



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Avaliação de emissões de gases de efeito estufa no desmantelamento de uma plataforma offshore

Júlia Fernandes Sant' Ana

PEP/COPPE - UFRJ

Philippe Lopes Cantreva

FAU/PROARQ - UFRJ

Lucas Rosse Caldas

UFRJ

Lino Guimarães Marujo

PEP/COPPE - UFRJ

Resumo: Um número crescente de instalações offshore de óleo e gás (O&G) está chegando ao fim de sua vida útil. Entre 2021 e 2030, são previstos US\$ 100 bilhões em projetos de descomissionamento, com impacto significativo em termos de custos e impactos ambientais. Este estudo visa analisar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) do desmantelamento de uma unidade flutuante de armazenamento e descarregamento de produção (FPSO). Foi utilizada a análise do ciclo de vida e utilização da inteligência artificial para análise e comparações de cenários. Os resultados mostram que transporte e corte de peças são as principais fontes de emissões, sugerindo otimizações em rotas de transporte e métodos de corte como estratégias de mitigação.

Palavras-chave: Descomissionamento, Emissões de GEE, Inteligência Artificial.

Assessment of greenhouse gas emissions from the decommissioning of an offshore platform

Abstract: An increasing number of offshore oil and gas (O&G) installations are reaching the end of their useful life. Between 2021 and 2030, US\$100 billion in decommissioning projects are expected, with significant impact in terms of costs and environmental impacts. This study aims to analyze the greenhouse gas (GHG) emissions from a dismantling of Floating Production Storage and Offloading (FPSO). Life cycle analysis and artificial intelligence were used for analysis and scenario comparisons. The results show that transportation and cutting of parts are the main sources of emissions, suggesting optimizations in transportation routes and cutting methods as mitigation strategies.

Keywords: Decommissioning, Greenhouse Gas Emissions, Artificial intelligence.

1. Introdução

Um número crescente de instalação offshore de óleo e gás (O&G) em todo o mundo está se aproximando do fim de sua vida operacional. De acordo com IHS Markit são previstos US\$ 100 bilhões no período 2021 e 2030 em projetos de descomissionamento offshore. Uma parcela desse valor está relacionada com cerca 160 Floating Production Storage and

Offloading, do inglês unidades flutuantes de armazenamento e descarregamento de produção (FPSO), navio-plataforma que pode produzir, armazenar e transferir petróleo e gás, que possivelmente serão desativadas durante o período mencionado (S&P GLOBAL, 2021).

Cada instalação offshore de O&G geralmente tem cerca de 25 anos de vida útil. Quando a receita proveniente da produção dos hidrocarbonetos não é capaz de cobrir o custo de operação, a instalação se torna um passivo (TAN et al., 2021). A definição sobre a alternativa de descomissionamento (remoção total ou parcial seguido do desmantelamento, e permanência no local) tende a variar conforme a região, característica da instalação, bem como os diferentes interesses das partes interessadas.

Em relação às convenções e aos tratados, o princípio primordial de todos os regulamentos e orientações internacionais é que as atividades de descomissionamento não devem resultar em quaisquer danos para outros utilizadores do mar ou para o ambiente (IOGP, 2023). A Convenção da Basileia, de 1995, visa prevenir a circulação de resíduos perigosos, em particular para países que podem estar menos bem equipados com leis ou infraestruturas para gerir os riscos ambientais e de segurança associados. A Convenção Internacional de Hong Kong, de 2009, tem como objetivo garantir que a reciclagem de navios não represente riscos à saúde humana, à segurança e ao meio ambiente. Essa Convenção entrará em vigor em 2025, sendo relevante para o descomissionamento de FPSO (IOGP, 2023). O Regulamento da União Europeia nº 1.257/2013 é baseada na Convenção de Hong Kong, e tem como uma das principais exigências a reciclagem de navios apenas em instalações de reciclagem certificadas pela União Europeia (UE, 2021).

As operações de descomissionamento são conhecidas por terem impactos ambientais significativos (VUTTIPITTAYAMONGKOL; TUNG; ELYAN, 2021). De acordo com Tan et al. (2021) a análise do impacto ambiental pode ser estimada quantitativamente usando a abordagem de avaliação do ciclo de vida (ACV), que é uma avaliação integrada e global do impacto ambiental de processos, produtos ou partes de processos comparáveis, como opções de gerenciamento de resíduos. O resultado da análise de impacto ambiental é uma informação que contribui no processo de apoio a tomada de decisão em relação opção de descomissionamento. Os resultados do estudo de Davies e Hastings (2022) mostram que reutilizar uma estrutura de jaqueta de aço in situ retem 55 mil toneladas de CO₂ equivalente em emissões de gases de efeito estufa, sem incluir operações de remoção ou emissões de transporte. Esse processo não só promove a sustentabilidade ambiental, mas também incentiva a eficiência econômica, reduzindo a necessidade de novos materiais (SUBOYIN et al, 2023).

