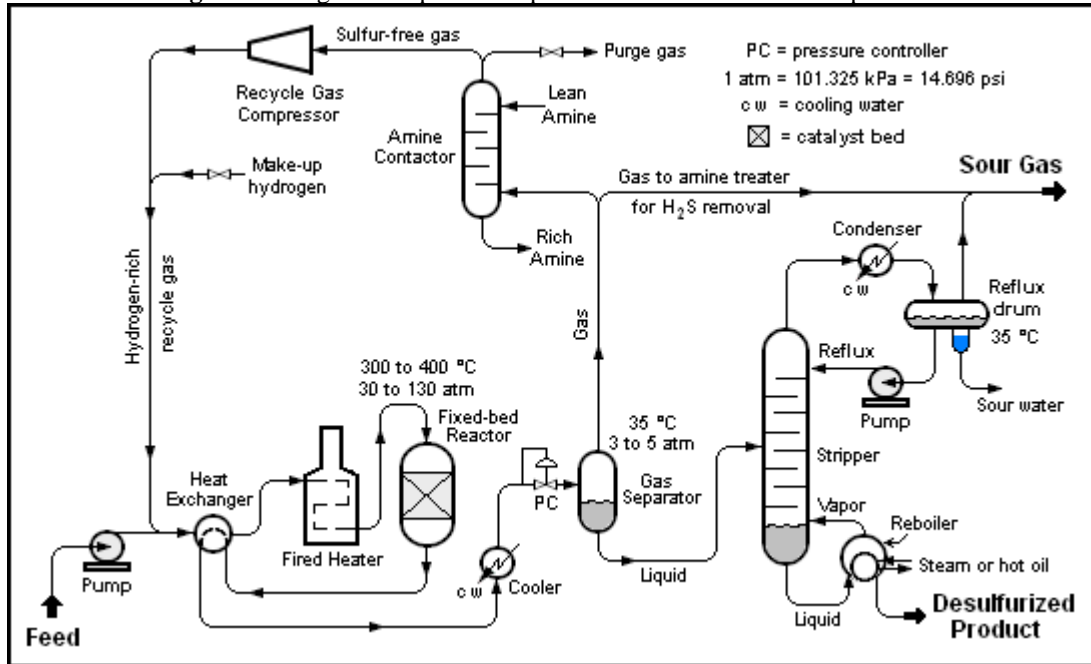
Os processos de hidrotratamento (HDS) vêm ganhando força nos parques de refino que atendem a mercados com especificações de combustíveis mais rigorosas. Um contaminante-chave para as especificações é o enxofre. Os compostos de enxofre a serem removidos no hidrotratamento (mais especificamente, na hidrodessulfurização) incluem as mercaptanas, os sulfetos, os tiofenos e os benzotiofenos (BTs). (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012, p. 101).

Isto posto, entende-se como de alta relevância o domínio e a perícia do conteúdo relativo ao processo de HDS no refino, a partir do hidrotratamento. Este processo é capaz de remover até 90% dos compostos organossulfurados em suas várias formas. A hidrogenação ocorre no processo de hidrodessulfurização, que por sua vez é submetido à altas temperatura (300°C–400°C) e pressão (20–130 atm). A maioria dos catalisadores inseridos nos reatores para as operações de HDS são compostos de NiMo/ γ Al₂O₃ e CoMo/ γ Al₂O₃.

Comparando os catalisadores NiMo e CoMo, observa-se que aqueles promovidos por Co são mais seletivos para as reações de dessulfurização direta, enquanto os que utilizam Ni em sua composição possuem maior atividade para a hidrogenação. (BRAGGIO, 2015, p. 34).

A mecânica da reação ocorre no interior dos reatores, como testifica a autora. “[...] o processo ocorre em reatores de leito com 3 fases distintas, sendo a fase líquida o óleo alimentado, o hidrogênio em fase gasosa e os catalisadores constituem a fase sólida” (AYDIN *et al.*, 2015 apud TANAKA, 2018, p. 24). A seguir, apresenta-se o diagrama esquemático de uma planta de HDS em uma refinaria hipotética (Figura 3).

