



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Gestão de compostos orgânicos presentes em retardantes de chama e fluidos refrigerantes na reciclagem de embarcações

Juliana Rodrigues Lima dos Santos

Universidade Federal Fluminense (julianarlds@id.uff.br)

Eduarda Campos Martins

Universidade Federal Fluminense (eduardacampos@id.uff.br)

Giovana da Silva Joaquim

Universidade Federal Fluminense (giovanasilva@id.uff.br)

Lorena Barreto Braz

Universidade Federal Fluminense (lorenab@id.uff.br)

Denise de Castro Bertagnolli

Universidade Federal Fluminense (denisebertagnolli@id.uff.br)

Newton Narciso Pereira

Universidade Federal Fluminense (newtonpereira@id.uff.br)

Resumo

As embarcações e plataformas marítimas devem ser descomissionadas ao fim da vida útil e então recicladas em instalações apropriadas. No processo de reciclagem, podem estar presentes os materiais perigosos orgânicos como o ácido perfluorooctano sulfônico (PFOS), as bifenilas policloradas (PCBs), as bifenilas polibromadas (PBBs), os éteres difenílicos polibromados (PBDEs), as parafinas cloradas de cadeia curta (SCCPs), além de substâncias destruidoras da camada de ozônio (ODS), as quais podem causar impactos



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

negativos ao meio ambiente e à saúde humana devido a sua estabilidade química e persistência no ambiente. Neste contexto, o presente trabalho propõe a caracterização de alguns compostos orgânicos, com ênfase em compostos utilizados como retardantes de chama e fluidos refrigerantes, sua ocorrência em embarcações, os aspectos ambientais e à saúde associados ao seu manejo. A partir de uma revisão bibliográfica exploratória, foram analisados os impactos destes materiais assim como medidas para a mitigação dos riscos associados à liberação e exposição a essas substâncias tóxicas. Com esse estudo conclui-se que a gestão eficiente desses compostos fundamenta-se na identificação por meio do Inventário de Materiais Perigosos (IHM), na segregação controlada de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) e no recolhimento ativo de substâncias que destroem a camada de ozônio (ODS), culminando em sua destruição ou reuso controlado. Esse conjunto de ações é essencial para minimizar os impactos ambientais e à saúde humana, assegurando práticas de reciclagem naval ambientalmente seguras.

Palavras-chave: retardantes de chama, compostos orgânicos, impactos socioambientais.

Abstract

Ships and offshore platforms must be decommissioned at the end of their operational life and subsequently recycled in appropriate facilities. During the recycling process, hazardous organic materials may be present, such as perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), polychlorinated biphenyls (PCBs), polybrominated biphenyls (PBBs), polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), and short-chain chlorinated paraffins (SCCPs), as well as ozone-depleting substances (ODS), which can cause negative environmental and human health impacts due to their chemical stability and environmental persistence. In this context, the present study proposes the characterization of selected organic compounds, with emphasis on those used as flame retardants and refrigerants, their occurrence in ships, and the environmental and health aspects associated with their management. Based on an exploratory literature review, the impacts of these materials and the measures for mitigating the risks associated with the release and exposure to these toxic substances were analyzed. This study concludes that the efficient management of



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

these compounds relies on their identification through the Inventory of Hazardous Materials (IHM), the controlled segregation of Persistent Organic Pollutants (POPs), and the active collection of ozone-depleting substances (ODS), culminating in their controlled destruction or reuse. This set of actions is essential to minimize environmental and human health impacts, ensuring environmentally sound ship recycling practices.

Keywords: flame retardants, organic compounds, socio-environmental impacts.

Resumen

Los buques y las plataformas marítimas deben ser desmantelados al final de su vida útil y posteriormente reciclados en instalaciones adecuadas. Durante el proceso de reciclaje pueden estar presentes materiales orgánicos peligrosos, como el ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS), las bifenilas policloradas (PCB), las bifenilas polibromadas (PBB), los éteres difenílicos polibromados (PBDE) y las parafinas cloradas de cadena corta (SCCP), además de sustancias que agotan la capa de ozono (ODS), las cuales pueden provocar impactos negativos en el medio ambiente y en la salud humana debido a su estabilidad química y persistencia ambiental. En este contexto, el presente estudio propone la caracterización de algunos compuestos orgánicos, con énfasis en aquellos utilizados como retardantes de llama y fluidos refrigerantes, su presencia en embarcaciones y los aspectos ambientales y de salud asociados a su gestión. A partir de una revisión bibliográfica exploratoria, se analizaron los impactos de estos materiales así como las medidas para mitigar los riesgos asociados con la liberación y exposición a estas sustancias tóxicas. De este estudio se concluye que la gestión eficiente de estos compuestos se fundamenta en su identificación mediante el Inventario de Materiales Peligrosos (IHM), la segregación controlada de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) y la recolección activa de las sustancias que destruyen la capa de ozono (ODS), culminando en su destrucción o reutilización controlada. Este conjunto de acciones es esencial para minimizar los impactos ambientales y en la salud humana, garantizando prácticas de reciclaje naval ambientalmente seguras.

Palabras clave: retardantes de llama, compuestos orgánicos, impactos socioambientales.



1. INTRODUÇÃO

As atividades de desmantelamento e reciclagem de navios acarretam impactos socioambientais de elevada relevância, em virtude da geração de grandes volumes de resíduos perigosos, abrangendo emissões gasosas, descargas de fluidos e materiais sólidos (Čulin; Bielić, 2015).

Ao final de sua vida útil, que varia de 25 a 30 anos, as embarcações e plataformas marítimas devem ser encaminhadas para processos de reciclagem. Estes processos envolvem a remoção das instalações do local de operação e o gerenciamento de todos os materiais presentes, incluindo aqueles classificados como perigosos. A maior parte dos resíduos gerados é composta por sucata ferrosa reciclável, porém há materiais perigosos que representam riscos à saúde humana e ao ambiente (Du *et al.*, 2018). Dentre esses materiais destacam-se os compostos orgânicos empregados como fluidos refrigerantes, retardantes de chama, entre outros. O manejo seguro e eficiente desses materiais é essencial para mitigar riscos à saúde humana e ao ambiente, além de assegurar a conformidade com regulamentações nacionais e internacionais (Lin *et al.*, 2022).

Os retardantes de chamas podem conter em sua composição poluentes orgânicos persistentes (POPs), que são substâncias químicas perigosas com efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Compostos como o ácido perfluorooctano sulfônico (PFOS), as bifenilas policloradas (PCBs), as bifenilas polibromadas (PBBs), os éteres difenílicos polibromados (PBDEs), as parafinas cloradas de cadeia curta (SCCPs) são amplamente utilizados como retardantes de chama, devido à sua alta estabilidade química, térmica e biológica (IMO, 2023).