De acordo com Colaleo et al. (2022) o desmantelamento de instalações offshore de O&G tem papel importante para auxiliar na promoção do desenvolvimento sustentável, economia circular e descarbonização. Embora o guia do Institute of Petroleum (IOP) 'Calculating energy use and gaseous emissions' proporcione informações para calcular emissões de gases do efeito estufa do desmantelamento de instalações offshore de O&G, Davies e Hastings (2022) destacam que esse guia contém inconsistências e omissões, como a falta de consideração das emissões de transporte para os pontos de reciclagem.

Para um melhor rastreamento da pegada ambiental do desmantelamento de instalações offshore de O&G, Suboyin et al. (2023) sugerem o uso de tecnologias digitais, como a inteligência artificial (IA). A integração de técnicas de IA na ACV pode apoiar a coleta, modelagem, análise, monitoramento e apresentação de dados nos vários estágios do ciclo de vida do produto (MOHAMMED et al., 2023). No entanto, o desafio para a integração da IA com metodologias como ACV está no acesso aos dados, que é limitado e difícil de se obter (DAVIES; HASTINGS, 2023). Portanto, a integração de dados através de sistemas

de gerenciamento permite acessar fontes e quantidades heterogêneas, para uma melhor realização de análises de informações (AKINYEMI; SUN; GRAY, 2020).

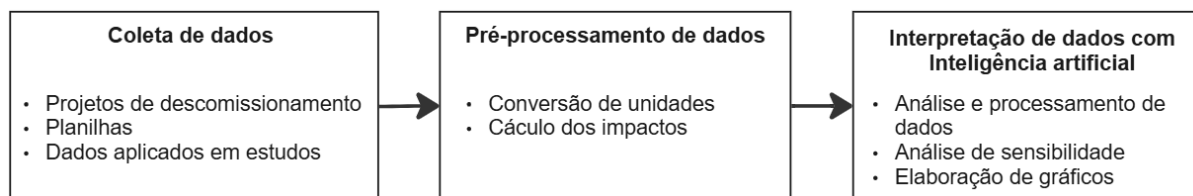
Embora a ACV tenha sido aplicada a diversos projetos no setor de O&G, a sua utilização na fase de descomissionamento ainda é limitada (TAN et al., 2021). Verifica-se a ausência de estudos de descomissionamento de plataformas offshore e seus impactos, integrando avaliações ambientais para auxiliar no processo de apoio a tomada de decisão de autoridades e partes interessadas (COLALEO; AZZELLINO; VICINANZA, 2022). De acordo com Davies e Hastings (2023) há necessidade de desenvolver estudos que quantifiquem as emissões de GEEs provenientes do desmantelamento, para melhor compreensão de como essas emissões se encaixam no contexto global das emissões globais cumulativas de GEEs. Além disso, ainda há pouco progresso em estudos aplicando o aprendizado de máquina no campo do descomissionamento de petróleo e gás devido à falta de conjuntos de dados públicos (VUTTIPITTAYAMONGKOL; TUNG; ELYAN, 2021).

Portanto, este artigo tem como objetivo analisar as emissões de GEEs das operações de desmantelamento de um FPSO, destacando os impactos ambientais relacionados à opção de remoção total. A pesquisa traz como principal contribuição científica a quantificação de GEE de um estudo de caso com o auxílio da IA para gerenciamento de informações e apresentação dos resultados.

2. Metodologia

Como evidenciado anteriormente, a pesquisa elaborada pretende trazer o alinhamento entre as temáticas de ACV, desmantelamento de instalações offshore de O&G e o uso devido de uma tecnologia emergente, no caso, a IA. Constatado o contexto, a metodologia subsequente se desenvolve de modo a contemplar todas as áreas pretendidas. A priori, o embasamento teórico se faz fundamental, onde a pesquisa para seleção de artigos pertinentes ao tema de reaproveitamento de materiais das plataformas de exploração de O&G se revela necessário para o entendimento de todo o contexto da situação. Em seguida, a busca por dados referentes a tais materiais e metodologias práticas quanto a análise dos mesmos é assumida para que, subseqüentemente, haja o planejamento de toda a informação obtida desse processo. A Figura 1 apresenta um modelo de framework desenvolvido para a avaliação de um estudo de caso. Cabe ressaltar que foi utilizado o ChatGPT versão 4.0 para interpretação dos dados, considerada uma IA generativa, que está voltada para a criação de conteúdo novo e original, como imagens, texto e outras mídias, aprendendo com os padrões de dados existentes (TECCOGS, 2023).