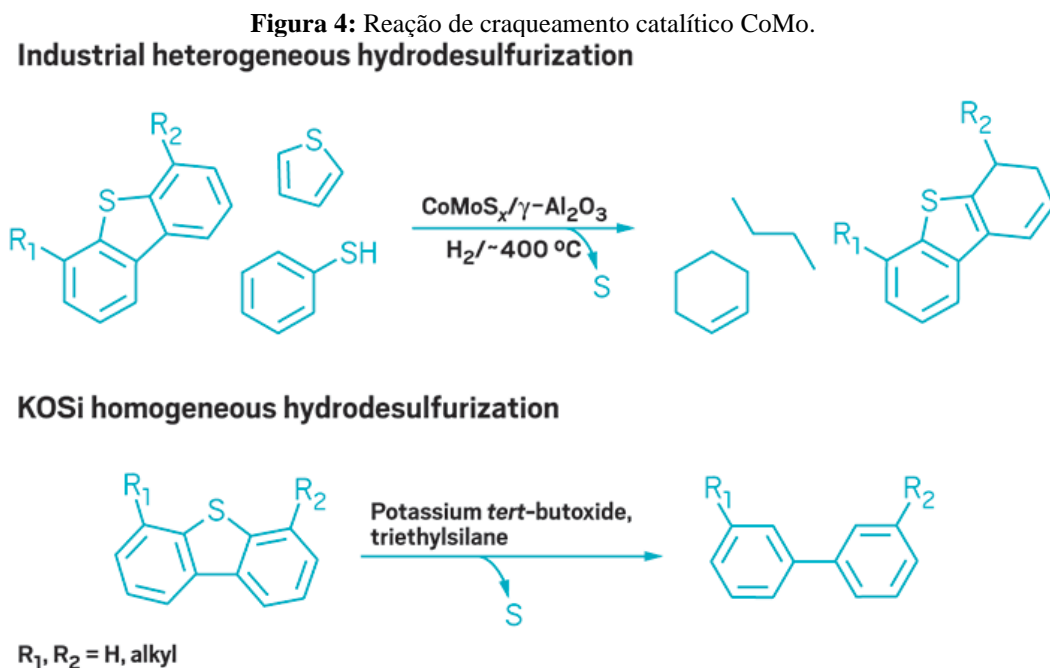
Figura 3: Diagrama esquemático planta de HDS em refinaria hipotética.



Fonte: Shenyang Blower Works Group (2018).

O diagrama revela a dinâmica na qual o petróleo bruto recebe carga de hidrogênio, bombeado para um trocador de calor, em seguida transferido para uma câmara de aquecimento, submetido a cerca de 400° C em condição de aproximadamente 130 atm de pressão, depois transferido para o reator catalítico, onde ocorre a primeira etapa do HDS. Após passar pelo reator catalítico, o petróleo vai novamente para o trocador de calor e segue para um resfriador por indução à água fria, transferido para uma válvula controladora de pressão com *bypass*. A partir de então, o petróleo vai para uma unidade separadora de gases, sujeito à pressão de aproximadamente 5 atm e temperatura de 35° C. Seu produto de topo é o gás sulfeto de hidrogênio (H₂S), enquanto o produto de fundo (petróleo), líquido, atravessa para a torre de destilação atmosférica de onde sairão os derivados líquidos e gasosos separados por densidade. O produto mais denso é o petróleo dessulfurizado que sairá pelo fundo, passando por trocador de calor, onde o vapor gerado na condensação retorna à torre atmosférica e o petróleo dessulfurizado segue para novos processos unitários pós-HDS. O produto de topo passará por condensador, então será transferido para um tambor de refluxo, onde água e vapor ricos em H₂S

e CO₂ são separados. O H₂S que sai da planta separadora de gases tem parte rejeitada e parte enviada para torre de regeneração rica em aminas que quebrarão as moléculas de H₂S, separadas em moléculas de enxofre e hidrogênio elementares. O hidrogênio é reciclado e reinicia o processo.



Fonte: C&EN – Chemical & Engineering News (2017).

O processo de dessulfurização de resíduos é uma tecnologia bem estabelecida que envolve tratamento do combustível a altas temperaturas e pressões. A instalação de tal planta em uma refinaria requer grande investimento de capital inicial. Como o óleo combustível marinho é um produto residual, os refinadores talvez não queiram fazer esse investimento na produção de combustível. Para os refinadores, pode ser mais atraente investir em processos de refino secundários adicionais que produzem pouco ou nenhum óleo combustível, mas geram fluxos de destilados mais valiosos. Como medida alternativa, o óleo combustível pode ser produzido através de *sweet oils*, ou petróleos doces, naturalmente extraídos com baixos teores de enxofre, muito comumente encontrados em águas brasileiras.

