

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Borra oleosa de petróleo tratamento termoquímico e descarte: uma revisão crítica

AUTORES:

Felipe Matheus Pereira da Silva
Eric Alberto Ocampo Batlle
Luiz Augusto Horta Nogueira
Marcos Vinicius Xavier Dias

INSTITUIÇÃO:

UNIFEI – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

BORRA OLEOSA DE PETRÓLEO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO E DESCARTE: UMA REVISÃO CRÍTICA

Resumo

Esta revisão apresenta um estudo sobre o tratamento termoquímico dos resíduos gerados no refino do petróleo, no caso, a borra oleosa (BO), visando seu potencial de recuperação energética e minimização de riscos ambientais. A borra oleosa é um resíduo composto por hidrocarbonetos, água e sólidos perigosos. No entanto, a composição da borra contribui para que esta tenha um alto potencial energético. Além da obtenção energética, o tratamento é muito necessário para redução do volume do resíduo, estabilizando elementos perigoso e metais pesados do resíduo sólido. Neste artigo de revisão, a metodologia utilizada para a realização da pesquisa foi a leitura de artigos e documentos que apresentam estudos sobre as conversões termoquímicas mais utilizadas para o tratamento da BO. No entanto, antes foi necessário um maior entendimento sobre os tipos de borras existentes, além de entender a sua composição. Então, foram apresentadas e discutidas a pirólise e a gaseificação, além de resultados obtidos por outros autores, demonstrando os benefícios da utilização destes métodos, tanto na obtenção de produtos energeticamente aproveitáveis, quanto ambientalmente, frente ao método da incineração, que não apresenta tantos benefícios ambientais e energéticos. Com isso, foi possível concluir que os métodos de tratamentos apesar de ainda não serem tão viáveis, demonstram ser o futuro para a disposição final desses resíduos, de modo a reduzir os impactos ambientais gerando um maior aproveitamento energético, o que pode acarretar em um controle no impacto econômico.

Palavras-chave: Borra oleosa; Gaseificação; Incineração; Pirólise; Tratamento térmico

Abstract

This review presents a study on the thermochemical treatment of waste generated in the oil refining process, in this case, oily sludge (OS), aiming at its potential for energy recovery and minimization of environmental risks. Oily sludge is a residue composed of hydrocarbons, water and hazardous solids. However, the composition of the sludge contributes to its high energy potential. In addition to obtaining energy, the treatment is very necessary to reduce the volume of the waste by stabilizing hazardous elements and heavy metals in the solid waste. In this review article, the methodology used to conduct the research was the reading of articles and documents that present studies on the most commonly used thermochemical conversions for the treatment of OS. However, first it was necessary to have a better understanding of the types of oily sludge that exist, as well as to understand their composition. Then, pyrolysis and gasification were presented and discussed, in addition to results obtained by other authors, demonstrating the benefits of using these methods, both in obtaining energy-using products, and environmentally, facing the incineration method, which does not present as many environmental and energy benefits. Therefore, it was possible to conclude that the methods of treatment, despite not being so viable yet, demonstrate to be the future for the final disposal of these residues, in order to reduce the environmental impacts by generating a greater energy utilization, which can lead to a control in the economic impact.

Keywords: Gasification; Oily sludge; Pyrolysis; Treatment; Waste;

Introdução

Sabe-se que o uso dos combustíveis fósseis, como o petróleo, para a geração de energia, causa grande impacto ambiental. O principal problema causado pelo uso de combustíveis fósseis é a poluição atmosférica, que é gerada pela emissão de gases de efeito estufa. Além do uso, as atividades de perfuração, produção, refino, transporte, processamento e distribuição geram inúmeros resíduos que podem gerar grandes impactos ambientais, dentre eles está a borra oleosa de petróleo. Apesar de haver uma grande previsão sobre a utilização indispensável de biocombustíveis e bioenergia, a transição energética não consegue se dar de maneira tão abrupta, por conta do alto custo das energias mais sustentáveis. Assim, a reutilização, a partir de um tratamento prévio, de resíduos é muito visada como uma nova alternativa para a geração energética.

No ano de 2020, de acordo com N. Sönnichsen (Statista, 2021), a produção global de petróleo foi em torno de 4.2 bilhões de toneladas, incluindo petróleo cru, petróleo de xisto, areias betuminosas e líquidos de gás natural. N. Mirghaffari (2017), estimou que a cada ano são geradas mais de 60 milhões de toneladas de borra no mundo e mais de 1 bilhão de toneladas de borra oleosa acumulada, o que tende para um crescimento, visto o aumento da demanda de derivados de petróleo. Essa borra apresenta grande concentração de hidrocarbonetos, o que pode permitir sua reutilização, diminuindo assim, os impactos gerados.