Os fluidos refrigerantes possuem ampla gama de aplicações que impactam diretamente o cotidiano, abrangendo desde o uso doméstico de refrigeradores até sistemas de ar-condicionado em diferentes setores. Observa-se que esses equipamentos desempenham um papel essencial na manutenção e no avanço do desenvolvimento socioeconômico (Ibrahim *et al.*, 2024). Devido às suas excelentes propriedades termofísicas, os clorofluorocarbonos (CFCs), os hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) e os



hidrofluorocarbonetos (HFCs) foram amplamente utilizados como fluidos refrigerantes em diversas aplicações industriais (Manahan, 2013).

Nesse contexto, o presente trabalho visa, a partir de uma revisão bibliográfica exploratória, à caracterização dos compostos orgânicos perigosos utilizados como retardantes de chama e fluidos refrigerantes, analisando sua ocorrência em embarcações, os aspectos ambientais e de saúde associados ao seu manejo e as práticas emergentes de gerenciamento, a fim de propor diretrizes para a gestão eficiente desses resíduos durante o desmanche.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A utilização de retardantes de chama é fundamental para a prevenção e o controle de incêndios a bordo. Entretanto, os componentes presentes nesses produtos, especialmente os compostos orgânicos, representam sérios desafios ambientais (IMO, 2023). De modo semelhante, alguns fluidos refrigerantes, classificados como substâncias que afetam a camada de ozônio (*Ozone Depleting Substances* - ODS), foram amplamente utilizados devido às suas excelentes propriedades físico-químicas. No entanto, esses compostos apresentam elevado Potencial de Destruição da Camada de Ozônio (PDO), pois podem reagir com moléculas de ozônio na estratosfera, contribuindo de forma significativa para o seu esgotamento (Frota; Vasconcelos, 2019).

Nesse sentido, compreender as características químicas, os usos e os impactos associados a esses compostos é fundamental para avaliar seus riscos e definir estratégias de gerenciamento mais seguras e sustentáveis.

2.1 Retardantes de chamas: Panorama geral

Os retardantes de chama são substâncias químicas industriais adicionadas a materiais manufaturados, como plásticos, têxteis e revestimentos, com o objetivo de inibir, suprimir ou retardar a ignição e a propagação do fogo. Podem ser encontrados em uma ampla variedade de produtos, como móveis (espumas, estofados, carpetes, cortinas), dispositivos eletrônicos e elétricos (computadores, telefones, eletrodomésticos), meios de



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

transporte (assentos, capas e enchimentos de assentos, para-choques, compartimentos superiores e outras peças de automóveis, trens e aviões) e em materiais de construção civil (fios e cabos elétricos, espumas de isolamento térmico, tintas, adesivos e selantes) (Environment, 2017).

Desde a década de 1970, esses compostos vêm sendo utilizados em diversos produtos de consumo e industriais para reduzir a inflamabilidade dos materiais (Environment, 2017). É importante notar que o termo “retardante de chama” refere-se à função e não a uma composição química específica (NIH, 2023). Esses compostos são classificados em quatro grupos principais: inorgânicos (como hidróxidos de alumínio, antimônio e estanho); orgânicos halogenados (incluindo compostos clorados e bromados); organofosforados; e compostos à base de nitrogênio. A distribuição estimada da produção global desses retardantes é de aproximadamente 40,4% para o hidróxido de alumínio, 19,7% para os bromados, 14,6% para os fosforados, 11,3% para os clorados, 8,4% para o óxido de antimônio e 5,6% para outras substâncias (IPCS, 1997).

Sob o ponto de vista químico, tais compostos podem reagir, em presença de calor, com o oxigênio atmosférico, gerando gases incombustíveis que reduzem a disponibilidade de oxigênio para o processo de combustão, ou ainda interagir com polímeros na fase sólida, induzindo a formação de uma camada carbonácea que atua como barreira física à propagação das chamas (Troizsch, 1998). O consumo global desses aditivos (FRs) foi estimado em aproximadamente 2,3 milhões de toneladas métricas em 2016, com projeções indicando um aumento para cerca de 2,5 milhões de toneladas métricas nos anos subsequentes (Feng *et al.*, 2023).

Essas substâncias perigosas podem ser transportadas pelo vento e pela água, de modo que locais que não produzem ou utilizam os POPs também podem ser afetados. Além do mais, os POPs podem se acumular e ser transferidos entre os organismos ao longo da cadeia trófica (EPA, 2014). Apesar da redução no uso de alguns retardantes de chama, a persistência desses compostos em produtos de consumo duráveis, alimentos e poeira doméstica evidencia que a exposição humana ainda ocorre por meio da bioacumulação.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Assim, a exposição global a essas substâncias pode perdurar por várias décadas (Feiteiro; Mariana; Cairrão, 2021).

A eficiência de um retardante de chama é, em grande medida, determinada pela sua estrutura molecular e pela natureza da matriz alvo. O desenvolvimento molecular desses aditivos ainda se baseia predominantemente em abordagens empíricas e na intuição do formulador, resultando em processos iterativos de tentativa e erro que exigem ampla triagem de compostos, síntese, variações de formulação e extensos protocolos de ensaio (Feng *et al.*, 2023).

Neste contexto de persistência e risco, os retardantes de chama têm recebido atenção crescente devido à sua presença no meio ambiente e aos potenciais riscos à saúde, o que tem impulsionado ações governamentais (NIH, 2023). Neste sentido, o Brasil atualizou, em 2024, o Plano Nacional para a Redução e Eliminação dos POPs (MMA, 2024).

Considerando os riscos associados à liberação dessas substâncias durante o desmonte/reciclagem de embarcações, torna-se fundamental caracterizar os principais compostos orgânicos presentes nos retardantes de chama, bem como suas propriedades e potenciais impactos ambientais.

2.2 Compostos orgânicos presentes em retardantes de chama

A seguir, apresentam-se alguns dos principais compostos orgânicos identificados em materiais de embarcações, empregados como retardantes de chama e que podem ser liberados durante o processo de reciclagem naval.

2.2.1 PFOS

O ácido perfluorooctanossulfônico (PFOS) é uma substância aniônica totalmente fluorada, comumente usada como sal em determinadas aplicações ou incorporada a polímeros de maior peso molecular, pertence à família das substâncias perfluoroalquil sulfonadas (PFAS) (UNEP, 2012).

Esta classe de substâncias se destaca por sua notável estabilidade química, decorrente das fortes ligações carbono-flúor em sua estrutura perfluoroalquílica, o que a torna resistente



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

a ácidos, altas temperaturas e à degradação ambiental. Suas propriedades hidrofóbicas e lipofóbicas reduzem a tensão superficial, conferindo-lhe a capacidade de repelir água e óleo, além de atuar como isolante elétrico, fatores que explicam seu amplo emprego em aplicações industriais desde a década de 1950 (UNEP, 2012).

Entre suas principais aplicações, o PFOS é encontrado em espumas formadoras de filme aquoso (*Aqueous Film Forming Foam* - AFFF) amplamente utilizadas em embarcações. Além disso, é empregado no tratamento de tecidos e papéis, bem como em diversos segmentos industriais, como revestimentos, cromagem, fluidos hidráulicos para aviação e espumas de combate a incêndio, podem também estar presente em produtos de consumo (EMSA, 2016).

