

II-619 - PROPOSTA DE UMA ROTA DE TRATAMENTO DO EFLUENTE ÁGUA PRODUZIDA EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO *OFFSHORE* – CONSOLIDAÇÃO DE UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

Natasha Veiga Louzada ⁽¹⁾

Mestranda em Engenharia Ambiental pela Escola Politécnica/Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Bacharel e licenciada em Química pelo Instituto de Química da UFRJ. Técnica em Meio ambiente no Instituto de Química da UFRJ.

Lídia Yokoyama

Engenheira Química pela Universidade Federal do Pará (UFPA), D.Sc. em Química (PUC-Rio). Professor Titular do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química/UFRJ. Atualmente, Docente colaborador.

Endereço ⁽¹⁾: Rua Laura Teles, 270 – Tanque – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 22730-305 - Brasil - Tel: (21) 98888-7544 - e-mail: natashalouzada@gmail.com

RESUMO

A produção de petróleo gera um efluente chamado de água produzida (AP), proveniente, juntamente com o petróleo, da exploração e produção de óleo e gás. De acordo com o volume crescente de resíduos no mundo, o descarte de AP no meio ambiente tornou-se uma questão considerável de preocupação ambiental. Em 2020, o volume global foi de, aproximadamente, 340 bilhões de barris de AP. A indústria de petróleo e gás tem suas responsabilidades quanto ao descarte da AP de forma sustentável, apresentando grandes desafios devido à sua complexidade e toxicidade, além de uma grande demanda de tecnologias para o seu tratamento adequado, uma vez que, é composta por alta carga salina, sólidos dissolvidos, ácidos orgânicos, óleos e graxas, além de compostos inorgânicos e metais. O óleo bruto é composto por hidrocarbonetos em geral, incluindo os voláteis, poliaromáticos e fenóis. O espaço da produção *offshore* restringe o tamanho dos sistemas de tratamento, afetando a eficiência da remoção de contaminantes. O tratamento inicial proposto para a água produzida é baseado em separação térmica e por gravidade. Porém, a combinação de tecnologias convencionais é, na maioria dos casos, incapaz de tratar um efluente compatível com os padrões de descarte. Dessa forma, é necessário um tratamento de polimento da AP para a remoção de óleo e graxa. A abordagem bibliométrica visa descrever, avaliar e monitorar as pesquisas por mapeamento científico, em que, através do *software VOSviewer*, podem ser visualizadas as redes de palavras-chave. Este método pode ser utilizado para relacionar a ligação entre temas dentro de uma determinada área e traçar seu desenvolvimento. Dessa forma, o objetivo do estudo é viabilizar uma proposta de uma rota de tratamento de efluente da matriz água produzida em plataformas de petróleo *offshore*. Foram realizadas pesquisas bibliográficas com o objetivo de delimitar as publicações aos três temas do estudo, são eles: água produzida, plataforma *offshore*, tratamento de efluentes. Foi possível criar os mapas de visualizações em rede, e, além disso, foi realizada a avaliação temporal dos tratamentos da água produzida. As pesquisas bibliográficas permitiram a realização, de forma satisfatória, do estudo bibliométrico, através dos dados obtidos na base de dados *Web of Science*. Portanto, uma rota de tratamento foi proposta, a partir dos procedimentos de tratamento atualmente realizados nas plataformas de petróleo *offshore*, de forma a incrementar o processo com tecnologias promissoras para a remoção de óleo e graxa, visando o enquadramento do lançamento do efluente em mar, perante a legislação vigente.

PALAVRAS-CHAVE: Água produzida, tratamento, óleo e graxa, plataforma offshore, bibliometria.

INTRODUÇÃO

A produção de petróleo gera efluente chamado de água produzida (AP), água esta proveniente juntamente com o petróleo durante a exploração e produção de óleo e gás. De acordo com o volume crescente de resíduos no mundo, o descarte de AP no meio ambiente tornou-se uma questão considerável de preocupação ambiental (AL-GHOUTI, AL-KAABI, et al., 2019). Em 2020, o volume global foi de, aproximadamente, 340 bilhões de barris



de AP. O impacto ambiental imediato ocorre nas produções tanto em unidade onshore, quanto offshore (KHORRAM, FALLAH, et al., 2023).

A indústria de petróleo e gás tem suas responsabilidades no que tange ao descarte da AP de forma sustentável, apresentando grandes desafios devido à sua complexidade e toxicidade (NADERSHA, ALY HASSAN, 2022), além de uma grande demanda de tecnologias para o seu tratamento adequado. A AP é composta por alta carga salina, sólidos dissolvidos, ácidos orgânicos, óleos e graxas (JIMÉNEZ, ANDREOZZI, et al., 2019), além de compostos inorgânicos e metais. O óleo bruto é composto por hidrocarbonetos em geral, incluindo os voláteis, poliaromáticos e fenóis (IGUNNU, CHEN, 2012).

Alguns efluentes possuem requisitos legais específicos, como é o caso da AP, cujo descarte *offshore* deve atender ao descrito na Resolução CONAMA n.º. 393/2007, cuja exigência para limites mensais de O&G para descarte de água produzida é de 29 mg/L e um máximo diário de 42 mg/L (“PETROBRAS_Relatório de Sustentabilidade 2022”). As principais diferenças no gerenciamento da água produzida onshore e offshore são as limitações de peso e espaço. A área disponível da produção *offshore* em plataformas restringe o tamanho dos sistemas de tratamento, afetando a eficiência da remoção de contaminantes (ZHENG, CHEN, et al., 2016). No mar, o tratamento visa reduzir o teor de óleo e graxa a níveis aceitáveis que atenda os limites de descarte estabelecidos pela legislação visando mitigar os impactos nos organismos aquáticos (JIMÉNEZ, ANDREOZZI, et al., 2019).

O tratamento inicial proposto para a água produzida é baseado em separação térmica e por gravidade. Porém, a combinação de tecnologias convencionais é, na maioria dos casos, incapaz de tratar um efluente compatível com os padrões de descarte. Dessa forma, é necessário um tratamento de polimento da AP para a remoção de óleo e graxa, como adsorção em carvão ativado, filtração por membrana, ultravioleta, oxidação química ou tratamento biológico (JIMÉNEZ, ANDREOZZI, et al., 2019).