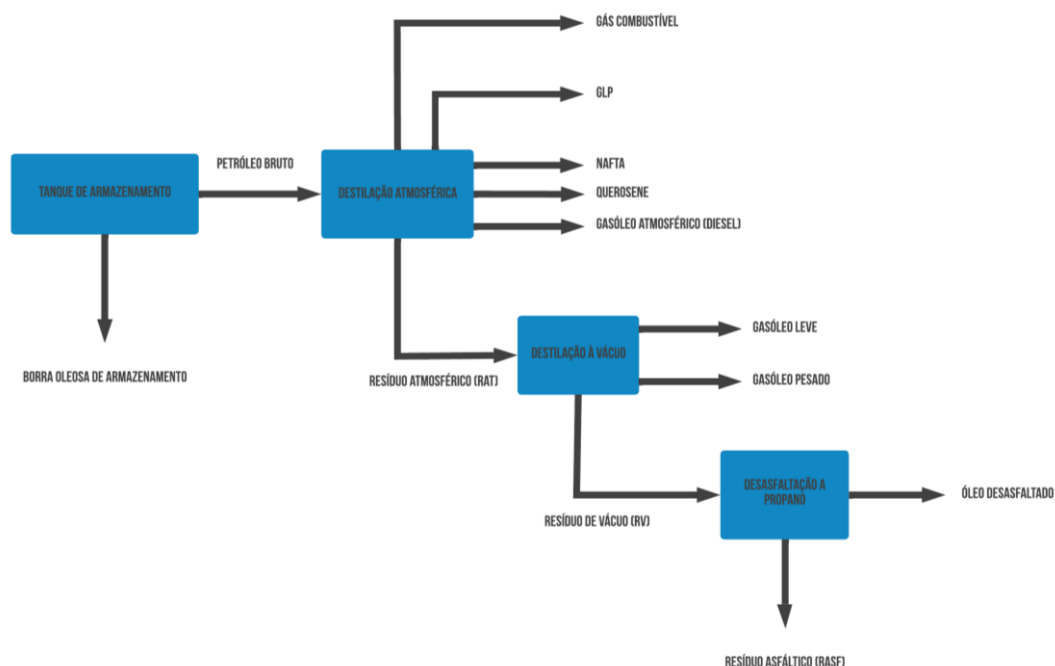
De acordo com Hu, G. et al. (2015), a recuperação do óleo contido na borra é um método muito visado, pois pode ser uma maneira alternativa de gerar energia e combustíveis, diminuindo assim a demanda destes combustíveis fósseis e reduzindo os impactos ambientais e gases de efeito estufa. Dentre estes métodos, podemos citar: incineração, sodificação/estabilização, irradiação por ultrassom, irradiação por micro-ondas, biodegradação, centrifugação, *landfarming*, extração por solventes, surfactantes, pirólise, flotação com espuma, gaseificação, entre outros. No entanto, alguns destes métodos podem conter altos custos ou gerar alguns impactos ambientais, então, a necessidade da utilização do método mais favorável é crucial.

Borra oleosa de petróleo

De acordo com Jafarinejad, S. (2016), a indústria do petróleo inclui inúmeros processos como, exploração, extração, transporte, refino, entre outros sendo caracterizado por *upstream*, *midstream* e *downstream*. Os processos de identificação, localização de fontes de óleo, assim como sua extração e transporte são conhecidos como *upstream*. O refino é caracterizado como *midstream*. Já a parte logística de distribuição e transporte de seus produtos, é chamado de *downstream*.

Com isso, de acordo com Li, J. et al. (2020), durante todos os processos de exploração, estoque, transporte e refino do petróleo, há a geração de inúmeros resíduos, sendo então, pela separação dos hidrocarbonetos pesados dos mais leves, e uma associação com as partículas sólidas e a água, que a então conhecida como borra oleosa de petróleo é gerada, se depositando no fundo de tanques e sendo removida no processo de limpeza (AYOTAMUNO, M.J. et al., 2007), além ser encontrada também em etapas do processo de refino, como na destilação atmosférica, destilação a vácuo e desasfaltação a propano, como na Figura 1. Com foco no processo de refino do petróleo cru, de acordo com Hu, G. et al. (2013), é possível assumir que a cada 500 toneladas da matéria prima, 1 tonelada de borra é produzida, sendo essa produção dependente do esquema do processo, sistema de armazenamento de óleo e as características químicas do petróleo (JEREZ, S. et al., 2021).

Figura 1 - Refino do petróleo e tipos de borra



Fonte: Adaptado de LIMA, R.O., 2012

Na composição da borra, considerada um resíduo recalcitrante, é notável a presença de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais pesados, sólidos e água. De acordo com Jerez, S. et al. (2021), a sua composição frequentemente varia entre 15-50% (fração mássica) de hidrocarbonetos de petróleo, enquanto água e sólidos variam entre 30-85% e 5-46%, respectivamente, o que depende da sua origem, esquema de processo de refino, equipamento utilizado e até mesmo reagentes utilizados pelo processo de refino.

Tendo em vista sua grande porcentagem de materiais orgânicos e quantidade gerada anualmente e por apresentar uma variável composição química, cada borra pode ter propriedades físicas muito diferentes, como densidade, poder calorífico e viscosidade. Com isso a necessidade uma caracterização da borra utilizada é um passo muito importante para que seja possível definir um tratamento (JEREZ, S. et al., 2021).

Como existem vários tipos de borras, é possível uma análise para entender a grande variedade de borras e, assim, demonstrar a grande dificuldade frente ao seu tratamento. Analisando a Tabela 1, é possível ter uma visão generalista sobre a composição de cada tipo de borra, ou seja, a quantidade de óleo (compostos orgânicos), água e sólidos.