Quanto ao teor de enxofre, o petróleo pode ser classificado como doce (baixo teor) ou azedo (alto teor). São classificados como azedos os óleos com percentual de enxofre superior a 0,5%; estes têm seu valor comercial reduzido devido à corrosão e toxicidade do enxofre, fatores estes que contribuem para maiores custos no processo de refino (CARDOSO, 2004; FARAH, 2002; TAVARES, 2005 apud GOMES, 2013, p. 29).

Os chamados *sour crudes*, ou petróleos azedos, possuem altos teores de enxofre e têm menor valor de mercado, por não passarem pelo processo de adoçamento, isto é, as etapas de

HDS. Contudo, esse valor tende a mudar globalmente conforme oferta e demanda. Segundo Capana (2008, p. 24), na década de 1980, o limite de concentração de enxofre em óleo combustível era de até 1,3%, equivalente a cerca de 13 mil ppm (partes por milhão), muito maior do que o aceitável atualmente pelos países signatários da Organização Marítima Internacional (IMO), que, a partir de janeiro de 2020, fez valer o limite máximo aceitável de 0,5% no interior das embarcações, sob pena de multa.

2.1 Consequências da remoção de enxofre

Os países signatários da Organização Marítima Internacional devem estar em concordância com as regras impostas para obter equidade independentemente da região, segmento marítimo ou poder aquisitivo. A IMO é composta por 174 estados-membros signatários da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL), que se reúnem para discutir regras de navegação marítima internacional aplicadas também em seus mares territoriais. Em vigor desde 1º de janeiro de 2020, a IMO 2020 determina que a emissão de dióxido de enxofre de navios deve ser reduzida de 3,5% para 0,5%. Esta nova regra diminuirá substancialmente as emissões nocivas de enxofre, ajuste que visa preservar o planeta e combater o aquecimento global.

Problemas relacionados à compatibilidade e estabilidade podem ocorrer ainda que se utilize combustível pouco sulfurado, devido à natureza dos petróleos que originam o óleo combustível. Supondo que determinado volume de óleo combustível de caráter aromático seja abastecido com carga de caráter parafínica, a depender das concentrações e volumes, haverá incompatibilidade e consequente formação de lama no fundo dos tanques.

A Petrobrás relata, em material publicado em abril de 2018, que a redução do enxofre pelo processo de HDS, assim como em outros compostos polares, reduz também a lubrificidade, fator indesejável, visto que, com menor lubrificidade, ocorre desgaste prematuro das bombas e dos componentes dos sistemas de injeção de combustível, diminuindo o tempo normal de vida das bombas e dos injetores devido ao insuficiente poder de lubrificação do combustível. A empresa Agricopel relatou em um blog, em maio de 2020, que outro problema relacionado à redução de compostos de enxofre é a concentração de parafinas naturalmente presentes no óleo combustível. Ao navegar por regiões de frio extremo, as parafinas cristalizam e interrompem o fornecimento de combustível, causando entupimento de filtros e pane na embarcação, além de danos ao motor.

2.2 Métodos alternativos de combustões sustentáveis

A IMO 2020 entrou em vigor com força total a partir de janeiro de 2020 devido à poluição por SO_x resultante da queima de combustíveis na navegação marítima, principalmente o Óleo Combustível Pesado, do inglês *Heavy Fuel Oil* (HFO), que naturalmente emite grandes concentrações de contaminantes quando comburido, principalmente os óxidos sulfurados. Os gestores de frotas marítimas tiveram que se reinventar e decidir quais alternativas adotar para evitar penalizações.

A primeira opção disponível é utilizar combustíveis hidrodesulfurados acrescidos de *blend*, misturas de diesel marítimo DMA, ou MGO (do inglês *Marine Gas Oil*), que são frações de destilação mais leves e menos sulfuradas, formando os chamados VLSFO (*Very low Sulphur Fuel Oil*); combustíveis com teores de até 0,5% de enxofre e ULSFO (*Ultra Low Sulphur Fuel Oil*); combustíveis com concentrações de enxofre menores ou iguais a 0,1%, definidas conforme a fração dos *blends*. “A solution to this would be to call fuels up to 0.10% ultra-low sulphur or ULS for short, and to call fuels that are above 0.10% but meeting a 0.50% limit very low sulphur, or VLS for short.” (STIRLING, 2017, [n.p.]).