A abordagem bibliométrica vem sendo utilizada para descrever, avaliar e monitorar as pesquisas já publicadas sobre um assunto, promovendo um mapeamento científico sobre o desenvolvimento de campos e disciplinas científicas. No entanto, a análise bibliométrica objetiva as relações sociais e estruturais entre diferentes constituintes da pesquisa, como por exemplo, relacionar autores, países, instituições e tópicos (DONTHU, KUMAR, et al., 2021).

O estudo bibliométrico proposto visa descrever, avaliar e monitorar as pesquisas por mapeamento científico, em que, através do *software VOSviewer*, possam ser visualizadas as redes de palavras-chave. A análise de copalavra encontra as relações entre os conceitos que são mencionados simultaneamente em títulos, palavra-chave, resumos ou textos completos, a fim de construir um mapa semântico da área. Este método pode ser utilizado para relacionar a ligação entre temas dentro de uma determinada área e traçar seu desenvolvimento (ZUPIC, ČATER, 2015).

A primeira e uma das mais importantes etapas de um estudo bibliométrico é o planejamento de pesquisa, onde se define a questão a ser pesquisada e se determina um método bibliométrico adequado para fornecer as respostas desejadas. Uma ferramenta adequada para visualizar detalhadamente os mapas bibliométricos é o *software VOSviewer*, que oferece a exibição dos mapas considerando fatores desejáveis. O mapeamento científico revela a estrutura e o desenvolvimento dos campos científicos (ZUPIC, ČATER, 2015).

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal viabilizar a proposta de uma rota de tratamento de efluente da matriz água produzida em plataformas de petróleo *offshore*. Diante disso, a proposta contempla avaliar a rede de correlação entre os tratamentos do efluente água produzida em plataformas *offshore* por meio de uma análise bibliométrica através de dados específicos coletados na base de dados *Web of Science (WOS)* e posterior aplicação no *software VOSviewer*.

METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada, inicialmente, para o desenvolvimento deste trabalho consiste em realizar uma pesquisa bibliográfica através de publicações em revistas científicas, teses e legislações vigentes, sobre os temas



referentes à água de produção, e seus possíveis tratamentos adicionais aos tratamentos já realizados nas plataformas *offshore*.

Para o estudo bibliométrico, foram definidas as estratégias de busca na base de dados *Web of Science*. Foi selecionado o intervalo dos últimos 24 anos, entre 2000 e 2024. Essa faixa será explicada nos resultados. Alguns filtros foram utilizados com o objetivo da padronização das buscas, considerando somente idioma “inglês”, universal, e as opções de busca das palavras-chave em Tópico, que inclui a busca do texto em “título”, “palavras-chave” e “resumo” nas publicações, visando aumentar a representatividade dos termos da pesquisa, evitando erros na obtenção dos resultados. Além disso, os tipos de documento selecionado nas buscas foram “artigo” e “artigo de revisão”, uma vez que esses dois tipos de documento expressam o crescimento do conhecimento e acompanhamento de uma tendência na investigação sobre o futuro promissor do tema. Estes documentos também seriam suficientes para acompanhar os esforços científicos de forma global para atender à demanda do estudo. Os arquivos gerados foram, posteriormente, utilizados no *software VOSviewer*.

A análise bibliométrica foi realizada de acordo com os procedimentos do Manual do *software VOSviewer*, produzido por *Jan van Eck e Waltman*. O programa foi utilizado com base nos arquivos gerados através da base de dados, personalizando as redes de conexões, a partir das escolhas de copalavra, podendo assim, transformar os dados em mapas. Este software foi obtido por meio de download, com fácil acesso, uma vez que está disponível no próprio site de forma gratuita, e permite suporte de dados das bases *Web of Science*, *Scopus*, *Dimensions*, *Lens* e *PubMed*.

Foram realizadas três pesquisas bibliográficas com o objetivo de delimitar as publicações aos três temas do estudo, sendo cada pesquisa contendo o termo “produced water”, como visto na Tabela 1. Na pesquisa 1, o objetivo foi delimitar o local de escopo da pesquisa. A pesquisa 2 foi abordada a fim de obter os dados de processos de tratamentos de efluentes utilizados para tratar a água produzida. Já a pesquisa 3 foi elaborada com o intuito de obter dados relevantes ao que tange às práticas adotadas no tratamento de água produzida, especificamente, em plataformas *offshore*.

Tabela 1: Palavras-chave utilizadas para a busca bibliográfica na base de dados *Web of Science*.

PESQUISA	TEMA DA PESQUISA	PALAVRAS-CHAVE
1	Plataforma <i>offshore</i>	“produced water” e “ <i>offshore</i> ”
2	Tratamento de água produzida	“produced water” e “treatment process”
3	Tratamento de água produzida em plataformas <i>offshore</i>	“produced water” e “treatment process” e “ <i>offshore</i> ”

De acordo com as recomendações do manual do *software*, os resultados foram exportados em formato “Delimitado por tabulações” e a opção “Referências Registradas e Citadas” (*Record and Cited References*). Com a ferramenta *VOSviewer*, foi possível criar os mapas de visualizações em rede, e o número mínimo estipulado para a ocorrência de palavras-chave foi igual a 5, como ferramenta de minimização de erros, evitando a ocorrência de publicações fora do contexto do tema de interesse. O tipo de rede construída foi de co-ocorrência com todas as palavras-chave possíveis como unidades de análise.

Além disso, foram obtidos os mapas de visualização sobreposta, com a seleção da escala de tempo das publicações. O mapa expressa os mesmos resultados, porém, sob ponto de vista temporal, compreendendo a faixa aplicada automaticamente pelo programa, de acordo com as publicações encontradas. Essa escala de tempo é identificada nas palavras-chave pela cor do ícone de cada item.

RESULTADOS OBTIDOS

A primeira etapa do procedimento de pesquisa foi realizada a partir da busca da palavra-chave “produced water” no banco de artigos científicos *Web of Science*. Essa palavra-chave foi escolhida por ser o tema principal deste trabalho.

Os dados gerados forneceram uma delimitação na faixa de tempo a ser pesquisada. Como pode ser visto na Figura 1, a partir de 1992, o número de publicações sobre o tema aumentou, tendo uma queda logo em seguida.