Figura 1 – Framework proposto para a extração de quantitativo no descomissionamento de estruturas FPSO e avaliação da emissão de GEEs



Fonte: Os autores

3. Estudo de caso

Para a realização do estudo de caso foi selecionado o FPSO P-32, que é propriedade da Petrobras e desde 1998 fazia parte do Sistema de Produção do Campo de Marlim. Ele estava localizado a aproximadamente 85 km da costa do Estado do Rio de Janeiro, em lâmina d'água de 160 m. De acordo com o Programa de Descomissionamento de Instalação da P-32, o término da operação ocorreu em dezembro de 2020, sendo que o

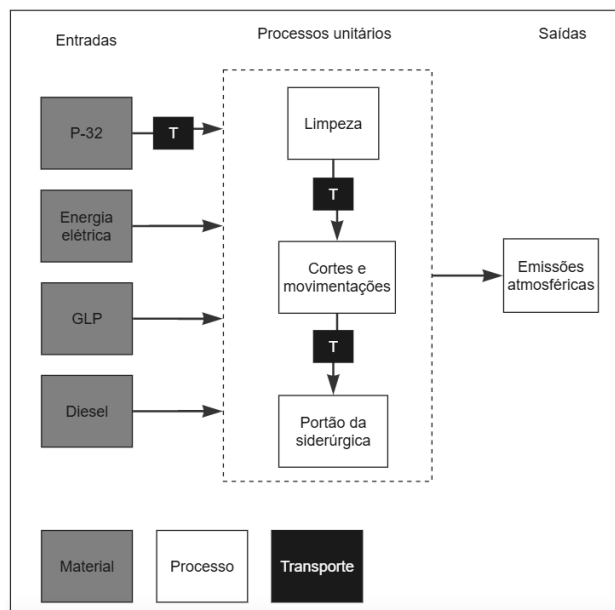
descomissionamento abrange a plataforma P-32, risers (dutos flexíveis e acessórios) e sistema de ancoragem. A P-32 pesa 44.532 toneladas.

A ACV aplicada à plataforma P-32 inclui os seguintes passos: i) Definição do Objetivo e Escopo; ii) Análise do inventário do ciclo de vida; iii) Avaliação de Impacto do ciclo de vida; iv) Interpretação do Ciclo de Vida.

3.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo do estudo é avaliar o impacto de aquecimento global (em kgCO₂-eq) das operações de transporte, limpeza, corte e manuseio associadas à alternativa de remoção total da P-32. Os limites do sistema em estudo são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Sistema estudado



Fonte: Os autores

O estudo foi realizado considerando que a P-32 seria transferida para o Porto do Açu (localizado em Macaé, RJ) para realização de serviços limpeza antes da destinação final (TN PETRÓLEO, 2023). Em seguida, a P-32 é transferida para o Estaleiro Rio Grande (localizado em Rio Grande, RS) onde será desmantelada. Na sequência, a Gerdau utilizará a sucata metálica gerada como matéria-prima para produção de aço em sua unidade de Charqueadas (localizado no estado do Rio Grande do Sul). Outros materiais serão enviados para descarte seguro e correto, com praticamente 100% da unidade sendo reciclada (GERDAU, 2023). A Figura 3 mostra esse processo.

Figura 3 – Sistema estudado



Fonte: Os autores

O aço foi selecionado para este estudo por ser o material mais presente nas plataformas e ter o maior potencial de reaproveitamento e interesse econômico (DAVIES; HASTINGS, 2022). Jain, Pruyn e Hopman (2016) quantificaram os fluxos de materiais de uma plataforma no final da sua vida útil, na qual indicam que 86% do peso é composto por materiais ferrosos, 6% maquinário e o restante contempla marcenaria, miscelâneas, plásticos e minerais.