A segunda opção é recorrer a sistemas lavadores de gases, comumente chamados *scrubbers*, excelentes alternativas para economizar a longo prazo. Algumas empresas decidiram adotar o sistema lavador de gases, de modo que podem adquirir combustíveis com alto teor de enxofre (3,5% S) e submetê-los aos *scrubbers* para redução da concentração de enxofre e enquadramento com a norma, economizando na aquisição de combustível com alto teor de enxofre e baixo valor agregado de mercado, alternativa reconhecida pela MARPOL.

Compliant fuels include very low sulphur fuel oil (VLSFO) and marine gas oil (MGO). Some ships limit their air pollutants by installing exhaust gas cleaning systems, also known as "scrubbers". This is accepted under the MARPOL Convention as an alternative means to meet the sulphur limit requirement. (IMO, 2021, [n.p.]).

Os *scrubbers* são sistemas lavadores de gases de exaustão de navios que possibilitam redução das emissões de SO_x e de materiais particulados. Para instalar um *scrubber* no navio, segundo EPE (2019), é necessário investimento que varia de 2 a 10 milhões de dólares. Existem dois tipos de tecnologias de *scrubbers* comercializadas: a 1) *open-loop* (ciclo aberto) remove o enxofre dos gases de exaustão por um processo de lavagem com circulação de água do mar e descarta a água contaminada diretamente no oceano; a 2) *closed loop* (ciclo fechado) necessita de um investimento maior, por conta da instalação de serpentina de aquecimento, bomba de circulação, utilização de água técnica produzida a bordo, de tanques de sedimentação e de

armazenamento, além de elemento alcalino para neutralização de pH no interior dos tanques e linhas para rejeito em portos, o que também gera gasto.

Os *scrubbers* do tipo circuito aberto são mais baratos e exigem menos manutenção que os sistemas de circuito fechado, justamente por serem mais simples e não necessitarem pagar por destinação final em portos. Todavia, alguns portos ao redor do mundo, como os de Cingapura, Fujairah, Antuérpia, e todos os portos localizados na China, não admitem uso de sistemas abertos para descarte em águas sob sua responsabilidade. Para simplificar a visualização, apresenta-se o comparativo dos sistemas de ciclos aberto e fechado na Figura 5.

Figura 5: Sistemas scrubbers (ciclos aberto e fechado).

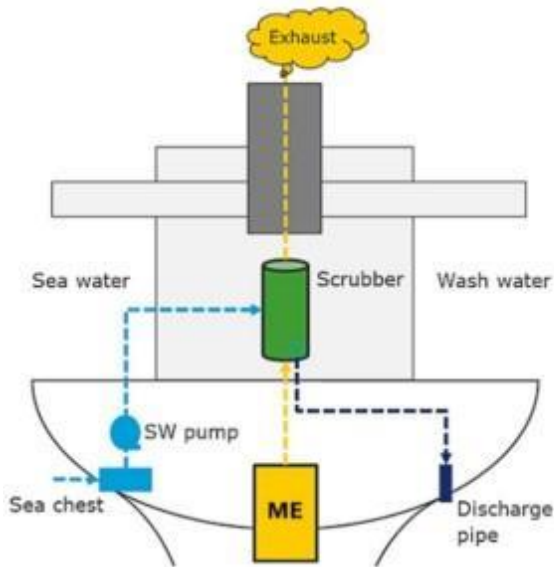


Figura 2 Esquema de funcionamento de um scrubber com ciclo aberto (open-loop)

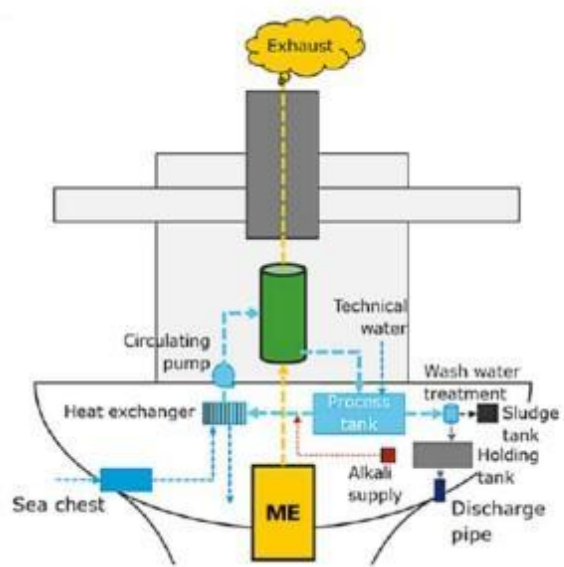


Figura 3 Esquema de funcionamento de um scrubber com ciclo fechado (closed-loop)

Fonte: DNV GL (2019) apud Ministério de Minas e Energia (2019).