O mesmo ocorre na faixa de 1995 a 1999. Portanto, a faixa do levantamento considerada foi a partir de 2000. Pode ser observado que houve um aumento significativo a partir de 2012, porém, nesse trabalho serão considerados todos os resultados expressivos com vista ao objetivo final. Para isso, foi preciso avaliar a evolução temporal das tecnologias de tratamento mais utilizados para a matriz de água produzida.

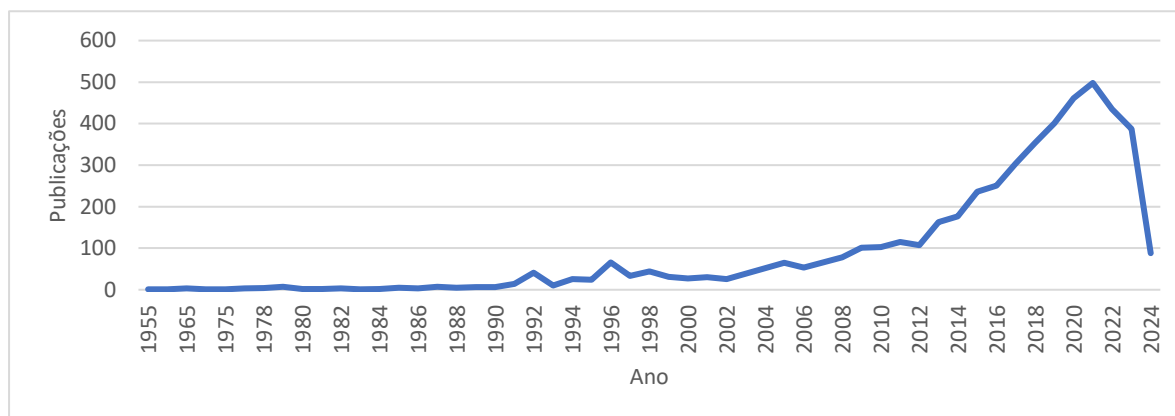


Figura 1: Número de publicações com a palavra-chave “produced water” no banco *Web of Science*.

Após a seleção da faixa de trabalho, foram realizadas as buscas apropriadas.

As etapas do estudo envolveram mapeamento bibliométrico e análise de rede. O primeiro avaliou os pontos fortes dos relacionamentos entre as publicações, como o peso de co-ocorrência dos itens e a força total de conexões, demonstrados em mapas bibliométricos. Por outro lado, a análise de dados representou a avaliação da rede, dos conjuntos, possibilitando uma visualização informativa, comumente utilizados (DONTHU, KUMAR, *et al.*, 2021)

A análise de co-ocorrência para as palavras-chave mostra o mapa de visualização de rede obtido após o filtro, entre os anos 2000 e 2024. Os agrupamentos formados foram denominados *clusters*, e se apresentaram diferenciados por cor. As listas das palavras-chave em cada *cluster* foram descritas em tabelas. O QR code, adicionado à cada figura, permite, para o leitor, o acesso ao VOSviewer online, onde é possível visualizar o mapa com mais detalhes, aproximar a imagem, além de obter informações sobre as ocorrências e conexões de cada palavra-chave desse estudo.

AVALIAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE “PRODUCED WATER” E “OFFSHORE” (PESQUISA 1)

Na primeira etapa da pesquisa, foi realizada a busca das palavras-chave no banco de dados *Web of Science* (WOS), em Tópicos, com o termo “produced water” e “offshore”. Foram encontrados 305 registros de publicações, os quais geraram 1809 palavras-chave. No entanto, após o número mínimo de 5 ocorrências, a quantidade de palavras-chave reduziu para 101. Ainda é um número elevado, porém, por padronização do procedimento, foi mantido o número estipulado de 5 ocorrências. Foram formados 5 *clusters*, com um total de 1123 conexões entre as palavras-chave.

De forma expressiva, a palavra-chave “água produzida” foi encontrada 113 vezes, possuindo conexão com outras 93 palavras conforme o previsto, uma vez que é o tema central do estudo, como visto na Figura 2. Outra avaliação significativa foi feita através do mapa da Figura 3, que expressa em diferentes cores as palavras-chave, de acordo com as datas das publicações. A faixa de tempo da legenda é gerada automaticamente pelo programa. Por fim, na Tabela 2 podem ser encontradas todas as palavras-chave do mapa de visualização de rede, separadas por *cluster*. Ao final, serão discutidos os resultados para essa pesquisa.



Tabela 2: Palavras-chave correspondentes à cada *cluster*, relativas ao mapa de visualização de rede representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water” e “offshore”.

Clusters					
Cluster 1 - vermelho		Cluster 2 - verde	Cluster 3 - azul	Cluster 4 - amarelo	Cluster 5 - roxo
processos de oxidação avançada	offshore	alquilados não fenólicos	adsorção	produtos químicos	descartes
desafios	óleo offshore	alquilifenóis	biodegradação	óleo cru	metais
coagulação	óleo e gás	bacalhau do Atlântico	corrosão	identificação	pah
desalinização	óleo e graxa	bioacumulação	degradação	gerenciamento	ra-228
ar dissolvido	campo petrolífero	biomarcadores	dispersão	espectrometria de massa	amostras
oxidação eletroquímica	otimização	bacalhau	recuperação de óleo aprimorada	misturas	
eletrocoagulação	compostos orgânicos	bacalhau gadus-morhua	campo	modelo	
emulsões	performance	modelo dos sonhos	fluxo	ácido naftênico	
Água produzida de campo	poluentes	exposição	dano de formação	plataformas offshore	
flutuação	tratamento de água produzida	peixe	impacto	água produzida offshore	
flutuação	remoção	hidrocarbonetos	injeção	oxidação	
hidrociclone	separação	in-Vivo	óleo	petróleo	
em água	sistema	análise por espectrometria de massas	inundação de polímero	hidrocarboneto aromático policíclico	
líquido	tecnologias	monitoramento	meio poroso	sedimentos	
membrana	ultrafiltração	mexilhões mytilus-edulis	recuperação	extração em fase sólida	
microfiltração	águas residuais	nonilfenol	reservatório	bactérias redutoras de sulfato	
		mar do Norte	água do mar	toxicidade	
		petróleo do mar do norte	simulação		
		produção de petróleo offshore	sistemas		
		contaminantes pah	transporte water		
		poluição			
		policíclico aromático hidrocarboneto			
		água produzida			
		truta arco-íris			
		avaliação de risco			
		membranas			