Ressalta-se que há uma perda desprezível de aço nos processos de corte. De acordo Deshpande et al. (2013) o fator de perda de aço derretido é de $\frac{51,8 \pm 16,6 \text{ kg}}{\text{km comprimento cortado} \cdot \text{mm de espessura}}$. Para este estudo de caso foi considerado chapas de 2,8 toneladas com comprimento de 0,0035 km e espessura de 15 mm, conforme Gunbeyaz, Kurt e Turan (2020). Portanto, a perda de aço para cada chapa é de 2,7 kg ($51,8 \cdot 0,0035 \cdot 15$). A P-32 possui 38.298 toneladas de sucata de aço, portanto cerca de 37 toneladas de aço foram derretidas no processo de corte, o que equivale a 0,19% do peso composto apenas de aço da P-32.

A unidade funcional é representada por 1 tonelada de aço descomissionado. A categoria de impacto estudada é a “Aquecimento Global”, sendo que os dados foram coletados de estudos realizados anteriormente e relacionados ao descomissionamento de navios. Cabe ressaltar que para alguns dados foi considerado a base de dados do Ecoinvent v.3.8.

3.2 Análise do inventário do ciclo de vida

As operações de descomissionamento iniciam-se com a remoção da plataforma, o que implica a utilização de vários navios marítimos, incluindo embarcações de apoio. Para o processo de descomissionamento, propõe basicamente a divisão em três fases práticas (RIBEIRO, 2022): 1) Lavagem e limpeza: consiste em tornar a estrutura da embarcação livre de hidrocarbonetos, com a lavagem e limpeza dos sistemas de processamento, assegurando que todos os componentes estejam livres de gás e óleo, ou seja, preparando os elementos para as operações de remoção; 2) Processo de desmontagem: remoção de todos os componentes associados; 3) Destinação final dos componentes: para cada tipo de material, além de inspeção, monitoramento e restauração do local, quando ele se tornar necessário (pós-descomissionamento).

O Quadro 1 apresenta os dados levantados para avaliação do impacto. Para a limpeza ocorrida no Porto do Açu foi assumido processo semelhante ao fluxo de resíduos de construção e demolição realizados em uma usina de tratamento fixa alimentada por eletricidade. A eficiência total da fase de tratamento e separação é de 99,8% e envolve o consumo de 1 kWh de eletricidade para cada tonelada de material tratado (COLALEO et al., 2022).

Quadro 1 – Quantitativo dos materiais

Etapa	Material	Quantidade (ton)	Consumo de energia	Distância (km)
1) Transporte da P-32 para Porto do Açu	Aço	38.298	-	-
	-	-	-	160
2) Limpeza no Porto do Açu	Aço	38.298	-	-
	-	-	1 kWh/t	-
3) Transporte da P-32 do Porto do Açu para Estaleiro Rio Grande	Aço	38.298	-	-
	-	-	-	1.480
4) Corte peças maiores com tocha de gás	Aço	38.298	-	-
	LPG	-	0,56 kg/t	-
5) Movimentação no estaleiro	Diesel		2.551.972,5 MJ	

6) Corte peças menores	Aço	38.298	-	-
	LPG	-	2,81 kg/t	-
7) Movimentação no estaleiro	Diesel		5.634.225 MJ	
8) Transporte rodoviário para siderurgia	Aço	38.298	-	-
	-	-	-	240

Fonte: Os autores

No Estaleiro Rio Grande foram consideradas etapas 4 a 7, conforme Quadro 1. Com base em Rahman, Handler e Mayer (2016), para o corte de peças maiores e menores foi considerado o uso de tocha a gás composta pelo gases de petróleo liquefeito (GLP). Além disso, para a movimentação dos cortes de peças maiores para o processamento para o corte em tamanho menor, será usado guinchos que consomem diesel, sendo que o combustível necessário é de 1,54 kg/t. Há também, a grua magnética, que fará a movimentação das peças finalizadas na etapa de corte de peças menores para o caminhão, o consumo de diesel dessa máquina é de 3,4 kg/t (RAHMAN; HANDLER; MAYER, 2016), que foi convertido para MJ.

3.3 Análise do impacto do ciclo de vida

A avaliação ambiental foi realizada usando IA considerando a categoria de impacto “Mudanças Climáticas”. O Quadro 2 apresenta os valores dos fatores bem como o resultado.