Embora as AFFF contendo PFOS sejam utilizadas em navios de diferentes categorias, os maiores volumes são geralmente instalados em embarcações que transportam fluidos inflamáveis e em navios equipados com conveses de helicópteros, onde o risco de incêndio é elevado. A quantidade de espuma pode variar de 100 a 10.000 litros, conforme o porte e a finalidade da embarcação. Geralmente os produtos são armazenados em um tanque principal integrado ao sistema de proteção contra incêndios, podendo haver reservatórios adicionais menores (por exemplo, de 20 litros), estrategicamente posicionadas em locais como as salas de máquinas. A concentração de PFOS nessas formulações pode variar de 0,017 e 0,037 kg por litro de espuma (EMSA, 2016).

As AFFF distinguem-se de outros agentes de combate a incêndio por incorporarem uma fração de tensoativo fluorado (fluorsurfactante). Esse componente é responsável por propriedades específicas de desempenho, conferindo alta eficiência na supressão de chamas, sobretudo em incêndios envolvendo líquidos inflamáveis da Classe B (UNEP, 2012).

No entanto, a manipulação e o uso dessas espumas não estão isentos de riscos. A exposição ocupacional pode resultar na detecção de PFOS na corrente sanguínea de trabalhadores (Rotander *et al.*, 2015). Essa persistência biológica, associada à elevada estabilidade química e ampla aplicação industrial, reforça a preocupação global em relação ao PFOS e a outros compostos da classe PFAS (UNEP, 2012).

2.2.2 PCBs, PBBs, PBDEs

As bifenilas policloradas (PCBs) constituem uma classe de compostos organoclorados obtidos pela cloração do bifenil na presença de catalisadores, como o cloreto férrico (Baird; Cann, 2011). Produzidas em escala industrial desde a década de 1920, essas substâncias foram amplamente utilizadas em diversos setores industriais (Penteado; Vaz, 2001). Comercialmente, as PCBs são disponibilizadas como misturas de congêneres parcialmente separadas, que apresentam diferentes níveis de cloração (Manahan, 2013).

Estruturalmente semelhantes às PCBs, as bifenilas polibromadas (PBBs) formam uma classe de compostos que contêm de 2 a 10 átomos de bromo substituindo o grupo bifenila, resultado em igual número de congêneres possíveis (Manahan, 2013). Devido à sua semelhança estrutural, as PBBs apresentam propriedades físico-químicas comparáveis às PCBs, sendo compostos lipofílicos, altamente persistentes, tóxicos e com grande potencial de bioacumulação (Pieroni; Leonel; Fillmann, 2016).

Os éteres difenílicos polibromados (PBDEs) são produzidos pela bromação do éter difenílico na presença de catalisadores, como o brometo férrico (FeBr_3), em meio solvente. De modo semelhante às PCBs e PBBs, a substituição dos átomos de hidrogênio por bromo na estrutura molecular permite a formação de até 209 congêneres distintos (Pieroni; Leonel; Fillmann, 2016).

Devido à sua estabilidade estrutural, esses compostos são amplamente utilizados como retardantes de chama bromados (RFBs), constituindo um dos tipos mais comuns de retardantes utilizados em diversos materiais (ABICHAMA, 2023). Embora os RFBs sejam de relevância global, não há registros de produção de PBDEs para esta finalidade no Brasil. Assim, o desafio toxicológico e ambiental imposto por esses compostos halogenados decorre de suas características de persistência e do uso histórico em larga escala (Brasil, 2023).

2.2.3 SCCPs

As parafinas cloradas de cadeia curta (*Short-chain Chlorinated Paraffins* - SCCPs) são compostos resultantes da cloração radicalar de alcanos lineares com 10 a 13 átomos de carbono em presença de cloro gasoso e sob condições de alta temperatura e radiação ultravioleta, que iniciam a substituição dos átomos de hidrogênio por cloro. O processo resulta em uma mistura complexa de congêneres com diferentes graus de cloração, apresentando teor de cloro variando entre 30 e 70% (Glüge *et al.*, 2016; Lassen *et al.*, 2014; Pellizzato *et al.*, 2007; South *et al.*, 2022; Van Mourik *et al.*, 2016).

O processo de cloração, de natureza exotérmica e com liberação de ácido clorídrico (HCl) como subproduto, confere às SCCPs propriedades físico-químicas específicas, como alta densidade, baixa volatilidade e elevada estabilidade térmica. Tais características justificam seu uso extensivo como retardantes de chama e plastificantes em diversos produtos, incluindo PVC, tecidos, borrachas, fluidos metalúrgicos e tintas (Bayen; Obbard; Thomas, 2006; McGrath *et al.*, 2021; MMA, 2023; UNEP, 2021; Van Mourik *et al.*, 2018).

A eficiência como retardante das SCCPs está diretamente ligada à sua decomposição térmica, que promove a liberação de radicais halogenados durante o aquecimento, interferindo nas reações em fase gasosa da combustão. A liberação de radicais cloro durante a pirólise inibe a propagação do fogo, mecanismo típico de aditivos halogenados (Kutarna *et al.*, 2023; Troizsch, 2004).

Estudos de degradação térmica de parafinas cloradas, como os realizados por Camino e Costa (1980), demonstraram a liberação gradual de cloro gasoso e HCl em temperaturas entre 250 e 350 °C, faixa característica do início da pirólise de polímeros vinílicos. O grau de cloração das SCCPs é determinante nesse processo: cadeias mais curtas e altamente cloradas (60 – 70%) liberam cloro mais rapidamente, proporcionando maior eficiência retardante, porém com menor estabilidade térmica. Por outro lado, parafinas menos cloradas, são termicamente mais estáveis, mas apresentam menor eficiência de inibição (Glüge *et al.*, 2013; McGrath *et al.*, 2021).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

No contexto das aplicações práticas, essas substâncias são encontradas em navios principalmente como componentes de lubrificantes, tintas e retardantes de chama (UNEP, 2023). O uso de SCCPs foi expressivo em determinados países: em 2007, por exemplo, 300 toneladas de SCCPs foram utilizadas no Brasil em borracha, carpetes de automóveis e outros acessórios (UNEP, 2016).

Apesar de sua eficiência funcional, o uso das SCCPs implica em riscos ambientais e à saúde humana. Em temperaturas superiores a 400 °C, sua decomposição pode gerar produtos halogenados, como hidrocarbonetos clorados voláteis, cloretos de alquila e radicais instáveis (Camino; Costa, 1980; Nevondo; Okonkwo, 2021). Esses produtos secundários, somados à alta persistência ambiental da classe, justificam as restrições regulatórias internacionais ao seu uso. Devido aos riscos toxicológicos e ambientais associados à decomposição e bioacumulação, as SCCPs vêm sendo gradualmente substituídas por alternativas menos persistentes (Kutarna *et al.*, 2023; UNEP, 2021).