O *cluster 1*, em vermelho, mostra as palavras-chave em maior quantidade, essas estão relacionadas entre si, em sua grande maioria, como palavras que evidenciam alguns processos de tratamentos de efluentes. No mapa temporal, pode ser notado o período em que estão relacionados os processos considerados primários, como “separação”, “coagulação”, “flotação”, “hidrociclone” e “microfiltração” (2016) em comparação aos



tratamentos mais recentes (2020), como é o caso de “oxidação eletroquímica”, “processos de oxidação avançada”. Nesse *cluster*, a palavra de maior ocorrência foi “águas residuais”, com 30 ocorrências, e 53 conexões. Foi observada uma preocupação com o rejeito dos campos petrolíferos, uma vez que estão presentes também palavras de peso, como “remoção”, com 23 ocorrências, “performance” (17), “otimização” (14), “tecnologias” (11), e relacionadas com “óleo offshore” (15) e “águas residuais”, com 30 ocorrências.

O *cluster* 2, em verde, tem como principal palavra-chave a “água produzida”, com 113 ocorrências e 93 conexões. Essa característica se reflete em todo o mapa, pelo maior número de conexões, incluindo palavras de todos os *clusters*. A maior força de conexão deste termo aparece com as palavras “Mar do Norte” (18), seguida de “óleo” (17) e “águas residuais” (15). Essa informação pode ser percebida após a seleção da linha que conecta as duas palavras, no mapa online (QR code). Foi notada a proximidade do termo citado com palavras que se relacionam com o óleo produzido em mar, como é o caso das plataformas offshore. Muito se deve ao fato de o Mar do Norte receber a primeira plataforma *offshore* da Europa, nas décadas de 60-70, segundo Benedito (2008). Nesse sentido também foram avaliadas as palavras desse *cluster*, através do qual ficou evidenciada a relação da produção de óleo em mar com a exposição que animais marinhos sofrem na presença de contaminantes, são elas: “bacalhau”, “mexilhões”, “peixe”, “contaminantes orgânicos”, “alquilfenóis”, “hidrocarbonetos aromáticos policíclicos”, “monitoramento”, “bioacumulação”, “biomarcadores”, entre outras.

Uma palavra-chave de grande importância também vista, foi “toxicidade”, pertencente ao *cluster* amarelo, com 23 ocorrências, conectada com outras 47 que estão divididas entre todos os *clusters*. Entre elas, as mesmas apontadas no *cluster* verde, representando os animais marinhos, como também outras, do *cluster* vermelho, inclusive “óleo offshore” (15 ocorrências), “offshore” (7), “emulsão” (7), além de palavras de impacto do *cluster* azul, como “óleo”, que é a palavra-chave do grupo com maior ocorrência, ao todo, 39 e 60 conexões, incluindo os demais *clusters*, “óleo cru” (14), “degradação” (13), biodegradação” (10), “bactérias redutoras de sulfato” (9). Ainda, há relação com “metais” e “descartes”, do *cluster* roxo. Essas conexões revelam a relação do impacto causado pelas plataformas offshore no ambiente marinho. De acordo com o mapa da Figura 3, essa preocupação não é recente, visto que tais palavras encontram-se com coloração correspondente a um período muito anterior à 2015, como é o caso da própria palavra “água produzida”.

A primeira etapa da pesquisa objetivou encontrar dados que pudessem fornecer os tipos de tratamentos mais usuais em plataformas *offshore*. Dessa maneira, a avaliação da palavra-chave “óleo offshore” se tornou imprescindível. Pode ser percebida a sua presença no *cluster* 1, em vermelho, onde se encontram os principais tipos de tratamentos de águas residuais. O termo “óleo *offshore*” possui 15 ocorrências e 40 conexões. As conexões relacionadas ao objetivo são: “água produzida”, “tratamento de água produzida”, “emulsão”, “óleo e graxa”, “óleo e gás”, “remoção”, “óleo cru”, “mar do Norte” e “hidrocarbonetos aromáticos policíclicos”. Já entre os tipos de tratamentos conectados, estão: “separação”, “coagulação” e “hidrociclone”. Por fim, tendo em vista os aspectos apresentados, os tratamentos praticados em plataformas offshore foram então, evidenciados nesta etapa da pesquisa.

AValiação DAS PALAVRAS-CHAVE “PRODUCED WATER” E “TREATMENT PROCESS” (PESQUISA 2)

Para a segunda etapa da pesquisa, foi realizada a busca das palavras-chave no banco de dados *Web of Science* (WOS), em Tópicos, com o termo “produced water” e “treatment process”. Foram encontrados 554 registros, os quais agruparam 22 palavras-chave, considerando o número mínimo de ocorrências igual a 5. Foram formados 4 *clusters*, com um total de 132 conexões entre as palavras-chave.

Os mapas de visualização em rede criados pelo software *VOSviewer* estão representados pelas palavras que compõe essa pesquisa, na Figura 4, bem como a Figura 5 apresenta o mapa temporal correspondente. Subsequente, a Tabela 3 aborda as palavras-chave obtidas na pesquisa, agrupadas por *cluster*.