A terceira opção é a conversão para Gás Natural Liquefeito (GNL), do inglês *Liquefied Natural Gas* (LNG), excelente alternativa para navios fabricados com esta tecnologia, mas o processo de conversão pode ser muito custoso, o que o torna pouco ou nada compensatório.

O GNL é composto por hidrocarbonetos leves, o gás predominante é o metano (CH_4). Embora derive de combustível fóssil, o GNL é alternativa de combustível que produzirá combustão quase isenta de contaminantes, por ser mais leve e ter características naturais mais puras. Sem cinzas e materiais particulados, produz baixas emissões de compostos de enxofre (SO_x) e dióxidos de carbono (CO_2).

O gás natural liquefeito é obtido por meio do processo de liquefação do gás natural à temperatura de aproximadamente -162°C e à pressão atmosférica. No estado líquido o seu volume é reduzido de 1/600 em relação ao ocupado nas condições ambientais e pesa menos de 500 kg/m^3 , isto é, metade do peso da água para um mesmo volume ocupado (MOTTA, 2015, p. 14).

Para haver conversão é necessário fazer algumas alterações no interior e na estrutura da embarcação. Segundo Motta (2015), para que a embarcação deixe de comburir diesel e se mova a GNL é preciso substituir motores a diesel por a gás, sobretudo, os tanques de bordo inadequados para armazenamento de gases. Toda essa modificação ocupa mais espaço físico nas dependências em comparação com o projeto original da embarcação.

Uma vez convertido, ainda assim será necessário empregar diesel na partida dos motores. Então, utiliza-se cerca de 1% de diesel e 99% de GNL para as operações, independentemente do modelo de embarcação. Por se tratar de um método relativamente novo, nem todos os portos e as empresas de barcas ofertam abastecimento de GNL. Como agravante, há o desafio de encontrar tripulantes habituados a operar, conservar e manter equipamentos que compõem a embarcação movida a GNL.

O uso do gás natural liquefeito como combustível marítimo para essas embarcações exige uma configuração diferenciada das convencionais. Essa estrutura deve contar com os seguintes sistemas: sistema de geração de energia composto por motores dual fuel principais ou auxiliares; sistema propulsivo; sistema de automação e detecção do gás e o sistema de armazenamento, manuseio e controle do gás – LNGPac. (MOTTA, 2015, p. 93).

A partir dos dados apresentados, os gestores de frotas podem refletir sobre o método mais interessante de locomoção marítima, que se encaixe adequadamente nas estratégias e nos princípios de cada companhia de navegação para realizar uma combustão sustentável, segura para o meio ambiente e conforme as normativas.

2.3 Fiscalizações

As medidas previamente apresentadas objetivam o cumprimento das normas estabelecidas pela MARPOL, que contempla a IMO 2020. Como qualquer atividade regulada ou controlada por órgão, as embarcações também são passíveis de fiscalizações, de modo que o descumprimento gera penalizações, o que representa o temido *downtime*, com impacto direto sobre o capital da companhia e do centro de custo dos gestores de frotas marítimas. Além de atrasar as programações de operações, representará baixa monetária com o pagamento de possíveis multas e condicionamento do combustível. No Brasil, a Diretoria de Portos e Costas (DPC) controla e gerencia os chamados *Port State Controls* (PSC), inspetores navais

autorizados a ingressarem a bordo de embarcações estrangeiras em águas nacionais para fiscalizar amostras de óleo, documentações referentes aos combustíveis e à embarcação. Os chamados *Flag State Control* (FSC) realizam a mesma atividade relacionada ao controle da concentração de enxofre nos combustíveis disponíveis a bordo de embarcações locais.

Os inspetores navais podem ser divididos em três níveis: 1) Oficiais da Marinha do Brasil, da Reserva ou Oficiais da Marinha Mercante com curso específico; 2) Militares da ativa qualificados para a atividade, lotados em Capitânicas, Delegacias e Agências; e 3) Militares da ativa lotados em navios da Marinha de Guerra.