2.3 Fluidos Refrigerantes: panorama geral

A tecnologia de refrigeração exerce um papel essencial no contexto da vida moderna e do desenvolvimento industrial. Ela não apenas garante condições ambientais confortáveis e adequadas ao bem-estar humano, como também se torna indispensável para enfrentar climas extremos e garantir a preservação e a qualidade dos alimentos. Além disso, sua aplicação se estende a diversos setores produtivos, sendo fundamental em processos que exigem controle térmico rigoroso (Bolaji; Huan, 2013).

Os compostos organoclorofluorados são amplamente empregados em vários processos e aplicações industriais e comerciais, em razão de suas propriedades físico-químicas específicas, que justificam seu extenso uso. Nas últimas décadas, esses compostos foram muito utilizados na fabricação de espumas flexíveis e rígidas e como refrigerantes em sistemas de ar-condicionado. Também são aplicados como solventes industriais, propelentes de aerossóis, agentes de limpeza e na produção de plásticos porosos (Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).



Os clorofluorcarbonos (CFCs), em especial, foram amplamente empregados como propelentes em aerossóis e fluidos refrigerantes em sistemas de compressão a vapor. No entanto, quando liberados no ambiente e expostos a radiação ultravioleta nas camadas superiores da atmosfera, produzem radicais cloro ($\bullet\text{Cl}$) altamente reativos e responsáveis pela degradação da camada de ozônio (Manahan, 2013).

Os componentes básicos de um sistema de refrigeração por compressão de vapor são o compressor, condensador, dispositivo de expansão, evaporador e o fluido refrigerante. Estes componentes são interligados em sequência, formando um sistema fechado e hermético, com um fluido de trabalho, chamado de fluido refrigerante, que circula continuamente (Stoecker; Jabardo, 2002).

Embora os fluidos refrigerantes tenham contribuído de forma significativa para o avanço tecnológico e conforto térmico, o uso prolongado de compostos como CFCs, solventes clorados e halons (empregados como extintores de incêndio) resultou em graves impactos ambientais. Tais substâncias mostraram-se responsáveis pela destruição da camada de ozônio. A bordo de embarcações, sua presença tende a ser mais restrita, em função das regulamentações marítimas internacionais, como a Convenção Internacional para a prevenção da poluição por navios, a MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) (Jain; Pruyn, 2017).

Considerando os riscos associados à liberação atmosférica dessas substâncias durante o desmonte e reciclagem de embarcações, torna-se essencial caracterizar os principais fluidos refrigerantes orgânicos, especialmente os CFCs, bem como suas propriedades de depleção da camada de ozônio e potenciais impactos climáticos e à saúde humana.

2.4 Composto orgânico presente em fluidos refrigerantes

Nas seções a seguir, serão apresentados alguns dos principais compostos orgânicos utilizados como fluidos refrigerantes em embarcações, os quais podem ser liberados para o ambiente durante as etapas de operação, manutenção e, especialmente, no processo de reciclagem naval.

2.4.1 Substâncias que afetam a camada de ozônio

As substâncias que afetam a camada de ozônio (ODS – *Ozone Depleting Substances*) correspondem a um grupo relevante de materiais perigosos presentes em embarcações, compostos que, ao serem liberados, contribuem para a destruição da camada de ozônio na estratosfera (Frota; Vasconcelos, 2019).

Os ODS abrangem diversos compostos, tais como: clorofluorcarbonetos – CFCs, tais como CFC-11 - triclourofluormetano; CFC-12 - diclorodifluormetano; CFC-113 - 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoretano; CFC-114 - 1,2 dicloro-1,1,2,2-tetrafluoretano; CFC-115 - cloropentafluoretano); os hidroclorofluorcarbonetos – HCFCs, tais como HCFC-22 - clorodifluormetano); os halons, Halon 1211 - bromoclorodifluormetano; Halon 1301 - bromotrifluormetano; Halon 2402 - 1,2-dibromo-1,1,2,2 tetrafluoretano (Halon 114B2) (Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).

Os compostos organoclorofluorados, conhecidos pela sigla CFCs, ou fréons, são substâncias voláteis pertencentes ao grupo dos ODS e representam um dos principais materiais perigosos presentes em embarcações (Jain; Pruyn, 2017; Manahan, 2013). Esses compostos são atóxicos, não inflamáveis, não corrosivos e apresentam propriedades de condensação favoráveis, o que justifica seu uso extensivo como fluidos refrigerantes e propelentes (Baird; Cann, 2011; Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).

Os hidrobromofluorcarbonetos (HBFCs), conhecidos como halons, são compostos halogenados semelhantes aos CFCs, diferenciando-se pela presença de pelo menos um átomo de bromo em sua estrutura, o que lhes confere maior eficiência na extinção de incêndios, mas também elevado potencial destruidor da camada de ozônio (Frota; Vasconcelos, 2019).

Como substitutos temporários dos CFCs e halons, surgiram os hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), que apresentam átomos de hidrogênio ligados ao carbono-hidrogênio (C-H), o que os torna mais susceptíveis à degradação na troposfera e consequentemente, menos persiste na estratosfera (Manahan, 2013).



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

O uso de CFCs, halons e solventes clorados em embarcações tem sido progressivamente reduzido devido às regulamentações marítimas internacionais, como a Convenção MARPOL, que visa prevenir e controlar a poluição por embarcações (Jain; Pruyn, 2017). Contudo, fluidos refrigerantes derivados de CFCs, HCFCs e HFCs ainda são encontrados em sistemas de ar-condicionado e refrigeração a bordo, representando riscos ambientais significativos. A gestão adequada desses gases refrigerantes é, portanto, crucial durante as etapas de desmantelamento e reciclagem de embarcações (Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).

O Comitê de Proteção do Meio Ambiente Marinho (MEPC) da Organização Marítima Internacional (IMO) publicou a Resolução MEPC.379(80), que reforça o compromisso global de reduzir o impacto ambiental causado por substâncias destruidoras da camada de ozônio. A resolução estabelece que os sistemas e equipamentos atualmente em operação podem permanecer em uso e ser recarregados quando necessário, entretanto, a liberação deliberada dessas substâncias na atmosfera é estritamente proibida (IMO, 2023).

Nesse contexto, a forma como esses compostos orgânicos são manejados durante o desmantelamento e reciclagem de embarcações está diretamente relacionada aos impactos ambientais e aos riscos à saúde humana. Assim, torna-se essencial compreender as consequências associadas à liberação e à exposição a esses compostos, de modo a promover práticas seguras e ambientalmente responsáveis no setor naval.

2.5 Impactos ambientais e à saúde

A reciclagem é uma prática amplamente adotada na indústria marítima, contudo, o desmonte de navios ainda costuma ocorrer em condições precárias de saúde e segurança ocupacional, além de estar associado a impactos ambientais significativos (Miliós *et al.*, 2019).

Neste contexto, os retardantes de chama e outros compostos, representam uma séria ameaça à saúde humana e ambiental, em razão de suas propriedades de toxicidade,



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

bioacumulação e persistência. A maioria desses contaminantes é composta por POPs, que permanecem inalterados por longos períodos, dispersam-se amplamente no ambiente e acumulam-se nos organismos vivos, amplificando ao longo da cadeia alimentar (UNEP, 2025).

