



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

RAFAEL CARDOSO

**RETARDANTES DE CHAMAS BROMADOS EM EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS:
propriedades, impactos ambientais e legislação**

Sorocaba

2026

RAFAEL CARDOSO

**RETARDANTES DE CHAMAS BROMADOS EM EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS: PROPRIEDADES, IMPACTOS AMBIENTAIS E
LEGISLAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba,
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Bacharel(a) em Engenharia
Ambiental.

Orientador(a): Profº Dr. André Henrique Rosa

Sorocaba

2026

C268r Cardoso, Rafael
Retardantes de chamas bromados em equipamentos eletroeletrônicos : propriedades, impactos ambientais e legislação / Rafael Cardoso. -- Sorocaba, 2026
28 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: André Henrique Rosa

1. Retardantes de combustão. 2. Resíduos. 3. Poluentes. 4. Impacto ambiental. 5. Toxicologia. I. Título.

RAFAEL CARDOSO

**RETARDANTES DE CHAMAS BROMADOS EM EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS:**

propriedades, impactos ambientais e legislação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 02/06/2026

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 02 de junho de 2026.

A todos aqueles que me apoiaram durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que somaram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Primeiramente, agradeço à minha família pelo apoio incondicional e carinho constante ao longo dessa jornada, sendo sempre minha base e motivação. Ao meu orientador, professor André, pela parceria, paciência e pelos ensinamentos preciosos que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial para a construção deste projeto e sou extremamente grato pela dedicação e comprometimento. Agradeço também à UNESP de Sorocaba pela excelente estrutura acadêmica e pelos professores que, ao longo do curso, desempenharam um papel crucial na minha formação. Também agradeço ao CNPQ (Bolsa PIBIC) e a Fapesp, pelas bolsas disponibilizadas para as pesquisas ao longo da graduação.

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

(Artigo 225 da Constituição Federal de 1988)

RESUMO

Devido aos avanços tecnológicos e ao aumento da demanda por equipamentos eletroeletrônicos, ocorreu uma intensificação na geração de resíduos, aumentando a preocupação com as substâncias perigosas presentes nesses materiais, como os retardantes de chama bromados (BFRs). Esses compostos são importantes para reduzir a inflamabilidade de materiais poliméricos, no entanto, apresentam alta persistência ambiental, potencial de bioacumulação e riscos à saúde humana. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre o uso, a ocorrência e os impactos ambientais e toxicológicos dos BFRs em equipamentos elétricos e eletrônicos. Também foram abordados os principais tipos de retardantes bromados, seus mecanismos de ação, vias de liberação no meio ambiente e efeitos adversos associados à exposição humana e ecológica. Ademais, foram discutidos aspectos relacionados à segurança contra incêndio, alternativas menos tóxicas (como retardantes de chama à base de fósforo e silício) e as principais regulamentações nacionais e internacionais aplicáveis. Observou-se que, apesar dos avanços regulatórios e da substituição progressiva desses compostos, os desafios persistem, principalmente em relação à eficácia das alternativas e ao gerenciamento adequado de resíduos contaminados. Conclui-se que a mitigação dos impactos dos retardantes de chama bromados depende da integração da inovação tecnológica, de políticas públicas preventivas e de estratégias como o ecodesign e a melhoria dos sistemas de reciclagem, visando reduzir a presença dessas substâncias ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos.

Palavras-chave: retardantes de chama bromados; resíduos eletroeletrônicos; poluentes orgânicos persistentes; impacto ambiental; toxicidade.

ABSTRACT

Due to technological advancements and the increased demand for electronic and electrical equipment, there has been an intensification in waste generation, raising concerns about hazardous substances present in these materials, such as brominated flame retardants (BFRs). These compounds are important for reducing the flammability of polymeric materials; however, they exhibit high environmental persistence, bioaccumulation potential, and risks to human health. In this context, the present study aimed to conduct a literature review on the use, occurrence, and environmental and toxicological impacts of BFRs in electrical and electronic equipment. Therefore, the main types of brominated flame retardants, their mechanisms of action, release pathways into the environment, and adverse effects associated with human and ecological exposure were addressed. Furthermore, aspects related to fire safety, less toxic alternatives (such as phosphorus- and silicon-based flame retardants), and the main applicable national and international regulations were discussed. It was observed that, despite regulatory advances and the progressive replacement of these compounds, challenges persist, mainly regarding the effectiveness of alternatives and the proper management of contaminated waste. It is concluded that mitigating the impacts of brominated flame retardants depends on the integration of technological innovation, preventive public policies, and strategies such as ecodesign and improved recycling systems, aiming to reduce the presence of these substances throughout the entire product lifecycle.