O que significa Controle de Navios pelo Estado do Porto (PORT STATE CONTROL – PSC)? É a inspeção de embarcações de bandeira estrangeira que demandam aos portos nacionais, que tem por finalidade verificar se as condições da embarcação e seus equipamentos estão de acordo com os requisitos estabelecidos nas Convenções e Códigos Internacionais ratificados pelo Brasil. (MARINHA DO BRASIL, 2021, [n.p.]).

Os inspetores dos níveis 2 e 3 são habilitados para elaborar notificações ou relatos de ocorrência que podem ser transformados em autos de infração nas Capitânicas, Delegacias ou Agências. A Diretoria de Portos e Costas publicou a circular n.º 7/2019, em que explícita os objetivos das inspeções e em que são baseadas, além de mencionar que o inspetor poderá coletar amostras representativas dos combustíveis para verificação de acordo com o apêndice VI, do Anexo VI, da Convenção MARPOL. O documento também cita que, em caso de não conformidade das amostras de combustível, ou deficiência no *scrubber* a bordo, a Autoridade Marítima analisa caso a caso, comunica o país de origem e determina prazo para sanar a deficiência, aplica multa e retém o navio, se necessário.

3 Metodologia científica

Para obter respostas e resultados satisfatórios relativos à problematização deste artigo, utilizou-se o método de pesquisa descritiva com a finalidade básica de identificar métodos de conveniência para gestores de frotas marítimas estarem em conformidade com a regulamentação IMO 2020. Adotou-se uma visão bibliográfica e documental, por meio de achados legítimos de agências, autoridades respeitadas no mercado e posições imperativas sobre o tema, como, por exemplo, a Organização Marítima Internacional, a Marinha do Brasil, a Petrobras, entre outros órgãos e cientistas que elaboraram artigos relacionados ao tema abordado, o que foi possível explorando fontes primárias e secundárias de pesquisa. Abordaram-se métodos qualitativos e fenomenológicos, com ênfase na apreciação e no

aprofundamento de estudos documentais para correlacionar os dados mais fácil e compreensivelmente para decidir qual alternativa se enquadrará à política da companhia, representada por seus gestores. As pesquisas partiram de uma visão superficial do que é petróleo, suas características físico-químicas e seus processos unitários de refino, assim como dos prejuízos sociais e ambientais resultantes da negligência e não conformidade com a IMO 2020. A finalidade do esforço de investigação foi viabilizar entendimento da real necessidade da aplicação do processo catalítico de Hidrodessulfurização (HDS), realizado nas dependências de refinarias. Autores diversos corroboram com a premissa da aplicação desse método.

Reduções nos teores de enxofre propostos pela regulamentação da Organização Marítima Internacional devem ser adotadas e seguidas. A grande questão é definir o método viabilizador mais condizente com seus interesses, questão mais pessoal, relativa a perfil administrativo, estratégias de mercado e prospecções para o futuro.

Apresentaram-se, neste trabalho, métodos validados e reconhecidos pela organização internacional, pela MARPOL e demais órgãos fiscalizadores em países signatários, como a utilização de combustíveis acrescidos de *blends* de menor concentração de enxofre para reduzir o ciclo de concentração no combustível. Este método é defendido pela Petrobrás, principal fornecedora no Brasil. Expuseram-se também métodos de redução de concentração de enxofre no combustível através da instalação de lavadores de gases, de ciclos abertos e fechados, em que autores discorrem sobre suas preferências e implicações. Por fim, há o projeto de conversão de combustível, que propõe substituição do Óleo Combustível pesado por Gás Natural Liquefeito (GNL). Todos esses temas foram abordados de forma clara em seus pontos positivos e negativos, com intuito de auxiliar decisões estratégicas.

4 Considerações finais

Com o avanço tecnológico e a necessidade de mover as engrenagens do capitalismo é comum haver concorrência entre companhias de mesmo segmento para apresentar inovações e facilidades, de modo que se mantenham competitivas no mercado. Contudo, por vezes ignora-se a responsabilidade ambiental e explora-se ao máximo os recursos naturais. Portanto, é imprescindível a existência e permanência de organizações mundiais para controlar a situação e evitar o padecimento das populações. Quando se trata do ambiente de navegação marítima tem-se, por exemplo, a Organização Marítima Internacional (IMO), controlada pela Organização das Nações Unidas (ONU), e a Convenção Internacional para a Prevenção da

Poluição Causada por Navios (MARPOL), com suporte de órgãos fiscalizadores, como a Marinha.