Os POPs e os retardantes de chama estão associados a uma ampla gama de efeitos adversos à saúde de animais e seres humanos, incluindo carcinogenicidade, mutagenicidade e efeitos reprodutivos (UNEP, 2025). Evidências científicas apontam ainda para distúrbios endócrinos e tireoidianos, imunotoxicidade, efeitos no desenvolvimento fetal e infantil, neurotoxicidade e câncer (Shaw *et al.*, 2010). Especificamente, o PFOS é reconhecido por sua toxicidade crônica, potencial carcinogênico e alta periculosidade para organismos aquáticos, agravados por sua persistência e distribuição global (EMSA, 2016).

A exposição aos POPs pode ocorrer pela ingestão de alimentos e água contaminados, bem como pelo contato direto com produtos químicos que os contenham. Esse contato representa um risco tanto para humanos quanto para animais, afetando especialmente grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas imunocomprometidas, além de adultos em idade reprodutiva. A transferência de contaminantes também pode ocorrer de mães para filhos, por meio da placenta e do leite materno (EPA, 2025).

Mesmo quando liberados em baixas concentrações, os POPs podem provocar impactos ambientais significativos, devido ao seu potencial de biomagnificação ao longo da cadeia trófica. Esses compostos alcançam rios e oceanos por meio de efluentes industriais, chuva contaminada e escoamento superficial do solo. Como são pouco solúveis em água, tendem a se acumular em sedimentos, que funcionam como reservatórios naturais dessas substâncias. Quando os sedimentos são remobilizados, os contaminantes podem retornar à coluna d'água e reingressar na cadeia alimentar (EPA, 2025).

Além disso, outra classe de compostos presente em embarcações, os CFCs, apresenta um risco ambiental distinto, relacionado à destruição da camada de ozônio. Esses compostos são altamente estáveis e persistentes, podendo permanecer na atmosfera por séculos. Ao atingirem a estratosfera, sofrem degradação pela radiação solar, liberando átomos de



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

cloro, que participam de reações fotoquímicas em cadeia responsáveis pela destruição das moléculas de ozônio (Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).

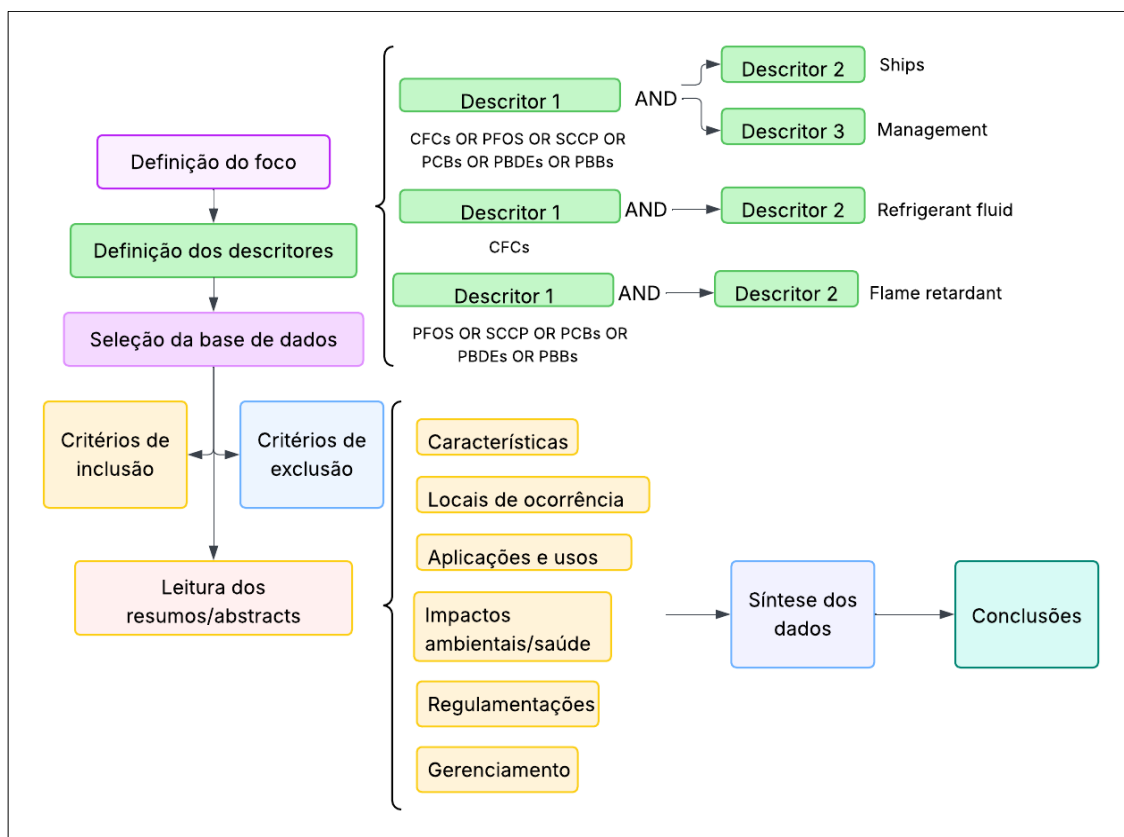
A camada de ozônio desempenha um papel essencial como filtro natural contra a radiação ultravioleta UV nociva. A destruição dessa camada intensifica a incidência de radiação UV na superfície terrestre, ocasionando efeitos adversos à saúde humana, como danos oculares, supressão do sistema imunológico e aumento do risco de câncer de pele. Também se observam impactos negativos em ecossistemas sensíveis, como os ecossistemas marinhos e agrícolas, que sofrem alterações em suas cadeias tróficas e produtividade primária (MMA, 2014).

Diante dos riscos ambientais e à saúde humana associados à presença de substâncias tóxicas em embarcações, torna-se imprescindível aprofundar o conhecimento sobre seus impactos e desenvolver estratégias eficazes de mitigação e gerenciamento, voltadas à reciclagem segura e ambientalmente responsável no setor marítimo.

3. MÉTODO

O estudo foi conduzido por meio de uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório, voltada à investigação da caracterização de compostos químicos orgânicos presentes em formulações de retardantes de chama e fluidos refrigerantes presentes em embarcações, bem como dos riscos ambientais e à saúde associados ao seu uso e durante a etapa de reciclagem. A Figura 1 apresenta as etapas da pesquisa.

Figura 1 - Metodologia da pesquisa



Fonte: Autoria própria (2025).

Para a realização da pesquisa foi utilizada a base de dados ScienceDirect (<https://www.webofscience.com/>). Os descritores usados foram: CFCs, PFOS, PCBs, PBBs, PBDEs, SCCPs, management, flame retardant, fluid refrigerant. Devido ao grande número de artigos, aplicou-se o operador booleano (AND) para refinar a busca permitindo combinar termos relacionados e ampliar a abrangência dos resultados conforme o propósito da pesquisa.