Keywords: brominated flame retardants; electronic waste; persistent organic pollutants; environmental impact; toxicity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura molecular de PBBs.	14
Figura 2 - Estrutura molecular de HBCDD	14
Figura 3 – Estrutura molecular de TBBPA.....	15
Figura 4 – Estrutura molecular de deca-BDEs comerciais	16

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BFRs	Brominated Flame Retardants (Retardantes de Chamas Bromados)
BTBPE	Bis(2,4,6-tribromofenoxi)etano
DBDPE	Decabromodifeniletano
EEE	Equipamentos Elétricos Eletrônicos
HBCDDs	Hexabromociclododecanos
Log K _{ow}	Logaritmo do Coeficiente de Partição Octanol-Água
NFPA	National Fire Protection Association
PBDEs	Éteres Difenílicos Polibromados
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
TBBPA	Tetrabromobisfenol A

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Tipos de retardantes de chamas bromados	13
2.2	Impactos ambientais e à saúde humana do uso de retardantes bromados	16
2.3	Retardantes bromados na segurança dos equipamentos	18
2.4	Alternativas menos tóxicas aos retardantes de chamas bromados	19
2.5	Regulamentações vigentes sobre o uso de retardantes de chama	21
2.6	Tendências futuras	22
3	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25

1. INTRODUÇÃO

É indiscutível a importância dos equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) na vida cotidiana do ser humano contemporâneo - como computadores, celulares, eletrodomésticos, entre outros -, sendo eles essenciais para facilitar e otimizar as atividades diárias. Estes equipamentos possuem grande presença nas residências do mundo inteiro, impulsionada pela expansão tecnológica e pela dependência crescente de dispositivos digitais. Consequentemente, o consumo global de EEE tem aumentado de forma significativa, contribuindo para a geração de grandes quantidades de resíduos, fenômeno intensificado pela curta vida útil desses produtos, pelas rápidas inovações tecnológicas e pelas limitações de reparo e reutilização (AHIRWAR; TRIPATHI, 2021). Tal cenário resulta em desafios ambientais relevantes, uma vez que esses resíduos frequentemente contêm substâncias perigosas que requerem manejo adequado.

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) são classificados como resíduos perigosos devido à presença de substâncias tóxicas em sua composição e ao elevado potencial de contaminação ambiental. Dessa forma, tornam-se essenciais o tratamento e a destinação adequados desses materiais, de modo a promover um gerenciamento sustentável e minimizar os riscos que podem representar ao meio ambiente e à saúde humana (CHAINED et al., 2022). Além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, atribui a fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes a responsabilidade de implementar a logística reversa dos produtos eletroeletrônicos, garantindo opções de coleta e descarte apropriado para os resíduos gerados.

Em relação ao potencial de contaminação ambiental, podemos citar os retardantes de chama bromados ou Brominated Flame Retardants (BFRs, na sigla em inglês), os quais constituem um grupo extenso de compostos químicos amplamente empregados em diferentes tipos de materiais, principalmente em plásticos, equipamentos eletrônicos, têxteis e espumas (AMAP, 2021).

Sua principal função é reduzir a inflamabilidade desses produtos, interferindo nos processos químicos da combustão e dificultando a propagação do fogo. Além de aumentar a resistência térmica desses materiais, os BFRs apresentam elevada estabilidade química, o que os torna duráveis e resistentes à degradação natural - física, química e biológica -,

permitindo sua distribuição e transporte a grandes distâncias e em distintos ambientes do planeta (WYPYCH, 2021).

Vários BFRs, especialmente alguns congêneres dos éteres difenílicos polibromados (PBDEs) e o hexabromociclododecanos (HBCDDs), têm sido relacionados a potenciais efeitos negativos à saúde humana e ao ambiente. Durante a década de 1990, observou-se um aumento significativo no consumo global dos principais BFRs, como penta-, octa- e decaBDE, tetrabromobisfenol A (TBBPA) e HBCDD, cujo uso dobrou nesse período (MORF *et al.*, 2005).

Assim, visando evitar uma proliferação cada vez maior desses contaminantes, foram estabelecidas algumas metas de controle no uso dos mesmos. Na União Europeia, os limites de concentração para os BDEs foram estabelecidos em distintas diretivas que regulam seu uso. A Diretiva 2003/11/CE, de 6 de fevereiro de 2003, limita e proíbe a utilização dos penta-BDEs e octa-BDEs em inúmeros produtos. Posteriormente, a Diretiva 2003/53/CE, de 18 de junho de 2003, passou a restringir também os deca-BDEs, definindo valores máximos permitidos para esses compostos de forma a evitar impactos relevantes à saúde humana e ao meio ambiente (UNIÃO EUROPEIA, 2003). No Brasil, por outro lado, ainda não há uma legislação específica e abrangente que trate diretamente dos BDEs ou de outros retardantes de chama bromados, sendo utilizados como base apenas os limites e as diretrizes internacionais. Portanto, a compreensão da presença e dos impactos dos retardantes de chama bromados (BFRs) em equipamentos eletroeletrônicos é fundamental para subsidiar políticas públicas voltadas ao gerenciamento regular e eficiente dos resíduos tecnológicos, conduzir práticas mais seguras nos processos de reciclagem e apoiar estratégias de proteção à saúde humana. Levando em consideração a crescente geração de resíduos eletrônicos e as evidências de toxicidade associadas a esses compostos, torna-se indispensável reunir, analisar e discutir o conhecimento disponível na literatura científica.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a presença, o uso e os possíveis impactos ambientais e à saúde relacionados aos retardantes de chama bromados presentes em equipamentos eletroeletrônicos, além de analisar e discutir os estudos existentes sobre esse tema, incluindo seus efeitos documentados e as alternativas mais seguras atualmente disponíveis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os retardantes de chama bromados (BFRs) constituem um amplo grupo de compostos sintéticos utilizados principalmente para reduzir a inflamabilidade de materiais poliméricos. Esses aditivos são incorporados a plásticos, resinas e componentes industriais com o objetivo de inibir ou retardar o processo de combustão. Seu uso é especialmente comum no setor eletroeletrônico, onde integram carcaças plásticas, placas de circuito impresso, cabos, fios e materiais isolantes — elementos que, devido à sua natureza orgânica, apresentam elevada suscetibilidade à ignição (ENYOH *et al.*, 2024).