Quadro 2 – Resultados da ACV

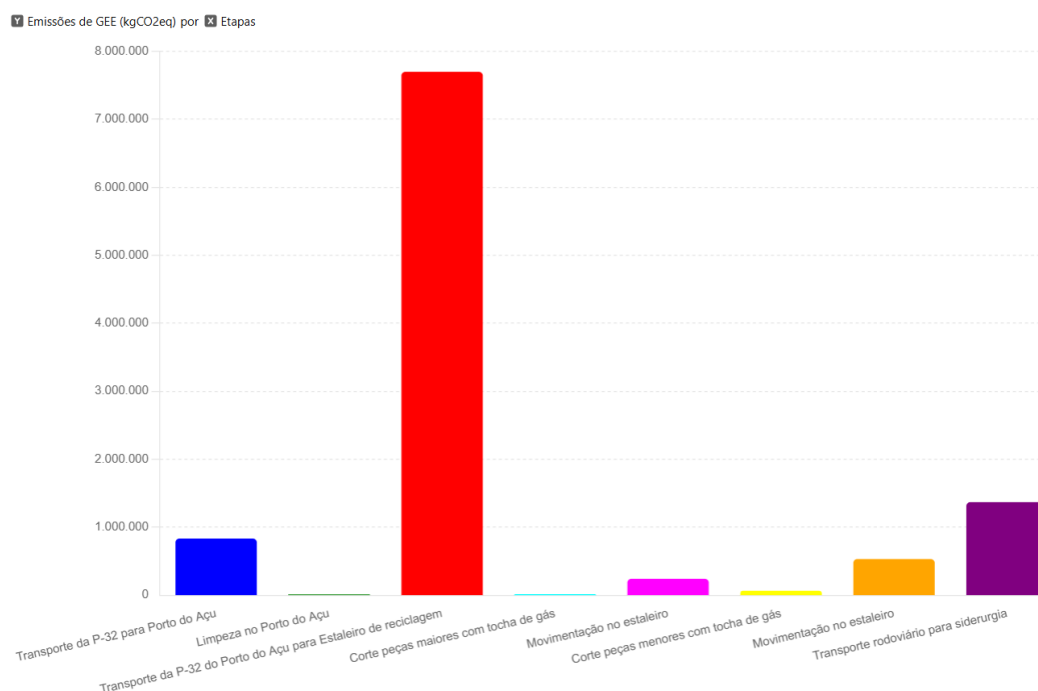
Etapa	Categoria de impacto: Mudanças climáticas			Resultado: Mudanças climáticas
	Fator de impacto	Unidade	Fonte	Resultado (kgCO ₂ eq)
1) Transporte da P-32 para Porto do Açu	0,14	kgCO ₂ eq/km*t	EEA (2017)	832.322,77
2) Limpeza no Porto do Açu	0,29	kgCO ₂ eq/kWh	Ecoinvent	11.205,35
3) Transporte da P-32 do Porto do Açu para Estaleiro Rio Grande	0,14	kgCO ₂ eq/km*t	EEA (2017)	7.698.985,66
4) Corte peças maiores com tocha de gás	0,61	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent	13.119,68
5) Movimentação no estaleiro	0,09	kgCO ₂ eq/MJ	Ecoinvent	240.419,53
6) Corte peças menores com tocha de gás	0,61	kgCO ₂ eq/kg	Ecoinvent	65.832,67
7) Movimentação no estaleiro	0,09	kgCO ₂ eq/MJ	Ecoinvent	530.796,36
8) Transporte rodoviário para siderurgia	0,15	kgCO ₂ eq/km*t	Ecoinvent	1.367.945,50

Fonte: Os autores

Para as atividades de transporte marítimo (etapas 1 e 3) foi considerado que as emissões de gases de efeito estufa é de cerca de 135 gCO₂eq/km*t (0,135 kgCO₂eq/km*t) conforme Agência Europeia do Meio Ambiente (EEA, 2017). Esse valor foi calculado incluindo todos os impactos estatisticamente significativos das viagens, como condições meteorológicas e do mar, velocidade de viagem, correntes e o peso e volume dos itens transportados (DAVIES; HASTINGS, 2022).

Foi solicitada a IA que criasse visualizações dos valores de emissões de GEE de cada etapa analisada, conforme apresenta o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Gráfico de barras das emissões de GEE



Fonte: Open IA (2024)

A IA afirma que essas análises preliminares podem ser a base para um estudo mais aprofundado sobre o impacto ambiental do descomissionamento da plataforma P-32 e para o desenvolvimento de estratégias para minimizar esse impacto. Percebe-se que a principal fonte de emissão é referente ao transporte (para Porto do Açu e Estaleiro) e ao corte de peças maiores com tocha de gás. De acordo com a IA, entre as estratégias para reduzir essas emissões poderiam incluir o uso de modais de transporte mais eficientes, como ferrovias ou transporte marítimo de curta distância, além da otimização das rotas para minimizar a distância percorrida. No caso do processo de corte, a IA afirma que tecnologias de corte mais eficientes ou métodos de reciclagem que minimizem o uso de gases combustíveis podem ser exploradas para reduzir essas emissões.