Tabela 1 – Composição física de variados tipos de borra oleosa em fração mássica

Categoria	Borra Oleosa	Composição Física			Referência
		Óleo	Água	Sólidos	
BOA	1	36,19	46,99	16,82	GONG, Z. et al. (2018)
BOA	2	55,4 ± 0,7	41,0 ± 1,5	3,6 ± 0,8	LIN, B. et al. (2019)
BOR	3	30	50	20	HU, G. et al. (2020)
*	4	8,3	19,2	72,5	LIN, Z. et al. (2021)
BOA	5	17,79	3,54	78,67	BAO, Q. et al. (2021)
*	6	28,23	26,54	45,23	CHU, Z et al. (2021a)
BOA	7	23,87	*	*	DUAN, Y. et al. (2022)
BOA	8	15,9	44,7	39,4	QIN, H. et al. (2022)

* = Não mencionado / BOR = Borra Oleosa de Refinaria / BOA = Borra Oleosa de Armazenamento

Pela Tabela 1 nota-se que, no geral, a borra oleosa varia muito em relação ao teor de óleo, água e sólidos, sendo 8,3-66,3%, 3,54-50% e 1,5-78,67%, respectivamente. Tais valores demonstram uma grande variação na porcentagem de cada componente nas borras oleosas, no entanto, pela mesma tabela é notável que a grande maioria das amostras analisadas estão dentro da faixa de frequência apresentada por Jerez, S. et al. (2021). Por fim, como em alguns casos há grande presença de água nas amostras, para um tratamento termoquímico como a incineração, pirólise e gaseificação, uma etapa de secagem pode ser necessária, visto a necessidade de separação da água e óleo de maneira efetiva.

A análise SARA, é a análise que determina a quantidade de hidrocarbonetos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, presentes na borra. A quantidade de cada tipo de hidrocarboneto determina se o óleo será considerado leve ou pesado, sendo que quanto mais resinas e asfaltenos mais pesado será o óleo, o que dificultará o seu processamento. Com os dados obtidos foi possível uma compilação das análises, sendo apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Compilação de Análise SARA das BO's em fração mássica

Frações	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos	Referência
BO 1	22,88	16,11	21,28	39,73	GONG, Z. et al. (2018)
BO 2	39,3 ± 1,0	32,1 ± 0,5	15,6 ± 3,0	13,0 ± 1,5	LIN, B. et al. (2019)
BO 4	50,8	29,2	16,7	3,3	LIN, Z. et al. (2021)
BO 5	43,23	23,03	33,31	0,43	BAO, Q. et al. (2021)
BO 6	40,45	19,97	9,54	30,04	CHU, Z et al. (2021a)
BO 8	45,70	21,12	19,12	2,91	QIN, H. et al. (2022)

Além da análise da composição física, é muito importante uma análise elementar da borra oleosa, apresentada na Tabela 3, pois é o que determina a capacidade de transformação da borra oleosa em um gás de síntese de boa qualidade, isso se deve ao fato de que a quantidade de carbono e hidrogênio é o que possibilita uma maior quantidade de geração de Monóxido de Carbono (CO) e de Hidrogênio (H₂), gases predominantes no gás de síntese (syngas), além de outros elementos que podem atrapalhar na sua produção.

Tabela 3 – Composição elementar de variados tipos de borra oleosa

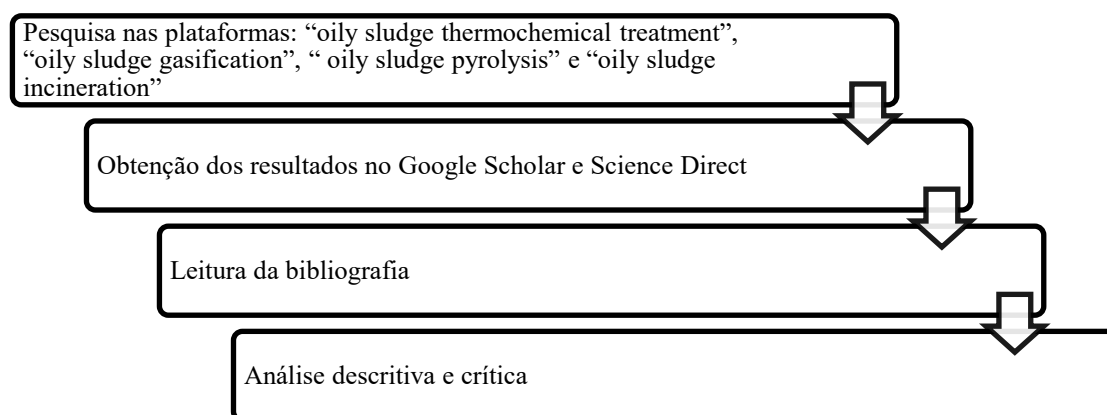
Frações	Carbono	Hidrogênio	Nitrogênio	Enxofre	Oxigênio	Relação C/H	Referência
BO 1	23,45	3,01	0,22	1,19	11,97	7,79	GONG, Z. et al. (2018)
BO 2	60,1 ± 0,6	11,4 ± 1,4	0,7 ± 0,1	0,9 ± 0,1	26,9 ± 2,0	~ 5,27	LIN, B. et al. (2019)
BO 6	29,52	6,25	1,84	1,31	7,53	4,72	CHU, Z et al. (2021a)
BO 7	22,8	3,17	0,43	1,89	29,88	7,19	DUAN, Y. et al. (2022)
BO 8	83,19	10,98	0,59	0,53	4,23	7,58	QIN, H. et al. (2022)

Analizando os pontos apresentados acima e o fato de estarmos vivendo um momento de necessidade de transição energética e/ou então métodos mais sustentáveis de produção de energia. O presente artigo tem como intuito fazer uma análise bibliográfica em busca de conhecer alguns dos métodos termoquímicos, visando um melhor aproveitamento da borra de petróleo, de modo a definir uma disposição mais ambientalmente correta.