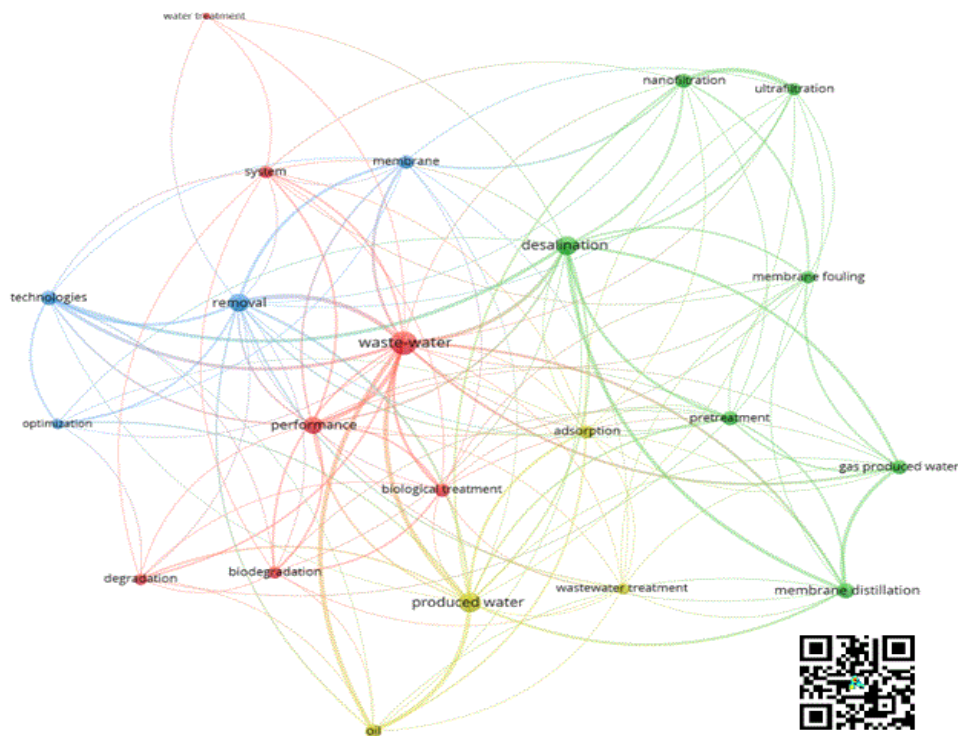


Figura 4: Mapa gerado pelo software *VOSviewer*, representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water” e “treatment process”, obtidas na busca entre 2000 e 2024, na base de dados *WOS*.

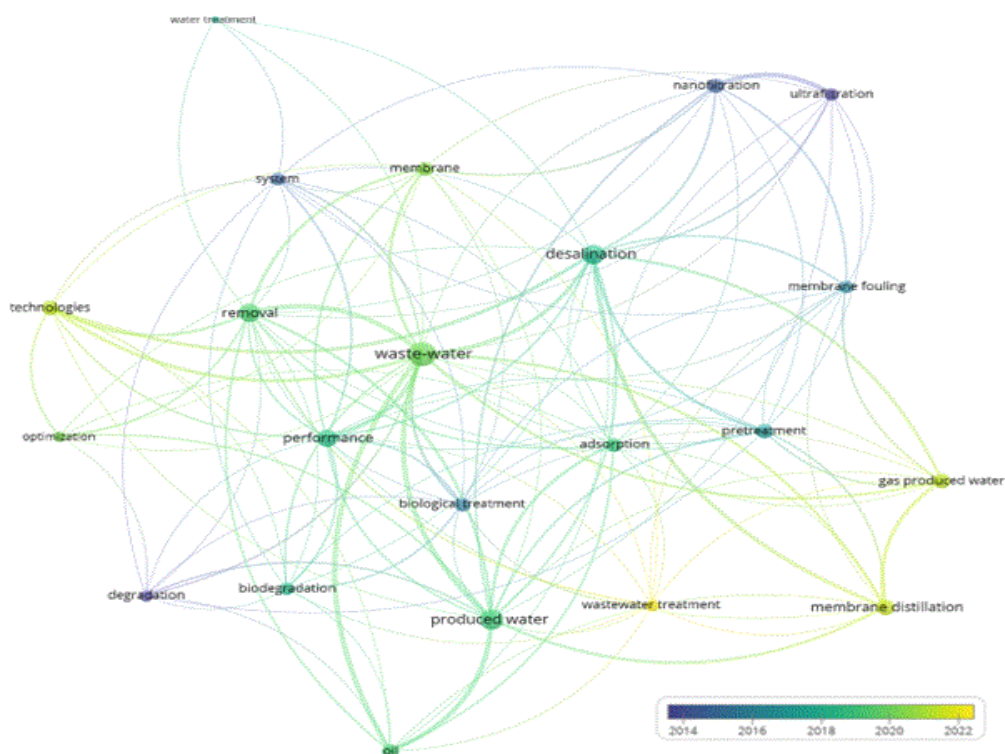


Figura 5 – Mapa temporal gerado pelo software *VOSviewer*, representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water” e “treatment process”, obtidas na busca entre 2000 e 2024, na base de dados *WOS*.

Tabela 3: Palavras-chave correspondentes à cada *cluster*, relativas ao mapa de visualização de rede representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water” e “treatment process”.

Clusters			
Cluster 1 - vermelho	Cluster 2 – verde	Cluster 3 - azul	Cluster 4 - amarelo
biodegradação	dessalinização	membrana	adsorção
tratamento biológico	água produzida - gás	otimização	óleo
degradação	destilação por membrana	remoção	água produzida
performance	incrustação de membrana	tecnologias	tratamento de águas residuais
sistema	nanofiltração		
águas residuais	pré-tratamento		
tratamento de água	ultrafiltração		

No *cluster 1*, em vermelho, é possível notar a referência à tratamentos biológicos, de acordo com as palavras-chave “tratamento biológico” e “biodegradação”.

A palavra-chave de maior expressão no *cluster* vermelho é o termo “águas residuais” com 20 ocorrências e 21 conexões, às quais, estão presentes em todos os *clusters*, de acordo com o mapa da Figura 4, o que representa uma interação com os assuntos de cada tema principal dos *clusters*. Esta palavra-chave tem um significado abrangente, porém, ao avaliar as suas conexões, pode ser constatado que ela está mais fortemente conectada, ou seja, com uma força de ligação igual a 5, com os termos “óleo” (8 ocorrências/ 10 conexões), “água produzida” (23/17), “performance” (9/15) e “remoção” (12/17).

Essa força é expressa no mapa por meio de linhas mais espessas, mas também pode ser visto através do mapa virtual de forma aproximada. A interação entre essas palavras-chave sugere que o termo “águas residuais” pode ter sido utilizado na introdução das publicações encontradas para direcionar uma matriz mais específica, como é o caso da água produzida, e desenvolver o assunto sobre tratamento para remoção de óleo na matriz. Inclusive, as palavras conectadas estão dispersas em toda a faixa do tempo referente à Figura 5, sustentando a introdução nas publicações.