Em relação ao consumo de energia, a IA afirma que a limpeza no Porto do Açu e as movimentações internas (em ambas as ocorrências) também contribuem significativamente para as emissões, devido ao consumo de energia elétrica e diesel. Isso indica que melhorias na eficiência energética nessas atividades podem reduzir as emissões totais.

3.4 Análise de sensibilidade

Com base nos resultados da avaliação do impacto do ciclo de vida, duas atividades foram consideradas como parâmetros na análise de sensibilidade: i) atividades de transportes, e ii) processo de corte para peças maiores e peças menores.

De modo a reduzir o impacto de emissão de gases de GEE na etapa de transporte, foi identificada que a usina siderúrgica mais próxima do Porto do Açu é a Arcelor Mittal, localizada no município de Serra/ES (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024). Pela via terrestre, a distância do Porto do Açu até a Arcelor Mittal é de 303 km. E via aquaviária, a distância até o Porto de Praia Mole é de 190 km com necessidade de um deslocamento terrestre de 9 km para chegar à siderúrgica.

De acordo com a simulação realizada por Gunbeyaz, Kurt e Turan (2020) o processo de corte bloco de navios usando plasma se mostrou mais rápido em comparação com o oxi-GLP. Pode-se dizer que a substituição do oxicorte por cortadores a plasma pode aumentar a produtividade na operação de corte. A fim de comparar o método de corte atual de oxi-

GLP com o corte a plasma, bem como a alteração do transporte para a siderúrgica Arcelor Mittal. A análise de sensibilidade analisou os seguintes cenários:

1. Corte com LPG no Estaleiro Rio Grande e destinação final com transporte rodoviário para siderúrgica Gerdau (Charqueadas, RS);
2. Corte com Plasma no Estaleiro Rio Grande e destinação final com transporte rodoviário para siderúrgica Gerdau (Charqueadas, RS);
3. Corte com LPG no Porto do Açu e destinação final com transporte rodoviário para siderúrgica Arcelor Mittal (Serra, ES);
4. Corte com Plasma no Porto do Açu e destinação final com transporte rodoviário para siderúrgica Arcelor Mittal (Serra, ES);
5. Corte com LPG no Porto do Açu e destinação final com transporte marítimo para Porto de Praia Mole, seguindo do transporte rodoviário para siderúrgica Arcelor Mittal (Serra, ES);
6. Corte com Plasma no Porto do Açu com transporte marítimo para Porto de Praia Mole, seguindo do transporte rodoviário para siderúrgica Arcelor Mittal (Serra, ES).

O Gráfico 2 apresenta o resultado para cada cenário apresentado. As emissões totais de GEE (em kgCO₂eq) por cenário indicam a seguinte ordem decrescente: i) cenário 2 (513.102.763,10); ii) cenário 4 (504.885.927,2); iii) cenário 6 (504.215.712,20); iv) cenário 1 (11.320.245,39); v) cenário 3 (3.103.409,49); vi) cenário 5 (2.433.194,49). Com isso, percebe-se que os cenários 3 e 5 apresentam melhores resultados do que o cenário 1 (proposto inicialmente). Em termos de redução de GEE em relação ao cenário 1, o cenário 3 representa uma redução 73% e o cenário 5 representa 78,5%.

Segundo a IA, em relação ao impacto das etapas de transporte e movimentação interna, percebe-se que nos cenários analisados o transporte da plataforma P-32 para o Porto do Açu e posteriormente para outros destinos contribui significativamente para as emissões de CO₂ equivalente. Isso inclui tanto o transporte terrestre quanto marítimo. A movimentação interna dentro dos locais de descomissionamento também é uma fonte relevante de emissões, indicando a importância de otimizar esses processos para reduzir o impacto ambiental. Nesse mesmo ponto, a distância percorrida durante o transporte da P-32 e seus componentes para destinos finais como os estaleiros e as siderúrgicas influencia diretamente as emissões. Cenários com transporte para locais mais distantes tendem a ter emissões mais elevadas.

Além disso, no caso da variação nos métodos de corte, os cenários que utilizam diferentes métodos de corte, como LPG versus plasma, mostram variações significativas nas emissões de CO₂ equivalente. O uso de plasma geralmente resulta em emissões mais altas devido ao maior consumo de energia. Desse modo, os cenários 2, 4, e 6 apresentam as maiores emissões de CO₂ equivalente devido ao uso de corte com plasma, que é mais intensivo em energia.