O mecanismo de atuação dos BFRs está diretamente relacionado à interrupção das reações que sustentam a combustão. Quando expostos ao calor, esses retardantes liberam átomos ou radicais de bromo que interagem com os radicais livres formados no início do processo de ignição, neutralizando-os. Esse sequestro de radicais interrompe a reação em cadeia responsável pela manutenção da queima, resultando na redução da intensidade do fogo e, muitas vezes, na sua completa interrupção (ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 2012).

2.1 Tipos de retardantes de chamas bromados

Entre os BFRs mais utilizados podemos citar os PBDEs, HBCDDs, TBBPA e bifenilos polibromados (PBBs - figura 1), bem como algumas misturas bromadas de uso específico, contendo cada grupo características químicas, usos e toxicidades distintas (EFSA, 2024).

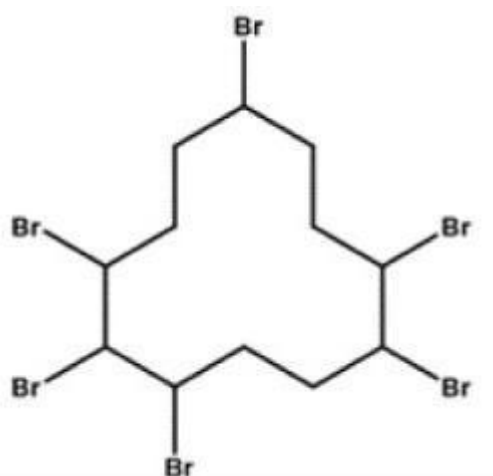
Figura 1 - Estrutura molecular de PBBs.



Fonte: JAGIĆ *et al.*, 2021.

O HBCDD (figura 2) é um retardante de chamas amplamente utilizado nas indústrias de polímeros e têxteis, com destaque para seu emprego em poliestireno destinado à fabricação de painéis e blocos isolantes para a construção civil. Esse composto pode alcançar o meio ambiente por meio da incineração, reciclagem ou descarte inadequado desses materiais em aterros sanitários (DARNEUD, 2003).

Figura 2 - Estrutura molecular de HBCDD.

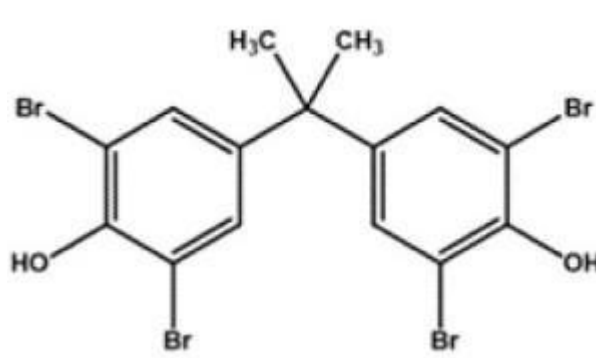


Fonte: JAGIĆ *et al.*, 2021.

Em paralelo, o TBBPA (figura 3) é muito usado em placas de circuito impresso e termoplásticos, primordialmente em televisores. Esse composto bromado, derivado do bisfenol A, atua interrompendo a combustão ao liberar átomos de bromo que reagem com radicais livres formados em altas temperaturas, reduzindo sua disponibilidade e evitando a propagação da chama. Graças à sua eficiência, o TBBPA tornou-se o retardante de chama

bromado mais amplamente empregado no setor eletroeletrônico, estando presente na maior parte desses produtos (DING *et al.*, 2025).

Figura 3 - Estrutura molecular de TBBPA.



Fonte: JAGIĆ *et al.*, 2021.

Seguindo a mesma lógica, os PBDEs (éteres difenilicos polibromados) são um tipo de BFRs comumente presente em resíduos plásticos provenientes de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Esses compostos são formados por duas estruturas aromáticas ligadas por um átomo de oxigênio, às quais podem se associar diferentes quantidades de átomos de bromo (Br). A quantidade de átomos de bromo determina a categoria do BDE e influencia diretamente sua toxicidade: quanto maior o número de átomos de Br, maior tende a ser seu potencial tóxico. De modo geral, são agrupados em penta-BDEs (cinco átomos de bromo), octa-BDEs (oito átomos) e deca-BDEs (POPs INT, 2021).

Figura 4 - Estrutura molecular de deca-BDEs comerciais.



Fonte: POPS INT, 2021.

2.2 Impactos ambientais e à saúde humana do uso de retardantes bromados

A compreensão dos processos de transporte dos retardantes de chama bromados (BFRs) e de seus subprodutos é essencial para prever seu comportamento ambiental e os possíveis riscos associados à sua dispersão. De modo geral, a liberação desses compostos no ambiente pode ocorrer por três vias predominantes: (i) emissão direta na forma de compostos voláteis; (ii) liberação gradual decorrente da degradação física ou química de produtos que os contêm; e (iii) transferência por contato direto de materiais tratados com BFRs para o solo, água ou ar. Além disso, destaca-se que os BFRs podem interagir com outros contaminantes emergentes, como metais, microplásticos e nanoplásticos, formando associações que modificam sua mobilidade, estabilidade e potencial de impacto ambiental, tornando seu destino e comportamento em ecossistemas ainda mais complexos (SUN *et al*, 2019).