Observou-se que um dos produtos de combustão de navios movidos a óleo combustível marítimo são compostos de enxofre, bastante prejudiciais ao meio ambiente e à saúde de seres vivos, perturbando o equilíbrio ambiental. Isto motivou projetos de desaceleração dos impactos ambientais da combustão rica em compostos de enxofre. O limite máximo de teor de enxofre, até dezembro de 2019, era de 3,5% S, e passou para 0,5% S a partir de janeiro de 2020. A intenção da norma IMO 2020 é reduzir drasticamente a contaminação do meio ambiente a longo prazo, diminuindo ocorrências de chuvas ácidas e inalações de compostos SO_x. Essa norma deve ser acatada por todas as embarcações operando em solo signatário da IMO, mas, a responsabilidade de ter o combustível a bordo em conformidade com a norma é inteiramente do responsável pela embarcação, de modo que os fornecedores do *Bunker* não são obrigados a prover combustível dentro dos parâmetros, deixando os gestores de frotas marítimas desconfortáveis com a necessidade de adquirir equipamentos analíticos capazes de ler teores de enxofre e intensificar a rotina analítica de bordo, porquanto as fiscalizações por parte dos órgãos fiscalizadores, sejam *Port State Control* ou *Flag State Control*, visam, durante inspeções de rotina, sem aviso prévio, o cumprimento de normas ambientais, entre elas a IMO 2020. A norma relativamente nova fez gestores de frotas marítimas precisarem buscar maneiras de adequar o combustível disponível a bordo para ser comburido. Entre as alternativas estão: adquirir combustíveis com no máximo 0,5% S, de companhias capazes de fornecer, obter e instalar a tecnologia de lavadores de gases, chamados *scrubbers*, que permitem obter a bordo óleo combustível com teor de enxofre de 3,5% S, somente se o equipamento estiver funcional e ajustado.

Há a opção por modelos de ciclo aberto ou fechado, que se tornou problemática devido a restrições de acesso em determinados portos para embarcações que utilizam o sistema de ciclo aberto, pois, após lavagem, o enxofre removido é descartado no mar em forma de solução ácida, e, para instalação do sistema de ciclo fechado, o custo é maior, assim como o espaço físico demandado no interior da embarcação, além da necessidade de equipamentos auxiliares para o processo e a dosagem de químicos. Isto torna tal alternativa bastante custosa.

Por último, e bem mais dispendioso, está a conversão do combustível em Gás Natural Liquefeito (GNL), severamente menos poluente. Contudo, também requer maior espaço interno, mudança nas estruturas dos tanques e na praça de máquinas dos navios devido a uma alteração radical no projeto. Desta forma, os motores devem ser partidos utilizando diesel.

Torna-se especialmente dificultosa a baixa oferta de GNL por parte dos fornecedores, porquanto o diesel predomina no mercado marítimo.

Cada empresa de navegação tem liberdade para decidir o que melhor lhe atende, como obter o *Very Low Sulphur Fuel Oil* (VLSFO), instalar o sistema lavador de gases, converter o combustível para GNL ou até mesmo adquirir navios projetados para GNL. Sugerem-se novas pesquisas relativas à perda de lubricidade do óleo combustível com baixo teor de enxofre, visto que, com a redução do enxofre, perde-se também parte da lubricidade, acarretando problemas de desgaste por atrito e deterioração de equipamentos a bordo, os quais têm sua vida útil reduzida. Isto gera necessidade de utilizar aditivos para aumento de lubricidade, além do gasto com o combustível hidrodesulfurado.

Referências

AGRICOPEL. Problemas causados pelo congelamento do diesel no tanque. **AgricopeL**. [S.l.], 2020. Disponível em: <http://blog.agricopel.com.br/congelamento-diesel/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

BATISTA, Carolina. Refino do petróleo. **Toda matéria**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/refino-petroleo/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

BRAGGIO, Flávia de Almeida. **Avaliação do método de preparo de catalisadores NiMo/Al₂O₃ para a hidrodesulfurização de dibenzotiofeno**. 2015. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. p. 29.

BRASIL. Comitê de Avaliação do Abastecimento de Combustíveis Aquaviários. **Estudos da Resolução CNPE n.º 18/2019**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019. p. 26.