Entre as estratégias de mitigação de impacto ambiental consideradas pela IA estão: i) Otimização das Rotas de Transporte: reduzir as distâncias percorridas, otimizar as rotas de transporte para minimizar as emissões associadas e uso de combustíveis menos poluentes; ii) Utilização de Energias Renováveis: onde viável, utilizar fontes de energia renováveis durante as operações de corte e movimentação interna para reduzir as emissões de CO₂; iii) Gestão Eficiente de Resíduos: implementar práticas de reciclagem e reutilização dos materiais retirados da plataforma para minimizar o desperdício e o impacto ambiental.

Gráfico 2 – Gráficos da análise de sensibilidade



Fonte: Open IA (2024)

4. Considerações finais

A ACV realizada neste estudo permitiu identificar as principais etapas do descomissionamento que contribuem para as emissões de GEE. Em síntese, os resultados mostram que as atividades de transporte e corte representam os principais fatores de impacto na categoria “mudanças climáticas”. Por fim, a influência da distância e alterações no processo de corte foi avaliada por meio de uma análise de sensibilidade.

Portanto, este estudo contribui com a temática utilizando uma IA como ferramenta de análise para ACV do desmantelamento de uma plataforma offshore do setor de O&G. Os resultados se mostram importante para apoiar o processo de tomada de decisão das operações viáveis não apenas economicamente, mas ambientalmente e socialmente responsável.

Não foi possível identificar o tempo de processamento com corte plasma e oxicorte, apesar do plasma emitir mais GEE, provavelmente este consumiria menos combustível do que o corte pelo método oxicorte (processo considerado menos eficiente). Seria interessante buscar essa informação é fazer a comparação considerando o desempenho desse processo. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros de ACV possam aperfeiçoar e agregar novos dados, a fim de torná-lo mais condizente com o contexto real analisado. Dessa forma é possível obter análises mais precisas e atualizadas sobre consumo de energia, emissões de gases e eficiência dos processos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pelo Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP no 50/2015 e pela Petrobras S.A. através do Acordo de Cooperação 58500105843179 - por meio da aplicação dos recursos financeiros definidos nas cláusulas de P&D do "Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)" - Projeto 20605-2.

Referências

- AKINYEMI, A. G.; SUN, M.; GRAY, A. J. G. Data integration for offshore decommissioning waste management. **Automation in Construction**, v. 109, 2020.
- COLALEO, G.; et al. Decommissioning of Offshore Platforms in Adriatic Sea: The Total Removal Option from a Life Cycle Assessment Perspective. **Energies**, v. 15, n. 24, 2022.
- DAVIES, A. J.; HASTINGS, A. Greenhouse Gas Emissions from Decommissioning Manmade Structures in the Marine Environment; Current Trends and Implications for the Future. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 11, n. 6, 2023.
- DAVIES, A. J.; HASTINGS, A. Quantifying greenhouse gas emissions from decommissioned oil and gas steel structures: Can current policy meet NetZero goals?. **Energy Policy**, v. 160, 2022.
- DESHPANDE, P. C.; KALBAR, P.P.; TILWANKAR, A. K.; ASOLEKAR, S.R. A novel approach to estimating resource consumption rates and emission factors for ship recycling yards in Alang, India. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, 2013
- EEA. **Specific CO2 emissions per tonne-km and per mode of transport in Europe**. 2017. Disponível em: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/specific-co2-emissions-per-tonne-2#tab-chart_1. Acesso em: 01 maio 2024.

GERDAU. Plataforma P-32 da Petrobras adquirida pela Gerdau chega ao Estaleiro Rio Grande para ser desmantelada. 2023. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/noticias/plataforma-p-32-da-petrobras-adquirida-pela-gerdau-chega-ao-estaleiro-rio-grande-para-ser-desmantelada/> Acesso em: 01 maio 2024.

GUNBEYAZ, S. A.; KURT, R. E.; TURAN, O. Investigation of different cutting technologies in a ship recycling yard with simulation approach. **Ships and Offshore Structures**, 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Parque Siderúrgico**. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/parque-siderurgico/>. Acesso em 20 jun. 2024

IOGP. **Overview of International Offshore Decommissioning Regulations – Volume 1: Facilities**. 2023.

HIPERMAX. **POWERMAX85**. 2024. https://www.hypermaxonline.com/hypertherm_powermax85_specs.html

JAIN, K.P.; PRUYN, J. F. J.; HOPMAN, J. J. Quantitative assessment of material composition of end-of-life ships using onboard documentation. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 107, 2016.