Os retardantes de chama bromados podem ser detectados em diversos compartimentos ambientais, inclusive no solo, onde apresentam risco significativo à saúde humana. Sua presença nesse meio favorece a contaminação do sistema solo-agricultura, uma vez que esses compostos podem modificar as propriedades físico-químicas do solo, afetar a microbiota e ser absorvidos por plantas cultivadas. Como consequência, podem se acumular em tecidos vegetais destinados ao consumo, possibilitando sua transferência ao longo da cadeia alimentar e aumentando o risco de toxicidade, incluindo potencial carcinogenicidade (THUY *et al*, 2025).

Estudos toxicológicos reforçam essa preocupação ao evidenciarem que a exposição aos PBDEs interfere na regulação hormonal da tireoide, afeta a função reprodutiva masculina e, quando prolongada, se associa a efeitos adversos significativos. Entre os impactos relatados estão alterações no neurodesenvolvimento, desregulação endócrina e possível relação com o desenvolvimento de câncer (ERNEST *et al.*, 2012). Ademais, estudos indicam que o HBCDD pode ser absorvido pelo trato gastrointestinal, sendo a ingestão de alimentos apontada como uma das vias predominantes de exposição humana a esse composto (DARNEUD, 2003).

Adicionalmente, os BFRs apresentam características lipofílicas e hidrofóbicas, o que significa que tendem a se acumular em ambientes ricos em gordura e a repelir a água (HOUDE *et al.*, 2011). Essas propriedades favorecem sua permanência nos organismos vivos, possibilitando que se concentrem nos tecidos biológicos, como tecido adiposo, hepático, plasma sanguíneo, leite materno, tecido muscular, tecido cerebral, órgãos reprodutores (ovários e testículos) e tecido ósseo (ENYOH *et al.*, 2024). Como resultado, essas substâncias tendem a ter bioconcentração em indivíduos e sua biomagnificação ao longo da cadeia alimentar, atingindo níveis potencialmente tóxicos nos organismos de níveis tróficos superiores e impactando diretamente a fauna (HOUDE *et al.*, 2011).

A dificuldade de degradação dos retardantes de chama bromados (BFRs) é amplamente reconhecida pela literatura científica, sendo atribuída principalmente às características estruturais desses compostos. Os BFRs possuem alta estabilidade química e baixa reatividade frente a processos naturais de transformação, motivada pela presença dos anéis aromáticos fortemente halogenados. Essa estrutura altamente bromada reduz sua solubilidade em água e dificulta processos de oxidação, hidrólise e biodegradação, prolongando sua permanência em solos, sedimentos e ambientes aquáticos (ALAE *et al.*, 2003). Como resultado, esses contaminantes podem permanecer no ambiente durante longos períodos antes que processos ambientais ou antrópicos consigam degradá-los de maneira significativa.

Mesmo quando mecanismos naturais de degradação ocorrem - como fotodegradação superficial ou degradação microbiana em ambientes ricos em matéria orgânica - a transformação tende a ser lenta e muitas vezes incompleta. Estudos demonstram que, durante essas quebras, compostos altamente bromados podem gerar derivados parcialmente degradados que continuam persistentes e resistentes a processos biológicos, mantendo-se ambientalmente ativos (ENYOH *et al.*, 2024). Esse comportamento reforça o caráter

recalcitrante dos BFRs e sua classificação como poluentes orgânicos persistentes (POPs), justificando a preocupação científica e regulatória em torno de sua permanência no ambiente.

Os retardantes de chama bromados apresentam diferentes comportamentos ambientais, porém compartilham características estruturais que favorecem sua permanência no meio. Os PBDEs, por exemplo, são compostos hidrofóbicos, que apresentam baixa solubilidade em água e altos valores de $\log K_{ow}$, o que favorece sua afinidade por materiais orgânicos e sua fixação em sedimentos e tecidos biológicos (USEPA, 2010). De forma semelhante, o HBCDD é reconhecido como persistente e bioacumulativo, apresentando longa permanência ambiental e capacidade de dispersão através de diversos compartimentos, como ar, solo, água, vegetação, organismos animais e até fluidos biológicos humanos, a exemplo do leite materno (PAWAR *et al.*, 2016).

Outro composto amplamente empregado como retardante de chama é o TBBPA, cuja dinâmica ambiental difere parcialmente dos demais BFRs. Embora também seja persistente, uma parte significativa de sua estrutura encontra-se ligada covalentemente a polímeros - cerca de 90% - o que reduz o potencial de liberação direta para o ambiente quando comparado a retardantes utilizados como aditivos (COVACI *et al.*, 2011). Contudo, sob exposição à radiação UV, o TBBPA pode degradar-se formando subprodutos como bisfenol A, di- e tribromofenol e 2,4,6-tribromofenol, compostos que também geram preocupação ambiental devido à sua toxicidade e persistência. Já os PBBs, devido à alta volatilidade e insolubilidade em água, apresentam elevada estabilidade química, o que favorece sua persistência no ambiente e torna sua degradação natural mais difícil (PECK *et al.*, 2008).

2.3 Retardantes bromados na segurança dos equipamentos

Apesar da ausência de levantamentos nacionais que detalham exclusivamente incêndios originados em equipamentos eletroeletrônicos, dados do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo mostram que panes, aquecimento excessivo e defeitos em aparelhos elétricos figuram entre as causas frequentes de incêndios estruturais no estado (CBPMESP, 2023). Do mesmo modo, publicações internacionais amplamente referenciadas - como os relatórios da National Fire Protection Association (NFPA) - demonstram que eletrodomésticos e dispositivos eletrônicos estão envolvidos em uma parcela expressiva dos incêndios residenciais (NFPA, 2022).