No *cluster 3*, azul, as conexões do termo “tecnologias” chamaram a atenção, pois são palavras de impacto, como “otimização”, “performance”, “remoção”, e, se apresentam muito próximas, logo, essa relação é muito forte, segundo Van Eck, Waltman (2022). Além disso, a palavra-chave “tecnologias” também está relacionada à “água produzida” e “óleo”, demonstrando um avanço mais recente, de acordo com a Figura 5, em direção à busca de tratamentos mais eficazes e otimizados na remoção de óleo em água produzida.

Por outro lado, também pode ser observado, através da linha do tempo da Figura 5, que tratamentos com membrana se apresentam conectados a temas relacionados à “sistema”, “tratamento biológico”, “água produzida”, além de “remoção” e “performance”. No entanto, de acordo com Liu (2021), a utilização de tratamento com membranas foi utilizado, por séculos, em águas residuais *onshore* e, principalmente, em aplicações industriais. O autor ainda relata que são crescentes os estudos relacionados às membranas cerâmicas com filtração de fluxo cruzado no setor *offshore*. Porém, apesar da técnica, a utilização de membranas para água de produção ainda é um problema devido à incrustação da membrana.

As palavras-chave do *cluster* verde aproximam uma ideia central ao uso de um pré-tratamento antes do tratamento por membranas, como é notado na Figura 4. O *cluster 2* apresenta a “dessalinização” como a maior ocorrência no grupo, sendo 14 ocorrências e 16 conexões, as quais, incluem todo o *cluster 2*, além de “óleo” (8/ 10), “água produzida” (23/17), “pré-tratamento” (5 ocorrências/ 14 conexões), “tecnologias” (7/ 10), “otimização” (5/ 8), “adsorção” (9/ 13), “incrustação de membrana” (6/ 11), entre outras.



Através das conexões das palavras-chave de “dessalinização”, podem ser relacionadas as ideias de presença de óleo em água produzida, o uso de um pré-tratamento, e redução da incrustação de membranas. Ainda, conforme os 2 itens também relacionados, um tratamento biológico seria uma hipótese para a água produzida. Segundo Al-Ghouti et al., (2019), a aplicação de biorreatores de membrana como pré-tratamento colaborou para a redução de 83% da DQO de água produzida e, portanto, foi uma técnica de tratamento ideal em combinação com Osmose Inversa em termos de DQO e redução de condutividade. No entanto, a utilização de membranas de microfiltração e ultrafiltração foram capazes de remover menos de 25% da DQO e, portanto, não foram tão eficazes quanto a primeira em técnicas de pré-tratamento, sendo essas, mais adequadas à remoção de sais.

AVALIAÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE “PRODUCED WATER”, “TREATMENT PROCESS” E “OFFSHORE” (PESQUISA 3)

Para a terceira etapa da pesquisa, foi realizada a busca das palavras-chave no banco de dados *Web of Science (WOS)*, em Tópicos, com o termo “produced water”, “treatment process” e “offshore”. Foram encontrados 780 registros, os quais agruparam 27 palavras-chave, considerando o número mínimo de ocorrências igual a 5. Foram formados 3 *clusters*, com um total de 182 conexões entre as palavras-chave.

Os mapas de visualização em rede criados pelo software *VOSviewer* estão representados pelas palavras que compõe essa pesquisa, na Figura 6, bem como a Figura 7 apresenta o mapa temporal correspondente. Subsequente, a Tabela 4 aborda as palavras-chave obtidas na pesquisa, agrupadas por *cluster*.

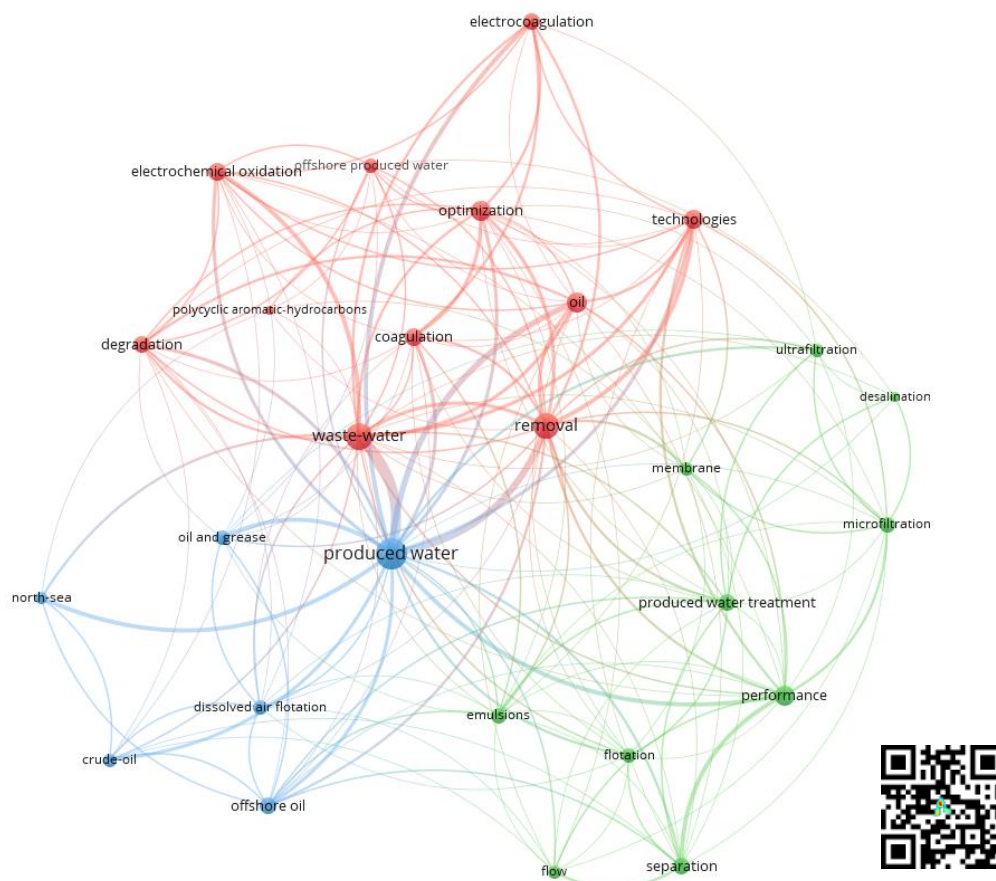


Figura 6 – Mapa gerado pelo software *VOSviewer*, representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water”, “treatment process” e “offshore”, obtidas na busca entre 2000 e 2024, na base de dados *WOS*.