Metodologia

Para a realização deste artigo de revisão foram realizadas pesquisas bibliográficas relacionadas à conversão termoquímica de borra oleosa de petróleo como forma de tratamento e aproveitamento energético. Para a escolha dos artigos revisados foram analisados os mais relacionados ao tema, sendo 80% deles, feitos entre os últimos 5 anos. A partir da Figura 2 é possível analisar as etapas para a produção do trabalho.

Figura 2 - Fluxograma de pesquisa



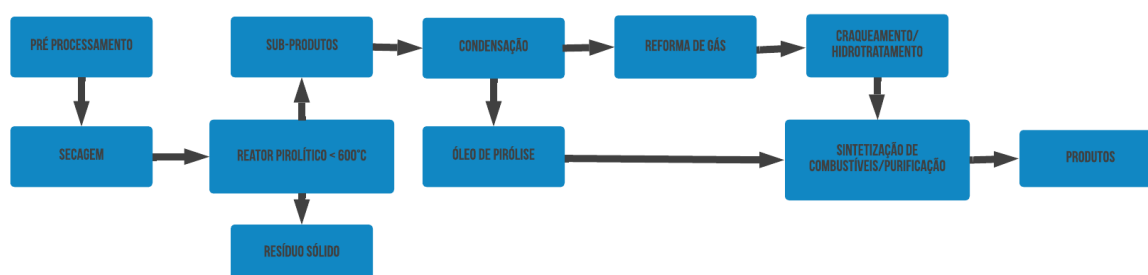
Resultados e Discussão

Métodos de tratamento

Pirólise

O processo de pirólise é caracterizado pela decomposição térmica de materiais orgânicos em temperaturas entre 500 e 1000 °C em um ambiente inerte, envolvendo o craqueamento de moléculas orgânicas em moléculas menores, ou seja, hidrocarbonetos de cadeia curta, como apresentado por Sadrameli, S. M. (2015). De acordo com J. Liu et al. (2011), o principal produto derivado da pirólise rápida é o óleo de pirólise, que pode ser utilizado como combustível ou para obter novos produtos mais valorizados, no entanto, há também o gás não condensável e o carvão residual sólido. A pirólise pode ocorrer de três modos, sendo eles: pirólise em leito fluidizado borbulhante, em leito fluidizado circulante e pirólise a vácuo (MARTÍNEZ GONZÁLEZ, A., 2019). A Figura 3 demonstra um processo de pirólise.

Figura 3 - Diagrama do sistema de pirólise simplificado (Adaptado de Zango 2020 apud Murungi, P.I. et al., 2022)



Wan, G. et al. (2022) a partir da pirólise convencional utilizando de nitrogênio como reagente em diferentes temperaturas, obtiveram que a maior produção de óleo como produto foi obtida a uma temperatura de 550 °C. Compostos a base de nitrogênio e enxofre foram amplamente distribuídos entre alcatrão e outros produtos gasosos, sendo que quanto maior a temperatura, menor a presença desses elementos no char. Além de que a pirólise causou a fixação de metais pesados. Zhang, X. et al. (2022), a partir de um estudo sobre catalisadores de minérios naturais e minérios carregados com níquel, obtiveram que após a adição do catalisador carregado com níquel, a produção de gás e H₂ aumentaram em relação à utilização de minérios naturais. Em uma temperatura de 900 °C, a adição de C-XY(Ni), C-OL(Ni) e C-ID(Ni) aumentaram a produção de H₂ em 239,29; 216,07 e 122,01 mL, respectivamente. Kamali, A. et al. (2022), a partir do estudo do catalisador Ni/HZSM-5 na pirólise da borra oleosa, obteve um aumento na produção de gás e uma diminuição de óleo como produto, no entanto há uma maior performance na redução de compostos oxigenados, nitrogenados e sulfurados, neste produto, além de um aumento da densidade energética de 30,54MJ/Kg (pirólise convencional) para 44,24MJ/Kg com a utilização do catalisador. Lin, F. et al. (2022), analisaram os efeitos da co-pirólise da borra oleosa com diferentes resíduos que continham ferro, assim, obtiveram que a presença desses resíduos reduziu a energia de ativação, a temperatura necessária para a pirólise, e aumentaram a qualidade do óleo, além de sua produção e de H₂.