CANCIAN, Rayelli Venturini. **Estudo da distribuição de enxofre em frações destiladas de petróleos e análise multivariada das frações**. 2010. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

CAPANA, Giulliano Humberto. **Estudo do impacto do enxofre presente no diesel na emissão de poluentes e em tecnologia de pós-tratamento de gases de escape**. 2008. Dissertação (Mestre Profissional em Engenharia Automotiva) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. p. 24.

COELHO, Pedro. Chuva ácida: causas, consequências e medidas de prevenção. **ENGQUIMICASANTOSSP — Blog de engenharia química**. [S.l.], 15 nov. 2013. Disponível em: <https://www.engquimicasantoss.com.br/2013/11/chuva-acida.html>. Acesso em: 2 fev. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **IMO 2020: a nova regulamentação de combustíveis marítimos**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2019. p. 22.

FARIAS, Flávir. Entrevista “chuva ácida”. **PBWORKS**. [S.l.], 2007. Disponível em: <http://proascg25.pbworks.com/w/page/18658922/Entrevista>. Acesso em: 2 fev. 2022.

GOMES, Leonardo Henrique. **Estudo do petróleo e suas principais técnicas analíticas**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) — Fundação Educacional do Município de Assis, Assis, 2013. p. 29.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **IMO2020 fuel oil sulphur limit — cleaner air, healthier planet**. London: IMO, 2021. Disponível em: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/02-IMO-2020.aspx>. Acesso em: 2 fev. 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Circular n.º 7/2019**. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, 2019a. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/legislacao/circulares/CIRCULAR%207-2019%20ANEXO%20VI%20MARPOL-1-4%20.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Inspeção e vistoria naval**. Rio de Janeiro: Diretoria de Portos e Costas, 2019b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/cprs/PerguntasInpecaoVistoria>. Acesso em: 2 fev. 2022.

MARINHA DO BRASIL. Portaria DPC/DGN/MB n.º 21, de 6 de julho de 2021. Aprova as Normas da Autoridade Marítima para Operação de Embarcações Estrangeiras em Águas Jurisdicionais Brasileiras NORMAM 04/DPC (1ª Revisão). **Diário Oficial da União**: seção 1, ed. 128, p. 58, Brasília, DF, 6 jul. 2021.

MOTTA, Rafaela Fernandes. **Uso de gás natural em navios de apoio**: infraestrutura de abastecimento. 2015. Projeto de Graduação (Engenharia Naval e Oceânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. p. 14; 81; 93.

PEREIRA, Francisco Sávio Gomes. **Petróleo e petroquímica**. Recife: Instituto Federal Pernambuco, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Pereira-57/publication/311995956_PETROLEUM_AND_PETROCHEMICAL_in_portuguese_PETROLEO_E_PETROQUIMICA/links/5868470108ae329d620dfd00/PETROLEUM-AND-PETROCHEMICAL-in-portuguese-PETROLEO-E-PETROQUIMICA.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

PETROBRAS. **Óleo diesel — informações técnicas**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/diesel-manual.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2022.

RITTER, Stephen K. New approach plucks more sulfur from diesel fuel. **Chemical & Engineering News**, [S.l.], v. 95, issue 9, 27 fev. 2017. Disponível em: [New approach plucks more sulfur from diesel fuel \(acs.org\)](http://www.acs.org). Acesso em: 2 fev. 2022.

SHENYANG BLOWER WORKS GROUP CORPORATION. **Hydro treating and hydrocracking**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.sbw-turbo.com/lingyu.asp?id=16>. Acesso em: 2 fev. 2022.

SILVA, André Luis Silva da. Petróleo como principal fonte de hidrocarbonetos. **Info Escola**. [S.l.], 2011. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/petroleo-como-principal-fonte-de-hidrocarbonetos/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

STIRLING, John. Making sense of low sulphur fuel terminology: ULSFO RM/DM and VLSFO RM/DM. **IBIA**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://ibia.net/2017/05/26/making-sense-of-low-sulphur-fuel-terminology-ulsfo-rmdm-and-vlsfo-rmdm/>. Acesso em: 2 fev. 2022.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. P. **Fundamentos de refino de petróleo: tecnologia e economia**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. 101.

TANAKA, F. L. **Revisão dos métodos alternativos à hidrodessulfurização do diesel: desafios e perspectivas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2018. p. 24.