Os critérios de inclusão priorizaram publicações a partir do ano 2000, com exceção de referências clássicas ou normativas anteriores de reconhecida relevância. Foram considerados artigos científicos, relatórios técnicos, documentos de agências regulatórias e legislações internacionais relevantes, como a Convenção de Estocolmo e o Protocolo de Montreal. Por sua vez, os critérios de exclusão abrangeram artigos publicados antes de

2000 que não se enquadrassem como obras de referência, bem como trabalhos sem relação direta com o escopo e os objetivos da pesquisa.

Os resultados foram inicialmente analisados quanto à pertinência temática, a partir da avaliação dos títulos e resumos, com o intuito de eliminar fontes pouco relevantes e priorizar aquelas mais alinhadas aos objetivos do estudo. Em seguida, procedeu-se à leitura integral das referências selecionadas. A partir do conjunto de materiais analisados, a análise concentrou-se na identificação e discussão dos impactos ambientais e à saúde humana aplicados aos compostos orgânicos de interesse, com ênfase nos retardantes de chama e fluidos refrigerantes presentes em embarcações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta a síntese dos resultados obtidos na revisão bibliográfica exploratória, organizados em torno dos principais compostos orgânicos presentes em embarcações, de seus impactos ambientais e à saúde, e, sobretudo das práticas de gerenciamento e mitigação de riscos, em consonância com o objetivo central deste trabalho.

4.1 Caracterização e ocorrência dos compostos orgânicos em embarcações

A revisão bibliográfica, aliada à análise da literatura e das diretrizes internacionais, evidenciou a relevância do gerenciamento adequado de compostos orgânicos, especialmente dos poluentes orgânicos persistentes (POPs) presentes em retardantes de chama, devido à sua alta estabilidade, persistência ambiental e toxicidade, conforme as diretrizes Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) (UNEP, 2025).

Além dos POPs, os gases refrigerantes, derivados de CFCs, HCFCs e HFCs, ainda são amplamente encontrados em embarcações, onde são utilizados em sistemas de ar-condicionado e refrigeração representando riscos ambientais significativos (Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).

Com a busca realizada, constatou-se que a principal dificuldade identificada pela literatura reside na determinação da concentração desses compostos orgânicos. A incerteza quanto à composição, que requer uma análise laboratorial (EPA, 2025), reforça



a necessidade de um sistema de gestão rigoroso, sobretudo diante do processo de desmantelamento e reciclagem de embarcações, que demanda análise de risco caso a caso (Du *et al.*, 2018).

4.2 A estrutura regulatória e a mitigação de riscos

A gestão eficaz desses compostos orgânicos é indissociável das normas e convenções nacionais e internacionais, que fornecem a base regulatória para as práticas de mitigação de riscos. A convenção de Estocolmo, em conjunto com o monitoramento global conduzido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP/PNUMA), estabelece diretrizes fundamentais para o controle e a eliminação de poluentes persistentes e mitigação de riscos (UNEP, 2025).

O monitoramento global promovido pela UNEP evidencia que esses compostos estão amplamente distribuídos em diferentes matrizes, incluindo ar, água, sedimentos, peixes e leite humano, o que comprova sua ampla dispersão global e os riscos à saúde humana e aos ecossistemas (UNEP, 2025).

A Convenção de Estocolmo orienta os países signatários a desenvolver estratégias nacionais para identificar e gerenciar os POPs, abrangendo estoques, produtos e resíduos contaminados. Também recomenda a identificação de locais poluídos e o manejo ambientalmente seguro dos resíduos, por meio de técnicas adequadas de destruição e descarte. No setor industrial, especialmente em plantas químicas e instalações que utilizam ou produzem retardantes de chama, a gestão correta desses resíduos é fundamental para prevenir riscos à saúde humana e ao meio ambiente, em conformidade com as diretrizes internacionais (EPA, 2025).

No contexto brasileiro, o Plano Nacional de Eliminação de CFCs (PNC), aprovado em 2002 no âmbito do Protocolo de Montreal, representou um marco no compromisso do país em eliminar o consumo de clorofluorcarbonos (CFCs). O PNC priorizou o banimento progressivo dessas substâncias e o gerenciamento do passivo existente, por meio da instalação de centrais de regeneração e unidades de reciclagem, além da capacitação técnica de profissionais do setor (MMA, 2014).

4.3 Fluxo de gerenciamento e práticas de mitigação na reciclagem naval

Os resultados obtidos na revisão bibliográfica exploratória permitem delinear o fluxo de gerenciamento de resíduos perigosos, destacando as principais práticas e medidas de mitigação adotadas durante o processo de reciclagem de embarcações.

4.3.1 Elaboração e manutenção do Inventário de Materiais Perigosos (IHM)

O processo de gerenciamento inicia-se com a elaboração do Inventário de Materiais Perigosos (IHM), cuja estrutura difere ligeiramente entre embarcações novas e existentes. O IHM deve ser mantido e atualizado continuamente ao longo da vida operacional da embarcação, refletindo novas instalações que contenham quaisquer materiais perigosos (MP) listados no Anexo II do Regulamento Europeu, bem como alterações relevantes na estrutura ou nos equipamentos (EMSA, 2016).

A elaboração do IHM constitui o principal mecanismo de mitigação na fase de planejamento. Ao registrar o local, a quantidade e o tipo do material, o inventário permite a definição de procedimentos adequados de remoção e descarte, os quais, segundo estudos de campo, reduzem significativamente os riscos ocupacionais e ambientais (Du *et al.*, 2018).

4.3.2 Gerenciamento específico de retardantes de chamas e fluidos refrigerantes

A gestão de resíduos contendo poluentes orgânicos persistentes (POPs) é uma prioridade, pois esses compostos podem atuar como fontes secundárias de emissão, contribuindo para a formação de áreas contaminadas. Ademais, um gerenciamento inadequado pode resultar na geração de novos POPs, razão pela qual é fundamental que o tratamento e a disposição desses resíduos ocorram de maneira ambientalmente segura (MMA, 2023).

Para os POPs sólidos, a segregação controlada é a prática essencial. Os materiais suspeitos ou confirmados (como espumas e plásticos com retardantes) devem ser isolados, rotulados e armazenados temporariamente em áreas controladas, em conformidade com as Diretrizes Técnicas da Convenção da Basileia (UNEP, 2017). Essa exigência decorre da persistência e bioacumulação dos compostos halogenados, configurando requisito

técnico para evitar a contaminação cruzada e a transferência acidental de contaminantes para frações recicladas (Lin *et al.*, 2022; Lucas *et al.*, 2018). A padronização dessas rotinas em instalações de reciclagem aumenta a rastreabilidade e a conformidade documental (Du *et al.*, 2018).

No caso de fluidos refrigerantes, a gestão adequada durante a reciclagem de embarcações é essencial e requer técnicas de recolhimento, reciclagem e regeneração, de modo a evitar emissões atmosféricas (Frota; Vasconcelos, 2019; Manahan, 2013).