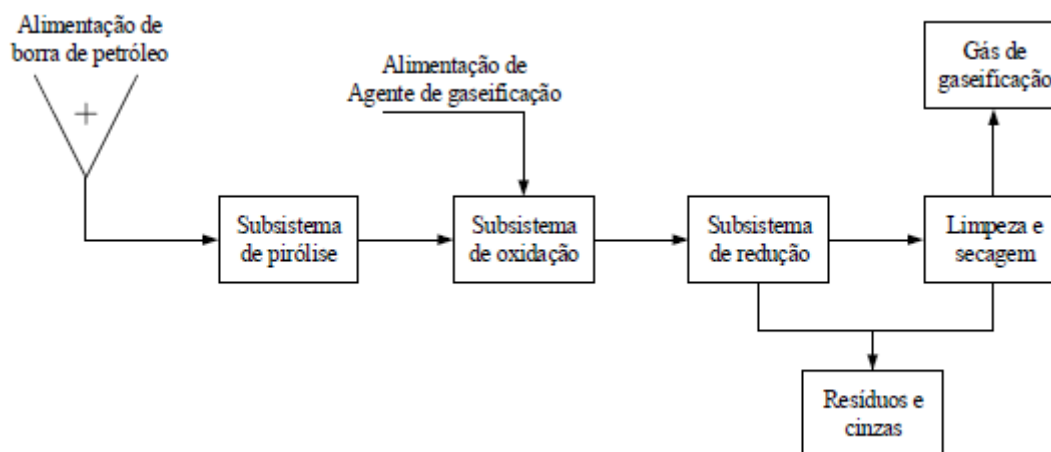
Do modo de vista ambiental, é notável a menor liberação de NO_x e SO_x em comparação à incineração, o que demonstra ser uma vantagem. No entanto, apesar dessa vantagem, a pirólise é

limitada por conta de altos custos de equipamentos e baixo valor econômico dos produtos, o que impede sua implementação em escala industrial (HU, G. et al., 2017). Além disso, como a borra contém alto teor de água, sua secagem é um fator que pode acarretar em aumento dos custos. Além disso, a pirólise da borra gera partículas de sólido que podem acarretar em incrustações e bloqueios nos equipamentos. Sendo assim, é necessário que haja um método de remoção eficiente, para que não haja problemas e, assim, custos de manutenção do maquinário (GAO, N. et al., 2018).

Gaseificação

Assim como a pirólise, a gaseificação é uma tecnologia muito visada, já que reduz o volume de resíduos, removendo, também, compostos orgânicos tóxicos e faz a fixação de metais pesados no sólido resultante (ARENA, U. 2012). No processo de gaseificação, a borra oleosa de petróleo é transformada em um gás de síntese, o qual, segundo Ramos, A. et al. (2018), é composto principalmente por CO, H₂, CH₄ e alguns hidrocarbonetos leves, como o etileno, etano, propano e propileno, sendo que essa mistura pode ser utilizada na geração de energia e calor. Para obter a gaseificação do resíduo é necessário a utilização de um agente gaseificador, que geralmente são ar, oxigênio e vapor, no entanto existe a possibilidade haver misturas tanto entre esses três agentes, quanto com outros tipos de gases como no experimento de Chu, Z. et al. (2021b). Os dois tipos de gaseificadores mais utilizados são os de leito fixo e leito fluidizado. A gaseificação demonstra ser um método muito promissor para o tratamento de borra de petróleo, dado que o gás obtido pode ser utilizado na mesma refinaria como insumo ou até mesmo como matéria prima para outros processos, assim como no Processo de Fischer-Tropsch, onde tal gás pode ser transformado em outros produtos, sendo eles: gasolina, querosene, gasóleo, lubrificantes, bio-diesel, ou seja, hidrocarbonetos líquidos. O processo de obtenção do gás de síntese se dá como apresentado na Figura 4.

Figura 4: Diagrama do sistema de gaseificação (Castillo Santiago, Y., 2020)



De acordo com Chu, Z. et al. (2021b), a utilização de vapor como agente de gaseificação faz com que, ao entrar em contato com os hidrocarbonetos, estimule a produção de H₂, por conta de reações de reforma de hidrocarbonetos pesados em compostos menores, o que é muito favorável, visto que, além disso, promove a formação de, principalmente, CH₄, CO e outros hidrocarbonetos leves, garantindo a produção de gás de síntese (Martínez González, A., 2019). Segundo Martínez González, A. et al. (2019),

oxigênio puro faz com que haja uma quebra térmica da borra e com que ocorra reações de reforma a vapor de hidrocarbonetos pesados, resultando em melhor concentração de CO e H₂ do gás produzido.

A produção de gás de síntese depende tanto da composição da borra oleosa, quanto do agente utilizado para a sua gaseificação e a sua razão de equivalência (RE) à borra. Com isso, Martínez González, A. et al. (2018), obtiveram, para uma RE de 0,20, um total de 0,468 Nm³/ kg BO. De acordo com Castillo Santiago, Y. et al. (2021), a produção de gás de síntese é fortemente influenciada pelo agente de gaseificação utilizado para o processo. Com isso, apresentaram, com um RE em torno de 0,25 e 0,45, que quando utilizaram ar como agente, a produção de gás de síntese variou de 0,81 a 1,15 Nm³/ kg BO, enquanto para oxigênio variou de 0,59 a 0,68 Nm³/ kg BO. Segundo Castillo Santiago, Y. et al. (2022), quanto maior o RE, maior a tendência de crescimento na produção de gás de síntese, pois o RE afeta diretamente na temperatura de gaseificação, o que faz com que ocorra maior decomposição e, assim, maior reforma dos hidrocarbonetos. Além disso, demonstraram que com a utilização de oxigênio, em torno de 0,1 e 0,5 de RE, obtiveram entre 0,5 a 0,7 Nm³/ kg BO, enquanto para uma mistura ar/vapor houve uma obtenção de 0,7 a 1,3 Nm³/ kg BO, sendo esse aumento dado principalmente, pela presença de vapor.