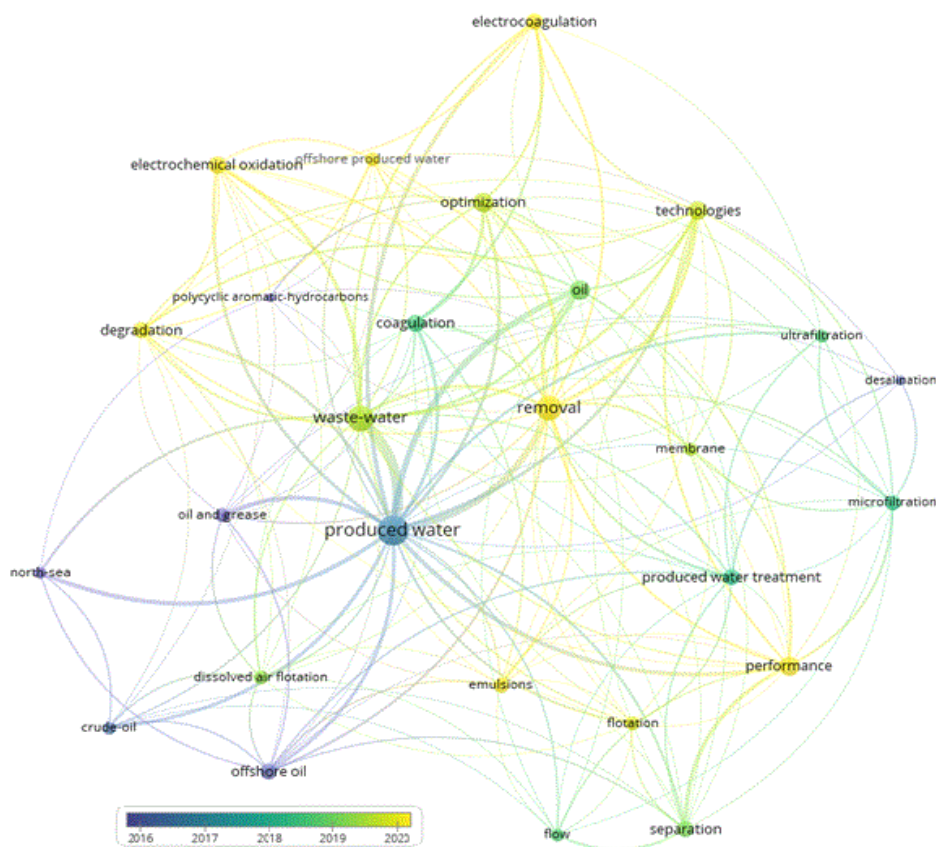


Figura 7 – Mapa temporal gerado pelo software VOSviewer, representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water”, “treatment process” e “offshore”, obtidas na busca entre 2000 e 2024, na base de dados WOS.

Tabela 4: Palavras-chave correspondentes à cada cluster, relativas ao mapa de visualização de rede representando a co-ocorrência das palavras-chave “produced water”, “treatment process” e “offshore”.

Clusters		
Cluster 1 - vermelho	Cluster 2 - verde	Cluster 3 - azul
água produzida offshore	dessalinização	água produzida
águas residuais	emulsões	flotação por ar dissolvido
coagulação	flotação	mar do Norte
degradação	fluxo	óleo cru
eletrocoagulação	membrana	óleo e graxa
hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	microfiltração	óleo offshore
óleo	performance	
otimização	separação	
oxidação eletroquímica	tratamento de água produzida	
remoção	ultrafiltração	
tecnologias		



Analisando o levantamento de dados, foi verificado que, diferentemente das pesquisas das etapas 1 e 2, o mapa de visualização de rede criado a partir das palavras-chave “produced water”, “treatment process” e “*offshore*” apresentou uma distinção maior entre os temas nos 3 *clusters* formados. Isto pode ser notado devido à uniformidade temática entre as palavras-chave de cada um, conforme observado na Tabela 4 e na Figura 6.

O *cluster* 1, em vermelho no mesmo mapa, mostra as palavras-chave relacionadas entre si, como exemplos de matriz, contaminante, e formas de tratamento mais atuais, como “água produzida *offshore*”, “óleo”, “eletrocoagulação” e “oxidação eletroquímica”. Visualizando no mapa temporal, ilustrado na Figura 7, são palavras-chave encontradas mais recentemente, entre últimos 5 anos, aproximadamente.

Já o *cluster* 2 apresentou palavras-chave direcionadas à processos de separação. A observação desse grupo teve grande relevância, uma vez que a alta salinidade é uma característica pertinente à água produzida, e a “dessalinização”, palavra pertencente ao grupo, é um dos principais objetivos do tratamento de água produzida, conforme descreve (Igunnu (2012). Porém, se a água tratada for descartada no mar, não há a necessidade de remoção de sais, mas principalmente O&G. Neste caso, não há a necessidade de se utilizar sistema de membrana de osmose inversa. As demais palavras-chave que confirmam o tema são “membrana”, “microfiltração”, “ultrafiltração”, “separação” e “fluxo”.

No *cluster* azul, a palavra de maior ocorrência encontrada foi “água produzida”, com 42 ocorrências, e 23 conexões. Pode ser notada a relação desta com todos os *clusters*, o que de fato é apropriado, uma vez que, a água produzida é o motivo central deste estudo, e a palavra que identifica a matriz amostral nas buscas da pesquisa terceira fase. De um modo geral, o *cluster* 3 se relaciona com o escopo do estudo, através da presença das palavras-chave “óleo *offshore*”, “óleo cru” e “óleo e graxa”. No mapa temporal da Figura 7, o *cluster* em questão possui palavras-chave de publicações anteriores à 2016, demonstrando uma atenção histórica ao tema, diferentemente das palavras-chave mais recentes, com publicações próximas de 2020, incluindo palavras como “degradação”, “remoção”, “performance”, “tecnologias” e “otimização”.