MOHAMMED, T. I.; et al. Toward artificial intelligence and machine learning-enabled frameworks for improved predictions of lifecycle environmental impacts of functional materials and devices. **MRS Communications**, v. 13, 2023.

PETROBRAS. **Programa de Descomissionamento de Instalações Marítimas - FPSO P-32**. 2020.

RAHMAN, S. M. M.; HANDLER, R. M.; MAYER, A. L. Life cycle assessment of steel in the ship recycling industry in Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 963–971, 2016.

RIBEIRO, G. C. **Estimativa de famílias de materiais com potencial de reutilização durante a reciclagem da floating, production, storage and offloading - FPSO P32**. Dissertação de Mestrado Profissional em Montagem Industrial, Universidade Federal Fluminense, 2022.

S&P GLOBAL. **Are we entering a decade of offshore decommissioning?** 2021.

SUBOYIN, A. et al. AI-Enabled Offshore Circular Economy: Tracking, Tracing and Optimizing Asset Decommissioning. **ADIPEC**, Abu Dhabi, UAE, October 2023. <https://doi.org/10.2118/217051-MS>.

TAN, Y. et al. Cost and environmental impact estimation methodology and potential impact factors in offshore oil and gas platform decommissioning: A review. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106536>

TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas. **Manual ético para o uso da Inteligência Artificial Generativa**, n. 28, jul./dez. 2023, ISSN: 1984-

TN PETRÓLEO. **Porto do Açu (RJ) assina contrato de descomissionamento de plataforma com a Petrobras**. 2023. <https://tnpetroleo.com.br/noticia/porto-do-acu-rj-assina-contrato-de-descomissionamento-de-plataforma-com-a-petrobras/>.

VUTTIPITTAYAMONGKOL, P.; TUNG, A.; ELYAN, E. A Data-Driven Decision Support Tool for Offshore Oil and Gas Decommissioning. **IEEE Access**, v. 9, 2021. 10.1109/ACCESS.2021.3117891

ANEXO A

1) Conversão de kg/t para MJ

Como o consumo do diesel está representado pela unidade kg/t, é preciso fazer a conversão para MJ. Para isso, o Quadro 3 apresenta o processo da conversão de unidades. Quadro 3 – Conversão de unidades de kg/t para MJ

Etapas	Valores		Unidade
A) Valor inicial	1,54	3,4	kg/t
B) Multiplicar o valor inicial pelo peso da carga transportada (A*38.298)	58.978,92	130.213,20	t
C) Determinar o volume, considerando densidade = 0,832 kg/l (B/densidade)	70.888,13	156.506,25	l
D) Determinar MJ, considerando que 1l diesel = 36 MJ (C * 36)	2.551.972,50	5.634.225,00	MJ

2) Conversão para o processo de corte a plasma:

Dados do equipamento: Duty cycle @ 40C (104F): 100% @ 66 A, 230 600 V, 1/3-PH. Esse é um equipamento que pode operar a 66 amperes com um ciclo de trabalho de 100% (contínuo) quando alimentado com uma tensão de 230 a 600 volts, podendo ser tanto monofásico quanto trifásico (HIPERMAX, 2024).

Cálculo do consumo de energia:

- Potência = $3^{0,5} \times V \times I \times FP$
- Onde: V = 400, I = 66, FP (fator de potência) = 0,9
- P = 41.153,53 kW

Tempo de operação no 1º corte:

- 1 bloco = 2,8 toneladas.
- 60 min e 10 seg + 55 min e 28 seg = 1,93 h, que é o tempo gasto para cortar 1 bloco (com fundo duplo, considerado para 1º corte) (GUNBEYAZ; KURT; TURAN, 2020).
- Se 1 bloco de 2,8 ton demora 1,93h, então pela regra de três, 1 ton demora 0,69 hora. Portanto, para 1º corte, 1 tonelada para ser cortada demora 0,69 h/t.

Tempo de operação no 2º corte:

- 1 bloco = 2,8 toneladas
- 8 horas = 7 blocos (sem fundo duplo) = 19,6 ton (GUNBEYAZ; KURT; TURAN, 2020).
- Se 8h corta 19,6 ton, 1 ton demora cerca de 0,408hora. Portanto, para 2º corte, 1 tonelada para ser cortada demora 0,408 hora/t.

Consumo de energia no 1º corte:

- Potência * tempo de operação
- 41.153,53 (kW) * 0,69 (h/t) = 28.395,95 kWh/t

Consumo de energia no 2º corte

- Potência * tempo de operação
- 41.153,53 (kW) * 0,408 (h/t) = 16.790,64 kWh/t.