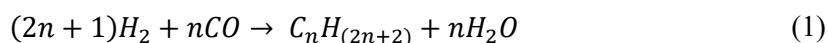
Além da produção do gás de síntese, a composição desse gás gerado é muito importante para saber qual o melhor meio de sua utilização. Na Tabela 4 foi feita uma compilação de algumas composições de gás de síntese obtidas em trabalhos anteriores.

Tabela 4 – Composição de gases de síntese

Referências	Martínez González, A. et al. (2018)	Martínez González, A. et al. (2019)	Mazzoni, L. et al. (2020)	Chu, Z. et al. (2021b)	Y. Castillo Santiago et al. (2022)
CO (vol.%)	32,26	40,57	32,35	*	40,8
CO ₂ (vol.%)	*	8,71	7,03	9,00	7,47
H ₂ (vol.%)	52,14	45,64	60,61	76,00	37,21
CH ₄ (vol.%)	15,60	1,96	0,02	*	0,03
H ₂ /CO	1,62	1,12	1,87	*	0,91
H ₂ /CO ₂	*	5,24	8,62	8,44	4,98

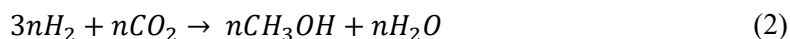
vol.% = Fração volumétrica / * = Não mencionado ou não foi possível obter

A partir da Tabela 4 é possível verificar uma a razão entre alguns dos componentes do gás de síntese. De acordo com Martínez González, A., (2019), para a produção de combustíveis líquidos sintéticos é necessária uma razão de H₂/CO > 2, garantindo assim uma proporção estequiométrica mínima, o que é confirmado ao analisar o processo de Fischer-Tropsch, onde há a transformação de gás de síntese em hidrocarbonetos de diversos pesos moleculares, que segue a Equação (1).



Pelas razões de cada estudo é possível afirmar que há a necessidade de adição de H₂ para que tais gás de síntese fossem utilizados para a obtenção de combustíveis líquidos, visto que a maior razão encontra de H₂/CO foi de 1,87.

Por outro lado, assim como para a obtenção de combustíveis líquidos, existe uma razão para a produção de metanol (H_2/CO_2), onde pela Equação (2) é possível encontrar uma razão balanceada de $H_2/CO_2 = 3$. Com uma análise do gráfico é notável que a razão H_2/CO_2 de todos os estudos foi acima de 3, o que viabiliza a produção de metanol, no entanto, em alguns casos houve grande excesso de H_2 , fazendo com que seja necessária a injeção de CO_2 para uma produção mais eficiente.



Além de poder ser utilizado para obtenção de combustíveis líquidos sintéticos, metanol e H_2 , o gás de síntese pode ser utilizado de diversas maneiras, principalmente geração de energia elétrica. Segundo Martínez Gonzalez, A. (2019), foi encontrado a partir de uma simulação da gaseificação da borra oleosa, utilizando do software Aspen HYSYS® v8.6, uma geração de energia elétrica de 1,54kWh/kg BO, onde foi considerado uma eficiência de 25,5% em um motor de combustão interna a gás e o oxigênio com agente de gaseificação. De acordo com Martínez González, A. et al. (2019), também utilizando do mesmo software apresentado acima, obtiveram um índice de geração elétrica de 1,35kWh/kg BO utilizando de ar/vapor como agente gaseificador em um sistema integrado de conversão termoquímica e geração energética. Castillo Santiago, Y. et al. (2021) demonstraram a gaseificação de uma borra oleosa utilizando de oxigênio como agente gaseificador, onde obtiveram eletricidade a partir de três meios diferentes: Motor de combustão interna a gás, Ciclo de Rankine a vapor e Microturbina a gás, onde a produção energética variou de 0,32 a 0,49 kWh/kg BO, 0,14 a 0,18 kWh/kg BO e 0,37 a 0,423 kWh/kg BO, respectivamente. Além disso, Castillo Santiago, Y. et al. (2022) analisaram a influência do agente gaseificador na produção energética, onde obtiveram em uma microturbina a gás utilizando de oxigênio, um índice de geração de eletricidade entre 0,42 e 0,37 kWh/kg BO e utilizando de ar/vapor, um índice entre 0,42 e 0,39 kWh/kg BO.

Por fim, ambientalmente, é notável que a gaseificação se destaca, já que há uma alta transformação de hidrocarboneto complexos em produtos mais utilizáveis. No entanto, assim como a pirólise é um método que demanda de alto nível tecnológico e econômico, principalmente pelo fato de que a pirólise é uma etapa necessária para que ocorra a gaseificação, portanto, pode ser considerada como uma tecnologia um pouco mais complexa, podendo apresentar os mesmos problemas que a pirólise apresenta.