A prioridade do gerenciamento das substâncias que destroem a camada de ozônio (ODS) é a sua remoção segura e tratamento especializado (reciclagem ou regeneração). O recolhimento controlado constitui uma medida direta de mitigação de emissões, além de fomentar a reutilização do fluido e reduzir a demanda por produtos virgens, contribuindo para a diminuição do consumo nacional de ODS. Essa abordagem integrada, que compreende identificação, remoção, armazenamento, transporte e destinação final, é a única capaz de minimizar os riscos ambientais (BRASIL, 2012).

A etapa de destinação final representa a barreira definitiva contra a reintrodução de contaminantes. Para os POPs sólidos, a legislação europeia e as diretrizes da Convenção da Basileia determinam que resíduos acima dos limites de concentração não sejam reciclados. Nesses casos, a mitigação final requer a destruição térmica de alta eficiência ou a transformação irreversível, de acordo com as Melhores Técnicas Disponíveis (BAT) e as Melhores Práticas Ambientais (BEP). Tecnologias como incineração em alta temperatura ou coprocessamento asseguram a degradação das moléculas halogenadas, encerrando o ciclo de gestão com máxima segurança ocupacional e proteção ambiental (UNEP, 2016).

Para os fluidos refrigerantes (ODS), o foco da destinação final é a purificação e o reuso, por meio de centrais de regeneração que possibilitam o retorno da substância ao mercado com alto grau de pureza. Quando a regeneração não é viável, impõe-se a destruição controlada, realizada por incineração em alta temperatura em instalações licenciadas e especializadas para a destruição de ozônio. Esta gestão de dupla via conclui o ciclo,



conciliando segurança ocupacional, proteção ambiental e conformidade normativa (BRASIL, 2012).

Em síntese, a análise da literatura demonstrou que a gestão dos compostos orgânicos em embarcações, sejam eles POPs ou ODS, transcende a mera identificação e se configura como um fluxo operacional complexo, regido por regulamentações internacionais e nacionais. Desde a fase de inventário (IHM) e a segregação controlada até a destinação final, cada etapa representa uma ação direta de mitigação de riscos. A sistematização deste fluxo de gerenciamento, ao elucidar as práticas para controle dos compostos e a prevenção de liberação de contaminantes, fornece o panorama necessário para compreender os desafios e formular estratégias eficazes voltadas à proteção ambiental e à saúde humana na reciclagem de embarcações navais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo alcançou seu objetivo ao realizar uma revisão bibliográfica de caráter exploratório voltada à análise dos impactos dos compostos orgânicos presentes em retardantes de chama e fluidos refrigerantes de embarcações, bem como à sistematização das medidas de mitigação de riscos associados à sua liberação e exposição. A análise demonstrou que o gerenciamento desses materiais durante o desmantelamento e reciclagem naval apresenta alta complexidade técnica e de relevância ambiental.

Verificou-se ainda que a estrutura regulatória aplicável envolvendo tanto a Convenção de Estocolmo, voltada para POPs persistentes e tóxicos, quanto o Protocolo de Montreal, que trata de substâncias que destroem a camada de ozônio (ODS). Essa convergência normativa é essencial para orientar as ações setoriais e assegurar práticas de gestão ambientalmente seguras e integradas.

Os achados demonstram que a mitigação de riscos é implementada por meio de um fluxo operacional composto por três etapas principais. O gerenciamento inicia-se com a identificação e o planejamento, por meio do Inventário de Materiais Perigosos (IHM). Na sequência, as ações de contenção diferenciam-se conforme o tipo de composto: enquanto



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

os POPs sólidos requerem segregação e o armazenamento controlado para evitar contaminação cruzada, os fluidos refrigerantes (ODS) exigem recolhimento ativo, a fim de prevenir emissões atmosféricas.

A etapa final, referente à destinação final dos resíduos, constitui a garantia última de segurança: para POPs em concentrações acima dos limites permitidos, aplica-se a destruição térmica ou transformação irreversível, já para os ODS, a prioridade é regeneração e o reuso, sendo a destruição controlada reservada aos casos sem que o fluido não pode ser purificado.

Conclui-se que a adesão rigorosa às práticas regulatórias e operacionais é a única via eficaz para proteger a saúde ocupacional dos trabalhadores e prevenir a contaminação dos ecossistemas. A gestão eficiente desses compostos transforma o desafio do fim de vida útil das embarcações em uma oportunidade concreta de cumprimento das obrigações ambientais internacionais legais e de avançar rumo a uma economia circular ambientalmente segura e sustentável.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico pelo apoio fornecido ao longo deste trabalho.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

REFERÊNCIAS

BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

BAYEN, S.; OBBARD, J. P.; THOMAS, G. O. Chlorinated paraffins: A review of analysis and environmental occurrence. **Environment International**, Reino Unido, v. 32, n. 7, p. 915–929, 2006.

BOLAJI, B. O.; HUAN, Z. Ozone depletion and global warming: Case for the use of natural refrigerant – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Reino Unido, v. 18, p. 49–54, 2013.

BRASIL. **Plano Nacional de Eliminação de CFCs - PNC**, 2012. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/protecao-da-camada-de-ozonio/acoes-brasileiras-para-protecao-da-camada-de-ozonio/plano-nacional-de-elimina%C3%A7%C3%A3o-de-cfcs-pnc>. Acesso em: 23 out. 2025.

BRASIL. **Plano Nacional de Implementação do Brasil para a Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e da Mudança do Clima (MMA), 2023.

CAMINO, G.; COSTA, L. Thermal degradation of a highly chlorinated paraffin used as a fire retardant additive for polymers. **Polymer Degradation and Stability**, Holanda, v. 2, n. 1, p. 23–33, 1980.

ČULIN, J.; BIELIĆ, T. Ship-source pollution by polychlorinated biphenyls and brominated flame retardants. **Scientific Journal of Maritime Research**, Croácia, v. 29, n. 1, p. 75-79, 2015.

DU, Z. *et al.* Hazardous materials analysis and disposal procedures during ship recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, Países Baixos, v. 131, p. 158–171, 2018.

EMSA. European Maritime Safety Agency. **EMSA's Best Practice Guidance on the Inventory of Hazardous Materials**, 2016. Disponível em: <https://www.emsa.europa.eu/we-do/sustainability/environment/150-ship-recycling/2874-emsa-s-best-practice-guidance-on-the-inventory-of-hazardous-materials.html>. Acesso em: 13 out. 2025.

ENVIRONMENT, U. N. **Flame Retardants | UNEP - UN Environment Programme**. 2017. Disponível em: <https://www.unep.org/flame-retardants>. Acesso em: 23 out. 2025.

EPA. Environmental Protection Agency. **Persistent Organic Pollutants: A Global Issue, A Global Response**, 2014. Overviews and Factsheets. Disponível em: <https://www.epa.gov/international-cooperation/persistent-organic-pollutants-global-issue-global-response>. Acesso em: 21 out. 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

EPA. **Persistent Organic Pollutants: A Global Issue, A Global Response** | US EPA. 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/international-cooperation/persistent-organic-pollutants-global-issue-global-response>. Acesso em: 23 out. 2025.