Destarte, embora apresentem potenciais efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente, os retardantes de chama desempenham um papel fundamental na segurança dos

equipamentos eletroeletrônicos. Sua capacidade de reduzir a inflamabilidade dos materiais contribui para a prevenção de acidentes, ao evitar que pequenos focos de ignição evoluam para incêndios de maiores proporções, diminuindo riscos de ferimentos, mortes e perdas materiais. Essa importância se destaca especialmente porque os produtos eletrônicos possuem fontes internas de ignição, decorrentes de seus próprios componentes - como placas de circuito impresso, transformadores, baterias e conectores - os quais podem gerar calor e faíscas capazes de iniciar combustões (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, s.d.).

Ademais, os BFRs elevam significativamente a resistência térmica e o tempo de resposta à combustão dos materiais. Em eletroeletrônicos, como televisores, computadores e diversos dispositivos contendo carcaças plásticas tratadas com esses retardantes, essa característica pode retardar o avanço das chamas, proporcionando tempo adicional para evacuação, controle do foco inicial e redução de perdas estruturais em situações de incêndio (BSEF, 2012).

2.4 Alternativas menos tóxicas aos retardantes de chamas bromados

Os BFRs continuam sendo, em escala mundial, os aditivos mais utilizados na fabricação de dispositivos eletroeletrônicos, sobretudo pela sua elevada capacidade de reduzir a inflamabilidade de materiais poliméricos. Entre os compostos tradicionalmente empregados ainda destacam-se o TBBPA, amplamente incorporado a placas de circuito impresso; os PBDEs, especialmente as misturas técnicas penta-, octa- e deca-BDE; e o HBCD, historicamente aplicado em espumas e polímeros de alto desempenho (COVACI *et al.*, 2011). Mais recentemente, têm ganhado espaço os chamados BFRs emergentes, como o decabromodifeniletano (DBDPE) e o bis(2,4,6-tribromofenoxi)etano (BTBPE), desenvolvidos pela indústria como alternativas aos compostos sujeitos a restrições regulatórias (ZHANG *et al.*, 2025).

Entretanto, a permanência desses compostos no mercado tem diminuído de forma significativa em razão das restrições estabelecidas por normas internacionais e legislações específicas — entre elas a Convenção de Estocolmo, a diretiva europeia RoHS e diversas políticas regionais voltadas ao controle de substâncias perigosas. Esses marcos regulatórios passaram a classificar diversos BFRs, especialmente os PBDEs e o HBCD, como poluentes orgânicos persistentes, restringindo ou proibindo seu uso em diferentes aplicações (COVACI

et al., 2011). Dessa forma, embora ainda presentes em produtos em uso e em resíduos eletroeletrônicos, muitos desses retardantes têm sido gradualmente substituídos por alternativas consideradas menos tóxicas ou ambientalmente mais adequadas.

Diante das restrições impostas ao uso de retardantes halogenados, torna-se essencial a busca por substitutos que aliem bom desempenho técnico, menor toxicidade e maior sustentabilidade, sem comprometer a eficácia na proteção contra incêndios. Nesse contexto, diversas alternativas têm ganhado destaque, entre elas os retardantes à base de fósforo, os compostos contendo silício e os retardantes de origem biológica, cada qual apresentando particularidades quanto à eficiência, custo e impacto ambiental.

Os retardantes de chama à base de fósforo — como fosfatos orgânicos, fosfonatos, polifosfatos e sistemas intumescentes — destacam-se por sua versatilidade e pela capacidade de atuar tanto na fase condensada quanto na gasosa. Esses aditivos favorecem a formação de uma camada carbonizada que protege o material polimérico e, simultaneamente, liberam radicais $\text{PO}\cdot$ capazes de competir com os radicais envolvidos nas reações de combustão (ZHANG *et al.*, 2022). Entre seus principais benefícios estão a maior estabilidade térmica, a menor persistência ambiental e o reduzido potencial de bioacumulação quando comparados aos BFRs. Contudo, algumas limitações são registradas: certos compostos organofosforados apresentam tendência à migração da matriz polimérica, além de possuírem custo mais elevado ou promoverem alterações em propriedades mecânicas do polímero, dependendo da formulação empregada (SINGH *et al.*, 2024).

Os retardantes à base de silício — incluindo silicones, siloxanos, sílica e diferentes compósitos silícicos — apresentam ação principalmente na fase condensada, promovendo a formação de barreiras cerâmicas estáveis que dificultam a transferência de calor, reduzem a liberação de fumaça e aumentam significativamente a resistência térmica dos materiais poliméricos. Esses compostos também se destacam pela baixa toxicidade e elevada estabilidade química. Entretanto, para atingir níveis de desempenho equivalentes aos obtidos com BFRs, muitas formulações exigem concentrações mais altas, o que pode elevar custos de produção ou afetar propriedades físico-mecânicas dos polímeros utilizados (TANG *et al.*, 2024).

As alternativas biobaseadas — como lignina quimicamente modificada, ácido fítico, taninos fosforilados e sistemas intumescentes produzidos a partir de biomassa — têm ganhado destaque como soluções mais sustentáveis. Esses materiais apresentam boa capacidade de formar camadas carbonizadas protetoras durante a combustão e são considerados menos agressivos ao ambiente (DOWBYSZ *et al.*, 2022). Apesar dessas vantagens, sua eficiência ainda tende a ser inferior à dos retardantes halogenados ou mesmo de alguns fosforados, exigindo adaptações estruturais, aditivos sinérgicos ou rotas de modificação avançadas para melhorar o desempenho. Além disso, muitos desses sistemas ainda se encontram em estágios de pesquisa ou desenvolvimento, e seus custos de produção permanecem relativamente altos, o que limita a adoção em escala industrial — especialmente no setor eletroeletrônico (SIENKIEWICZ *et al.*, 2021).