Método de eliminação

Incineração

A incineração é um processo que é dado pela combustão completa da borra oleosa, ou seja, é feita em um ambiente com a alta presença de oxigênio e controlado para a remoção de compostos perigosos (Hu, G. et al., 2020). De acordo com Murungi, P.I. et al. (2022), as borras oleosas que apresentam alto teor de água, necessariamente, são submetidas a uma etapa de secagem, e logo após isso é incinerado a temperaturas acima de 850 °C, podendo ser utilizados outros combustíveis para que a queima seja completa. Para a completa decomposição de hidrocarbonetos mais complexos é necessária uma temperatura acima de 1000 °C, de modo a reduzir o volume do resíduo e, assim, eliminar compostos perigosos. A sua utilização pode ser uma fonte de geração de energia elétrica (Hu, G. et al., 2020). Os maiores problemas encontrados para esse método é o fato de alto gasto energético para a queima, o que faz com que aumente o custo, além disso os produtos gerados por esse método, cinzas e gases residuais,

não são muito bem aproveitados, visto que não energeticamente úteis, sendo possível, apenas um tratamento prévio a sua disposição final no meio ambiente (Teng, Q. et al., 2020).

Conclusões

Os resíduos gerados pela indústria petrolífera, assim como em outras indústrias, são inevitáveis, portanto, a necessidade de encontrar uma forma de diminuir os impactos gerados por esses produtos indesejáveis é extremamente importante, com isso, sabe-se que as conversões termoquímicas como a incineração, além de resolver o problema de volume do resíduo, garante um aproveitamento energético, no entanto, os danos ambientais gerados podem atrapalhar sua utilização. Com isso, métodos de tratamento foram encontrados, como a pirólise a gaseificação, aparentando diminuir os impactos gerados por métodos de eliminação. É notável que estes métodos apresentaram bons resultados nos estudos, promovendo melhor aproveitamento energético e, melhor redução e estabilização de compostos perigosos, no entanto, o alto custo de equipamentos e necessidade de secagem, impossibilita, economicamente, sua implementação industrial. Portanto, pesquisas e inovações tecnológicas são muito necessárias para essa área, de modo a eliminar limitações, como a variada composição da borra, e melhorar resultados, podendo haver o implemento dessas técnicas, e então o aproveitamento energético de resíduos de forma mais ambientalmente correta.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) por financiar através do PRH-ANP 46.1 essa pesquisa através do sistema de bolsas.

Referências Bibliográficas

- ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, v. 32, n. 4, p. 625–639, 2012.
- Bao, Q., Huang, L., Xiu, J., Yi, L., & Ma, Y. (2021). Study on the treatment of oily sludge in oil fields with lipopeptide/sophorolipid complex bio-surfactant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111964. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.111964>
- Castillo Santiago, Y., Martínez González, A., Venturini, O. J., & Yepes Maya, D. M. (2021). Assessment of the energy recovery potential of oil sludge through gasification aiming electricity generation. *Energy*, 215, 119210. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119210>
- Castillo Santiago, Y., Martínez González, A., Venturini, O. J., Sphaier, L. A., & Ocampo Batlle, E. A. (2022). Energetic and environmental assessment of oil sludge use in a gasifier/gas microturbine system. *Energy*, 244, 123103. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.123103>
- Chu, Z., Gong, Z., Wang, Z., et al. (2021b) Experimental study on kinetic characteristics of oil sludge gasification. *Asia-Pac J Chem Eng.*; 16:e2616. <https://doi.org/10.1002/apj.2616>
- Chu, Z., Gong, Z., Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Wu, J., & Wang, J. (2021a). Experimental study on gasification of oil sludge with steam and its char characteristic. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125713. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125713>
- Duan, Y., Gao, N., Sipra, A. T., Tong, K., & Quan, C. (2022). Characterization of heavy metals and oil components in the products of oily sludge after hydrothermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127293. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.127293>
- GAO, N. et al. Study of oily sludge pyrolysis combined with fine particle removal using a ceramic membrane in a fixed-bed reactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 128, n. June, p. 276–281, 2018.
- Gong, Z., Wang, Z., Wang, Z., Fang, P., & Meng, F. (2018). Study on pyrolysis characteristics of tank oil sludge and pyrolysis char combustion. *Chemical Engineering Research and Design*, 135, 30–36. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2018.05.027>
- Hu, G., Feng, H., He, P., Li, J., Hewage, K., & Sadiq, R. (2020). Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119594. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119594>
- Hu, G., Li, J., Zeng, G., 2013. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review. *J. Hazard Mater.* 261, 470–490. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.069>.
- Hu, G., Li, J., Zhang, X., & Li, Y. (2017). Investigation of waste biomass co-pyrolysis with petroleum sludge using a response surface methodology. *Journal of Environmental Management*, 192, 234–242. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.01.069>
- HU, G.; LI, J.; HOU, H. A combination of solvent extraction and freeze thaw for oil recovery from petroleum refinery wastewater treatment pond sludge. *Journal of Hazardous Materials*, v. 283, p. 832–840, 2015.
- J. Liu, X. Jiang, and X. Han, —Devolatilization of oil sludge in a lab-scale bubbling fluidized bed, *J. Hazard. Mater.*, vol. 185, no. 2–3, pp. 1205–1213, 2011.
- JAFARINEJAD, S. Odours emission and control in the petroleum refinery: a review. *Curr Sci Perspect*, v. 2, n. 3, p. 78–82, 2016.
- Jerez, S., Ventura, M., Molina, R., Pariente, M. I., Martínez, F., & Melero, J. A. (2021). Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its