FEITEIRO, J.; MARIANA, M.; CAIRRÃO, E. Health toxicity effects of brominated flame retardants: From environmental to human exposure. **Environmental Pollution**, Reino Unido, v. 285, p. 117475, 2021.

FENG, J. *et al.* Rethinking the pathway to sustainable fire retardants. **Exploration**, Hoboken (EUA), v. 3, n. 4, p. 20220088, 2023.

FROTA, E. B.; VASCONCELOS, N. M. S. de. **Química Ambiental**. Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/559748>. Acesso em: 15 set. 2024.

GLÜGE, J. *et al.* Calculation of Physicochemical Properties for Short- and Medium-Chain Chlorinated Paraffins. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, Melville (EUA), v. 42, n. 2, p. 023103, 2013.

GLÜGE, J. *et al.* Global production, use, and emission volumes of short-chain chlorinated paraffins – A minimum scenario. **Science of The Total Environment**, Holanda, v. 573, p. 1132–1146, 2016.

IBRAHIM, O. A. A.-M. *et al.* Review of hydrocarbon refrigerants as drop-in alternatives to high-GWP refrigerants in VCR systems: The case of R290. **Cleaner Engineering and Technology**, Reino Unido, v. 23, p. 100825, 2024.

IMO. International Maritime Organization. **Resolution MEPC.379(80)**. 2023 Guidelines for the development of the Inventory of Hazardous Materials. 7 jul. 2023.

IPCS. International Programme on Chemical Safety. **Flame retardants (Environmental Health Criteria – EHC 192)**, Geneva: World Health Organization. 1997. Disponível em: <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc192.htm>. Acesso em: 23 out. 2025.

JAIN, K. P.; PRUYN, J. An Overview of the Global Ship Recycling Industry. *In*: HASHMI, S.; CHOUDHURY, I. A. (org.). **Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials**. Oxford: Elsevier, 2017. p. 626–647.

KUTARNA, S. *et al.* Widespread presence of chlorinated paraffins in consumer products. **Environmental Science: Processes & Impacts**, Reino Unido, v. 25, n. 5, p. 893–900, 2023.

LASSEN, C. *et al.* **Survey of shortchain and mediumchain chlorinated paraffins**. Dinamarca: The Danish Environmental Protection Agency, 2014. Disponível em: <https://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2014/11/978-87-93283-19-0.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

- LIN, L. *et al.* Hazardous waste from the global shipbreaking industry: Historical inventory and future pathways. **Global Environmental Change**, Holanda, v. 76, p. 102581, 2022.
- LUCAS, D. *et al.* Methods of Responsibly Managing End-of-Life Foams and Plastics Containing Flame Retardants: Part I. **Environmental Engineering Science**, New Rochelle (EUA), v. 35, n. 6, p. 573–587, 2018.
- MANAHAN, S. E. **Química Ambiental**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- MCGRATH, T. J. *et al.* Short- and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Polyvinylchloride and Rubber Consumer Products and Toys Purchased on the Belgian Market. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basileia, Suíça, v. 18, n. 3, p. 1069, 2021.
- MILIOS, L. *et al.* Sailing towards a circular economy: Conditions for increased reuse and remanufacturing in the Scandinavian maritime sector. **Journal of Cleaner Production**, Holanda, v. 225, p. 227–235, 2019.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Ações brasileiras para a proteção da camada de ozônio**, 2014. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/ozonio/protecao_camada_ozonio_acoes_brasileiras.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Brasil atualiza plano para redução e eliminação de Poluentes Orgânicos Persistentes**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/brasil-atualiza-plano-de-implementacao-da-convencao-de-estocolmo-sobre-poluente-organicos-persistentes>. Acesso em: 23 out. 2025.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Plano Nacional de Implementação do Brasil para a Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/brasil-atualiza-plano-de-implementacao-da-convencao-de-estocolmo-sobre-poluente-organicos-persistentes/atualizacao-do-plano-nacional-de-implementacao-da-convencao-de-estocolmo-sobre-pops.pdf>. Acesso em: 16 out. 2025.
- NEVONDO, V.; OKONKWO, O. J. Status of short-chain chlorinated paraffins in matrices and research gap priorities in Africa: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Alemanha, v. 28, n. 38, p. 52844–52861, 2021.
- NIH. National Institutes of Health. **Flame Retardants**. Bethesda, Maryland, 2023. Disponível em: https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/flame_retardants. Acesso em: 23 out. 2025.
- PELLIZZATO, F. *et al.* Analysis of short-chain chlorinated paraffins: a discussion paper. **Journal of Environmental Monitoring**, Reino Unido, v. 9, n. 9, p. 924–930, 2007.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

PENTEADO, J. C. P.; VAZ, J. M. O legado das bifenilas policloradas (PCBs). **Química Nova**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 390–398, 2001.

PIERONI, M. C.; LEONEL, J.; FILLMANN, G. Retardantes de chama bromados: uma revisão. **Química Nova**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 317–326, 2016.

RETARDANTES DE CHAMA – ABICHAMA. *In*: 2023. Disponível em: <http://www.abichama.com.br/retardantes-de-chama/>. Acesso em: 21 out. 2025.

ROTANDER, A. *et al.* Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefighters exposed to aqueous film forming foam (AFFF). **Environment International**, Reino Unido, v. 82, p. 28–34, 2015.

SHAW, S. D. *et al.* Halogenated flame retardants: do the fire safety benefits justify the risks?. **Reviews on Environmental Health**, Alemanha, v. 25, n. 4, p. 261–305, 2010.

SOUTH, L. *et al.* Medium- and long-chain chlorinated paraffins in air: A review of levels, physicochemical properties, and analytical considerations. **Science of The Total Environment**, Países Baixos, v. 843, p. 157094, 2022.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração industrial**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2002.

TROIJSCH, J., H. **Fire and Fire Safety, Markets and Applications, Mode of Action Main Families, Role in Fire Gases and Residues**, 1998. Disponível em: http://aerofiltri.it/DC_pdf/AS_A_OoFR.pdf. Acesso em: 15 out. 2025.

TROIJSCH, J. **Plastics flammability handbook: principles, regulations, testing, and approval**. 3. ed. Munich: Hanser, 2004.

UNEP. United Nations Environment Programme. **eCourse - Guidance on preparing inventories of short-chain chlorinated paraffins (SCCPs) | UNEP - UN Environment Programme**, 2023.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Guidance on alternatives to Short Chain Chlorinated Paraffins (SCCPs)**, 2021.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Guidance on best available techniques and best environmental practices for the use of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and related chemicals listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants**, 2012.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its twelfth meeting**, 2016.

UNEP. United Nations Environment Programme. **Retardantes de Chamas. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA -**, 2025.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia
de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

VAN MOURIK, L. M. *et al.* Chlorinated paraffins in the environment: A review on their production, fate, levels and trends between 2010 and 2015. **Chemosphere**, Reino Unido, v. 155, p. 415–428, 2016.

VAN MOURIK, L. M. *et al.* Developments and interlaboratory study of the analysis of short-chain chlorinated paraffins. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, Holanda, v. 102, p. 32–40, 2018.