2.5 Regulamentações vigentes sobre o uso de retardantes de chama

As restrições internacionais impostas aos BFRs decorrem do crescente conjunto de evidências científicas que demonstram sua elevada persistência, toxicidade e ampla disseminação ambiental. No âmbito global, a Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes determina a eliminação ou o uso estritamente controlado de compostos como pentaBDE, octaBDE e HBCD, exigindo que os países signatários adotem mecanismos rígidos de gestão e redução de riscos associados a essas substâncias (UNEP, 2020). Esse marco regulatório internacional consolidou-se como um dos principais fatores responsáveis pela queda progressiva na produção e comércio de diversos BFRs.

A inclusão de diversos retardantes de chama bromados (BFRs) — como PBDEs, HBCDD e HBB — na lista de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) da Convenção de Estocolmo levou à adoção de severas restrições globais para esses compostos. Como tratado internacional, a Convenção exige que os países signatários implementem medidas legislativas e administrativas rigorosas para controlar, reduzir ou eliminar esses químicos de longo prazo. Dentro desse contexto, a União Europeia se destaca por possuir uma das regulamentações mais rígidas: a produção e o uso de HBB, misturas comerciais de PBDE e HBCDD foram praticamente eliminados, e resíduos que ultrapassem limites de concentração também devem ser gerenciados de forma a destruir ou transformar irreversivelmente esses contaminantes.

Embora algumas exceções existam — como permissões temporárias para o uso de penta-BDE e octa-BDE em materiais recicláveis até 2030, ou de deca-BDE em setores específicos até 2036 —, todas são acompanhadas de diretrizes técnicas muito estritas (EUROPEAN UNION, 2019).

O avanço regulatório também é observado em outros países. A China estabeleceu limites de concentração para penta-BDE e octa-BDE em eletrônicos e manteve uma isenção para uso de HBCDD, além de ainda não ter ratificado a proibição referente ao deca-BDE (REN *et al.*, 2017). O Japão adotou uma postura altamente restritiva ao classificar HBB e penta-/octa-BDE como Substâncias Químicas Especificadas de Classe I, o que efetivamente proíbe sua fabricação, importação e uso em qualquer aplicação (JAPAN, 2016). A Índia, por sua vez, proibiu a produção, o comércio, a importação e o uso de HBB, HBCDD e vários PBDEs, além de ter definido limites de concentração para todos os PBDEs em determinados produtos elétricos (CHETRY, 2018). Nos Estados Unidos, mesmo sem uma legislação federal que imponha diretamente as restrições da Convenção, treze estados adotaram limites próprios para diferentes BFRs em uma variedade de aplicações comerciais, criando uma estrutura regulatória fragmentada, porém significativa (SHARKEY *et al.*, 2020).

2.6 Tendências futuras

Apesar dessas ações globais, os desafios persistem na eliminação completa dos BFRs do ciclo produtivo e dos resíduos. A ausência de métodos de triagem eficazes em instalações de gerenciamento de resíduos permite que plásticos contendo BFRs retornem inadvertidamente aos processos de reciclagem, permanecendo esses contaminantes na cadeia de consumo. Além disso, o crescente uso de novos retardantes bromados (NBFRs) — desenvolvidos como substitutos — pode comprometer a efetividade das políticas de restrição, já que muitos deles apresentam propriedades químicas semelhantes às de seus antecessores. Assim, mesmo com a melhora das regulamentações internacionais, a contínua introdução de compostos substitutos de risco pouco conhecido pode levar a ciclos repetidos de proibição e substituição, limitando o progresso rumo à eliminação definitiva desses poluentes (SHARKEY *et al.*, 2020).

Materiais fotocatalíticos têm se mostrado uma alternativa promissora para a eliminação de retardantes de chama (FRs) presentes no solo. Sua elevada área superficial e a capacidade de ativar reações catalíticas mediante absorção de luz contribuem para a degradação de compostos orgânicos persistentes, tornando esse método uma opção eficiente e ambientalmente adequada para fins de remediação. Além disso, a biodegradação microbiana demonstra ser uma estratégia complementar, sustentada pela ação de microrganismos capazes de decompor estruturas químicas complexas, como os BFRs. Pesquisas recentes indicam que determinadas cepas apresentam elevado desempenho na degradação destes poluentes, reforçando o potencial do método como solução sustentável para solos altamente contaminados. Dessa forma, tanto a fotocatalise quanto a degradação microbiana representam abordagens viáveis para mitigar impactos ambientais resultantes da persistência desses compostos (THUY *et al.*, 2025).

Nesse cenário, as perspectivas futuras relacionadas aos retardantes de chama bromados em dispositivos eletrônicos sugerem uma abordagem mais integrada, que vai além das estratégias de remediação ambiental e foca na prevenção da contaminação desde sua origem. O destaque está no progresso de práticas voltadas ao desenvolvimento de produtos mais seguros, com redução do uso de substâncias perigosas e maior atenção à reciclabilidade ao final da vida do produto. Simultaneamente, nota-se uma crescente preocupação com a adoção de alternativas mais sustentáveis e com os riscos ambientais e toxicológicos associados a esses compostos (WANG *et al.*, 2019). Entretanto, pesquisas indicam que a adoção de novos retardantes, como os não bromados, podem não eliminar totalmente os riscos à saúde e ao meio ambiente, apresentando características semelhantes às de seus antecessores, o que levanta questões sobre sua persistência e toxicidade (SHARKEY *et al.*, 2020).