- valorization within the circular economy strategy. *Journal of Environmental Management*, 285, 112124. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112124>
- Kamali, A., Heidari, S., Golzary, A., Tavakoli, O., & Wood, D. A. (2022). Optimized catalytic pyrolysis of refinery waste sludge to yield clean high quality oil products. *Fuel*, 328, 125292. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125292>
- Li, J., Lin, F., Li, K., Zheng, F., Yan, B., Che, L., Tian, W., Chen, G., & Yoshikawa, K. (2021). A critical review on energy recovery and non-hazardous disposal of oily sludge from petroleum industry by pyrolysis. *Journal of Hazardous Materials*, 406, 124706. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124706>
- LIMA, R.O. Pirólise Térmica e Catalítica de Resíduos de Vácuo Gerados no Refino de Petróleo. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo. Natal-RN.
- Lin, B., Huang, Q., Ali, M., Wang, F., Chi, Y., & Yan, J. (2019). Continuous catalytic pyrolysis of oily sludge using U-shape reactor for producing saturates-enriched light oil. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(3), 3101–3108. <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2018.05.143>
- Lin, F., Zheng, F., Li, J., Sun, B., Che, L., Yan, B., & Chen, G. (2022). Catalytic pyrolysis of oily sludge with iron-containing waste for production of high-quality oil and H₂-rich gas. *Fuel*, 326, 124995. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.124995>
- Lin, Z., Xu, F., Wang, L., Hu, L., Zhu, L., Tan, J., Li, Z., & Zhang, T. (2021). Characterization of oil component and solid particle of oily sludge treated by surfactant-assisted ultrasonication. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 34, 53–60. <https://doi.org/10.1016/J.CJCHE.2020.08.001>
- M. J. Ayotamuno, R. N. Okparanma, E. K. Nweneka, S. O. T. Ogaji, and S. D. Probert, —Bio-remediation of a sludge containing hydrocarbons, *Appl. Energy*, vol. 84, no. 9, pp. 936–943, 2007.
- Martínez González, A., Silva Lora, E. E., & Escobar Palacio, J. C. (2019). Syngas production from oil sludge gasification and its potential use in power generation systems: An energy and exergy analysis. *Energy*, 169, 1175–1190. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.11.087>
- Martínez González, A., Silva Lora, E. E., Escobar Palacio, J. C., & Almazán del Olmo, O. A. (2018). Hydrogen production from oil sludge gasification/biomass mixtures and potential use in hydrotreatment processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(16), 7808–7822. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2018.03.025>
- Martínez González, A.. Avaliação termodinâmica de alternativas de tratamento de resíduos de borra de petróleo a partir da gaseificação. (2019). 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.
- Mazzoni, L., Janajreh, I., Elagroudy, S., & Ghenai, C. (2020). Modeling of plasma and entrained flow co-gasification of MSW and petroleum sludge. *Energy*, 196, 117001. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117001>
- Murungi, P.I., Sulaimon, A.A. Petroleum sludge treatment and disposal techniques: a review. *Environ Sci Pollut Res* 29, 40358–40372 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19614-z>
- N. Mirghaffari, "Treatment and recycling of oily sludges produced in the petroleum industry," *2017 International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries: Kurdistan Region of Iraq as a Case Study (EIOGI)*, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/EIOGI.2017.8267638.
- N. Sönnichsen, “Global oil production in million metric tons 1998-2020” (Statista, 2021) Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/265229/global-oil-production-in-million-metric-tons/>

Qin, H., Wu, X., Zheng, Y. X., Zhang, Y., Meng, X., Duan, L., Sun, C., & Chen, G. (2022). Insight into water-enhanced CO₂ extraction in the treatment of oily sludge. *Journal of CO₂ Utilization*, 57, 101868. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2021.101868>

RAMOS, A. et al. Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 380–398, 2018

SADRAMELI, S. M. Thermal/catalytic cracking of hydrocarbons for the production of olefins: A state-of-the-art review I: Thermal cracking review. *Fuel*, v. 140, p. 102–115, 2015.

Teng, Qing & Zhang, Dongmei & Yang, Chunping. (2021). A review of the application of different treatment processes for oily sludge. *Environmental Science and Pollution Research*. 28. 1-12. 10.1007/s11356-020-11176-2.

Wan, G., Bei, L., Yu, J., Xu, L., & Sun, L. (2022). Products distribution and hazardous elements migration during pyrolysis of oily sludge from the oil refining process. *Chemosphere*, 288, 132524. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132524>

Zhang, X., Xu, J., Ran, S., Gao, Y., Lyu, Y., Pan, Y., Cao, F., Lin, Y., Yang, Z., Wang, Z., Guo, D., Wang, Q., Zhu, L., & Zhu, Y. (2022). Experimental study on catalytic pyrolysis of oily sludge for H₂ production under new nickel-ore-based catalysts. *Energy*, 249, 123675. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.123675>