Ainda no último grupo, o tratamento “flotação por ar dissolvido” foi verificado. Segundo Igunnu (2012), esse método de separação é muito utilizado para o tratamento de água produzida em campos petrolíferos. Esse processo visa o caso de partículas que não são facilmente separadas por sedimentação, onde o gás injetado tem bolhas menores do que as partículas de óleo, resultando na formação de uma espuma na superfície da água, sendo assim, mais facilmente removida. Além disso, são unidades compactas que permitem a inclusão em plataformas *offshore*.

PROPOSTA DE UMA ROTA DE TRATAMENTO DO EFLUENTE ÁGUA PRODUZIDA EM PLATAFORMAS DE PETRÓLEO OFFSHORE

Nas indústrias petrolíferas, a água produzida é o efluente aquoso trazido à superfície junto com óleo ou gás em operações de extração. Operações *offshore* são complexas e impõem restrições quanto a limitações de espaço para armazenamento, manuseio e transporte da água produzida. Soluções adequadas para evitar o impacto ambiental deste tipo de águas residuais são, primeiramente, sua minimização, seguida de uma reutilização, por fim, seu descarte adequado. Para tal, um tratamento se faz necessário, tendo em vista sua grande variedade de substâncias tóxicas em sua composição.

O Brasil detém uma larga produção de petróleo *offshore*. Uma das exigências da legislação brasileira imposta pelos órgãos ambientais para o descarte no mar é o enquadramento do teor de Óleo & Graxa, cujo enquadramento pode ter alguma variabilidade. Em todo caso, se faz necessário um pós-tratamento a fim de que a água produzida seja descartada dentro dos padrões adequados à Resolução CONAMA n° 393/2007.

Ao analisar as questões de tratamento, é indiscutível que a proposta deve atender à demanda de atividades *offshore*, como dificuldades de infraestrutura e disponibilidade de energia nas plataformas. Dessa forma, a combinação de operações unitárias deve ser considerada.

A rota de tratamento proposta deve descrever maior adequação ao objetivo de remoção de Óleo & Graxa. Após a etapa de hidrociclone, atualmente utilizada em plataformas *offshore*, o flotor promove a separação da água e do óleo. Para maior eficiência do processo, a rota proposta presume a associação, na etapa do flotor, de um tratamento por eletrocoagulação ou oxidação química, tendo em vista essa realidade mais recente, conforme



observado no estudo. Porém, essa proposta teórica precisa ser validada e desenvolvida em escala de laboratório, posteriormente em escala piloto visando verificar a eficácia da associação dessas tecnologias ao processo atualmente realizado.

Para ações futuras, cabe ressaltar, a necessidade de otimização de pesquisa incluindo a remoção de Óleo & Graxa para polimento final da água produzida. Ainda convém lembrar, que os processos oxidativos avançados são técnicas promissoras observadas, tendo em vista a geração dos radicais hidroxila como forma de degradar a maioria dos compostos orgânicos, produzindo uma mineralização dos compostos, ou a sua conversão à produtos biodegradáveis.

CONCLUSÕES

Como conclusão deste estudo, foram realizadas etapas de pesquisas que puderam contribuir para o alcance dos objetivo propostos.

Foi destacada a relevância da “água produzida” como rejeito de indústria petrolífera.

As pesquisas bibliográficas permitiram a realização, de forma satisfatória, do estudo bibliométrico, através dos dados obtidos na base de dados *Web of Science*.

Os tratamentos aplicados em plataformas de petróleo *offshore*, onde o espaço é limitado, puderam ser constatados, por meio da análise bibliométrica de forma clara.

Foi avaliada a evolução temporal das tecnologias de tratamento mais utilizadas para a matriz de água produzida.

Portanto, uma rota de tratamento foi proposta, a partir dos procedimentos de tratamento atualmente realizados nas plataformas de petróleo *offshore*, de forma a incrementar o processo com tecnologias promissoras para a remoção de óleo e graxa, visando o enquadramento do lançamento do efluente em mar, perante a legislação vigente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-GHOUTI, M. A., AL-KAABI, M. A., ASHFAQ, M. Y., *et al.* **Produced water characteristics, treatment and reuse: A review.** *Journal of Water Process Engineering.*, Elsevier Ltd. 1 abr. 2019
2. BENEDITO, J., NETO, O., TADAIHIRO SHIMA, W. **TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS NO SEGMENTO OFFSHORE: AMBIENTE E OPORTUNIDADES ***. 2008.
3. DONTHU, N., KUMAR, S., MUKHERJEE, D., *et al.* "How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines", *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, 1 set. 2021.
4. GHAFFARIAN KHORRAM, A., FALLAH, N., NASERNEJAD, B., *et al.* **Electrochemical-based processes for produced water and oily wastewater treatment: A review.** *Chemosphere.*, Elsevier Ltd. 1 out. 2023
5. IGUNNU, E. T., CHEN, G. Z. "Produced water treatment technologies", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 9, n. 3, p. 157–177, 2012.
6. JAN VAN ECK, N., WALTMAN, L. **VOSviewer Manual**, 2022.
7. JIMÉNEZ, S., ANDREOZZI, M., MICÓ, M. M., *et al.* "Produced water treatment by advanced oxidation processes", *Science of the Total Environment*, v. 666, p. 12–21, 20 maio 2019.
8. LIU, Y., LU, H., LI, Y., *et al.* **A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields.** *Science of the Total Environment.*, Elsevier B.V. 25 jun. 2021
9. NADERSHA, S., ALY HASSAN, A. "Biodesalination and treatment of raw hypersaline produced water samples using indigenous wastewater algal consortia", *Desalination*, v. 528, 15 abr. 2022.
10. "PETROBRAS_Relatório de Sustentabilidade 2022".
11. ZHENG, J., CHEN, B., THANYAMANTA, W., *et al.* **Offshore produced water management: A review of current practice and challenges in harsh/Arctic environments.** *Marine Pollution Bulletin.*, Elsevier Inc. , 15 mar. 2016
12. ZUPIC, I., ČATER, T. "Bibliometric Methods in Management and Organization", *Organizational Research Methods*, v. 18, n. 3, p. 429–472, 15 jul. 2015.