No âmbito da gestão de resíduos, técnicas como a espectroscopia por fluorescência de raios X (XRF) têm sido empregadas para a identificação de materiais contendo retardantes de chama bromados, permitindo a detecção rápida do teor de bromo em resíduos plásticos e contribuindo para a separação de frações contaminadas durante a reciclagem (HARRAD *et al.*, 2019). Além disso, tendências regulatórias recentes indicam uma transição para abordagens mais abrangentes, incluindo restrições aplicadas a classes de substâncias e maior responsabilização dos fabricantes ao longo do ciclo de vida dos produtos, reforçando a necessidade de integração entre inovação tecnológica e gestão sustentável de resíduos (WANG *et al.*, 2019).

3. CONCLUSÃO

O enfrentamento dos impactos causados pelos BFRs presentes em equipamentos eletroeletrônicos (EEEs) e outros poluentes orgânicos persistentes exige um conjunto coordenado de ações científicas e regulatórias. Tratados internacionais, como a Convenção de Estocolmo, representam marcos essenciais, mas constituem apenas o ponto de partida para a redução efetiva dessas substâncias no ambiente. Avanços significativos ainda dependem de pesquisa contínua capaz de aprimorar métodos de detecção, remoção e gestão segura de compostos presentes em produtos e resíduos eletroeletrônicos.

Apesar da eficiência técnica que manteve os BFRs amplamente utilizados por décadas, o fortalecimento das restrições legais e a maior atenção aos riscos têm impulsionado o desenvolvimento de alternativas menos tóxicas e prejudiciais ao ambiente. Entretanto, a substituição desses aditivos nem sempre garante soluções definitivas, visto que novos retardantes podem apresentar limitações, custos elevados ou até riscos semelhantes, criando um ciclo contínuo de substituições e avaliações.

Diante desse cenário, torna-se indispensável integrar inovação tecnológica, políticas públicas preventivas e sistemas eficazes de controle ao longo de todo o ciclo de vida dos materiais. Nesse contexto, estratégias como o ecodesign e o aprimoramento das cadeias de reciclagem ganham visibilidade ao possibilitar a mitigação da presença de substâncias perigosas desde a concepção dos produtos. Investimentos em análise de risco, técnicas de triagem em resíduos e regulamentações mais proativas são fundamentais para evitar que compostos persistentes continuem a circular novamente no ambiente. Assim, o avanço sustentável no setor eletroeletrônico depende não apenas de substituições químicas mais seguras, mas de uma abordagem preventiva, capaz de antecipar impactos e promover escolhas verdadeiramente alinhadas à proteção ambiental e à saúde humana.

REFERÊNCIAS

- AHIRWAR, R.; TRIPATHI, AK. Gestão de resíduos eletrônicos: uma revisão do processo de reciclagem, riscos ambientais e de saúde ocupacional e soluções potenciais. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* 2021
- ALAEI, M. et al. An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, environmental fate and behavior. *Chemosphere*, v. 46, p. 579–582, 2003.
- AMAP - Arctic Monitoring And Assessment Programme. POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change. Summary for Policy-makers, 2021.
- AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. Electronics and Flame Retardants. North American Flame Retardant Alliance (NAFRA). Disponível em: <https://www.americanchemistry.com/industry-groups/north-american-flame-retardant-alliance-nafra/electronics-and-flame-retardants> . Acesso em: 14 nov. 2025..
- BRASIL. Lei nº 12 305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9 605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm . Acesso em: 13 nov. 2025.
- BSEF – The International Bromine Council. Brominated Flame Retardants: an essential part of modern life. [s.l.]: BSEF, 2012. Disponível em: https://www.rsc.org/images/brominated-flame-retardants_tcm18-108416.pdf . Acesso em: 14 nov. 2025.
- CHAI, C. et al. Recycling plastics from WEEE: a review of the environmental and human health challenges associated with brominated flame retardants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, UK, v. 19, n. 2, 2022. Special Issue: Advances in Hazardous Waste and Human Health. DOI: 10.3390/ijerph19020766.
- CHETRY, B. Persistent Organic Pollutants (POPs) in India: country situation report. New Delhi: Toxics Link, 2018.
- CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatório Anual de Ocorrências 2023. São Paulo: CBPMESP, 2023.
- COVACI, A. et al. Novel brominated flame retardants: A review of their analysis, environmental fate and behaviour. *Environmental International*, v. 37, p. 532–556, 2011.
- DARNERUD, P. O. Toxic effects of brominated flame retardants in man and wildlife. *Environment International*, v. 29, n. 6, p. 841–853, 2003. DOI: 10.1016/S0160-4120(03)00107-7.
- DING, Y. et al. Chronic exposure to environmental concentrations of tetrabromobisphenol A disrupts insulin and lipid homeostasis in diet-induced obese mice. *Environmental Science & Technology*, v. 59, n. 9, p. 4330–4343, 2025. DOI: 10.1021/acs.est.4c12616.

DOWBYSZ, A. et al. Recent advances in bio-based additive flame retardants for thermosetting resins. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 19, n. 7, 2022.

EFSA – European Food Safety Authority. Brominated flame retardants (BFRs). 23 out. 2024. Disponível em: <https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/brominated-flame-retardants>. Acesso em: 15 nov. 2025.

ENYOH, C. E. et al. Chemicals from Brominated Flame Retardants: Analytical Methods, Environmental Occurrence, Transport Mechanisms and Health Risks — A Review. *Applied Sciences*, v. 14, n. 17, 2024.

ERNEST, S. R. et al. Efeitos da exposição crônica a uma mistura ambientalmente relevante de retardantes de chama bromados no sistema reprodutivo e tireoidiano em ratos machos adultos. *Toxicol. Sci.* 2012 , 127 , 496–507.

EUROPEAN UNION. Regulation (EU) 2019/1021 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on persistent organic pollutants (recast). *Official Journal of the European Union*, L 169, p. 33, 2019.

HARRAD, S. et al. Evaluation of hand-held XRF for screening waste articles for brominated flame retardants. EPA, 2019.

HOUDE, M. et al. Monitoring of perfluorinated compounds in aquatic biota: An updated review. *Environmental Science and Technology*, v. 45, n. 19, p. 7962–7973, 1 out. 2011.

JAGIĆ, K. et al. Analysis of brominated flame retardants in the aquatic environment: a review. *Arh Hig Rada Toksikol.* 2021.

JAPAN. Ministry of the Environment. The National Implementation Plan of Japan under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (Modified October 2016). Tokyo: Ministry of the Environment, 2016. Disponível em: http://www.env.go.jp/chemi/pops/plan/en_full-re.pdf . Acesso em: 10 nov. 2025.

MA, Y. et al. Identification and classification of plastic waste using near-infrared spectroscopy. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021.

MORF, L. S. et al. Brominated Flame Retardants in Waste Electrical and Electronic Equipment: Substance Flows in a Recycling Plant. *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 39, n. 22, p. 8691–8699, 2005. DOI: 10.1021/es051170k.
POPS INT. All POPs listed in the Stockholm Convention. Secretariat of the Stockholm Convention, 2021.

NFPA – National Fire Protection Association. Home Electrical Fires. Quincy, MA: NFPA, 2022.

PAWAR, G. et al. Dermal bioaccessibility of flame retardants from indoor dust and the influence of topically applied cosmetics. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, v. 27, p. 100–105, 2016.

PECK, A. M. et al. Hexabromocyclododecane in white-sided dolphins: Temporal trend and stereoisomer distribution in tissues. *Environmental Science & Technology*, v. 42, p. 2650–2655, 2008.

REN, Z. et al. National strategy and action plan on PBDEs control in China to fulfill the obligation of POPs Convention. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FLAME*

RETARDANTS – BFR 2017, 8., 2017, York. Anais [...]. York: BFR 2017, 2017

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. Brominated Flame Retardants: an essential part of modern life. [s.l.]: RSC, 2012. 3 p. Disponível em: https://www.rsc.org/images/brominated-flame-retardants_tcm18-108416.pdf . Acesso em: 15 nov. 2025.

SHARKEY, M. et al. Phasing-out of legacy brominated flame retardants. *Environment International*, v. 143, p. 106–121, 2020.

SIENKIEWICZ, A. et al. Flame retardancy of bio-based composites: A review. *Materials*, v. 14, 2021.

SINGH, I. et al. Advances in phosphorus-based polymeric flame retardants. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 2024.

SUN, B. et al. Releases of brominated flame retardants (BFRs) from microplastics in aqueous medium: Kinetics and molecular-size dependence of diffusion. *Water Research*, v. 151, p. 215–225, 2019.

TANG, Y.-H. et al. Recent Advances in Fire-Retardant Silicone Rubber Composites. *Polymers*, v. 16, n. 17, p. 2442, 2024. DOI: 10.3390/polym16172442.

THUY, T. L. et al. A Review on Flame Retardants in Soils: Occurrence, Environmental Impact, Health Risks, Remediation Strategies, and Future Perspectives. *Toxics*, v. 13, n. 3, p. 228, 2025. DOI: 10.3390/toxics13030228.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Register of Specific Exemptions: Hexabromocyclododecane. Châtelaine: Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, 2020. Disponível em: <http://chm.pops.int/Implementation/Exemptions/SpecificExemptions/HexabromocyclododecaneRoSE/tabid/5034/Default.aspx> . Acesso em: 5 maio 2020.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2003/11/CE Parlamento Europeu e do Conselho, de 6 de fevereiro de 2003, relativa à limitação da colocação no mercado e da utilização de algumas substâncias e preparações perigosas. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:042:0045:0046:PT:PDF> > Acesso em: 20 out. 2023.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2003/53/CE Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de junho de 2003, relativa à limitação da colocação no mercado e da utilização de certas substâncias e preparações perigosas. Disponível em:

<<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0053&from=NL>>
Acesso em: 20 out. 2023.

USEPA. Éteres difenílicos polibromados (PBDEs). 2010. Disponível em:
<https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/polybrominated-diphenyl-ethers-pbdes> . Acesso em: 15 nov. 2025.

WANG, Z. et al. A never-ending story of flame retardants? Environmental Science & Technology, 2019.

WYPYCH, G. INTRODUCTION. Handbook of Flame Retardants, p. 1–2, 1 jan. 2021.

ZHANG, C. et al. Recent trends of phosphorus-containing flame retardants: Mechanism and applications. Applied Sciences, 2022.