

Avaliação Técnica, Econômica e Ambiental das Tecnologias de Controle de Emissões de Compostos Orgânicos Voláteis por meio de um Indicador de Eficiência de Custo Ambiental

VITOR MACIEL DE SOUSA RODRIGUES

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO - UERJ

SIMONE LORENA QUITERIO DE SOUZA

Introdução

Atualmente a poluição atmosférica se destaca como uma das maiores causas de doenças relacionadas à poluição ambiental no mundo. Nesse contexto, as emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) assumem uma importância significativa em decorrência de sua toxicidade e de seu papel na formação de poluentes secundários relevantes. O controle desses poluentes, entretanto, ainda representa um desafio expressivo, em virtude das limitações práticas ao seu tratamento e do elevado grau de complexidade associado à escolha das tecnologias de controle mais adequadas.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Com o objetivo de reduzir a complexidade associada à tomada de decisões, as particularidades das diferentes tecnologias de controle de COV vêm sendo abordadas sob a ótica do custo-benefício e desempenho ambiental. O presente trabalho se insere neste contexto, com o objetivo de abordar, por meio de um indicador de ecoeficiência específico, a relação entre as dimensões técnica, econômica e ambiental dessas tecnologias, utilizando para isso o cálculo do indicador de Eficiência de Custo Ambiental (ECA) a partir de dados operacionais coletados na literatura sobre o tema.

Fundamentação Teórica

As tecnologias de controle de COV englobam a adsorção, absorção, condensação, separação por membranas, biofiltração, plasma, oxidação térmica, catalítica e fotocatalítica. Baseando-se em princípios de aplicação destrutivos ou recuperativos, cada uma dessas tecnologias é marcada por particularidades específicas, com aspectos ambientais distintos. Assim, enquanto algumas possuem uma maior eficiência na remoção de COV, outras se destacam pelo reduzido consumo de recursos ou geração de resíduos, sendo a sua escolha variável de acordo com cada contexto específico (EMIS, 2020).

Metodologia

Por meio de uma pesquisa bibliográfica embasada foram coletados dados referentes aos aspectos técnico, econômico e ambientais de seis tecnologias de tratamento de COV. Para a condução da pesquisa bibliográfica foram adotadas palavras-chave e critérios de inclusão e exclusão específicos. Os dados obtidos foram padronizados e empregados para o cálculo de um indicador de ECA, a partir de equações adaptadas de Zhao, Zhang e Bai (2020) e Hellweg et al. (2005).

Análise dos Resultados

Os resultados obtidos indicam que as tecnologias oxidativas avaliadas apresentam os melhores desempenhos ambientais, enquanto a biofiltração se destaca pelo baixo desempenho ambiental decorrente de sua limitada eficiência na remoção de COV. Considerando os valores de ECA, entretanto, a tecnologia de biotrickling se apresentou como a mais vantajosa, obtendo o maior impacto ambiental positivo pelo menor custo.

Conclusão

A análise dos dados permitiu a quantificação dos aspectos ambientais de cada tecnologia, fornecendo valores representativos que caracterizam o seu desempenho ambiental e custo econômico. Por meio da comparação entre os valores de ECA foi possível identificar as tecnologias prioritárias em um cenário de crescimento verde, fornecendo subsídio para a tomada de decisões e disseminando um instrumento metodológico simples e de fácil aplicação.

Referências Bibliográficas

EMIS. LUSS. Disponível em: <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/luss>. Acesso em: 16 set. 2021. HELLWEG, S.; DOKA, G.; FINNVEDEN, G.; HUNGERBÜHLER, K. Assessing the Eco?efficiency of End-of?Pipe Technologies with the Environmental Cost Efficiency Indicator. *Journal of Industrial Ecology*, v. 9, n. 4, p. 189-203, 2005. ZHAO, X.; ZHANG, C.; BAI, S. Eco-Efficiency of End-of-Pipe Systems: An Extended Environmental Cost Efficiency Framework for Wastewater Treatment. *Water*, v. 12, n. 2, p. 454, 2020.

Palavras Chave

Ecoeficiência, Tecnologias de Controle, Compostos Orgânicos Voláteis

AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DAS TECNOLOGIAS DE CONTROLE DE EMISSÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS POR MEIO DE UM INDICADOR DE EFICIÊNCIA DE CUSTO AMBIENTAL

INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde (OMS) classifica a poluição atmosférica como um dos maiores riscos ambientais à saúde humana, associando a exposição a poluentes atmosféricos ao aumento na ocorrência de casos de cânceres, infecções respiratórias, doenças cardiovasculares e doenças cerebrovasculares (OMS, 2021).

Atualmente, a poluição atmosférica já é a causa de mais de 4 milhões de mortes por ano no mundo (OMS, 2021), e estima-se, até 2050, um aumento em mais de 50 % nesse número caso não haja intervenções radicais nos padrões de emissões atuais (LELIEVELD *et al.*, 2015).

Dessa forma, a poluição do ar se destaca como um dos temas mais relevantes para o atendimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estando relacionado à saúde e bem-estar (ODS 3), cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), consumo e produção responsáveis (ODS 12), entre outros tópicos relevantes discutidos na sociedade atualmente (RAFAJ *et al.*, 2018).

Neste contexto, o estudo das emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) assume uma importância significativa. Os COV se destacam enquanto poluentes atmosféricos, não só por participarem da formação de ozônio troposférico (O_3) e do Material Particulado de 2,5 μm ($MP_{2,5}$), os dois principais poluentes característicos de regiões urbanizadas e industrializadas, como também por estarem associados à poluição química crescente no mundo, apresentando efeitos tóxicos, mutagênicos e carcinogênicos em grande parte ainda desconhecidos (BOLDEN; KWIATKOWSKI; COLBORN, 2015; ZHAO *et al.*, 2019).

Abrangendo uma variedade de espécies químicas com diferentes propriedades e contando com uma multiplicidade de fontes antrópicas de emissão, o controle desses compostos representa atualmente um desafio significativo em inúmeros países, especialmente naqueles em desenvolvimento (KUMAR *et al.*, 2018; FU *et al.*, 2020).

No nível das fontes emissoras, esse desafio é decorrente principalmente das limitações práticas para o efetivo abate dos COV, em consequência da complexidade das misturas dos compostos e da dificuldade atrelada ao seu tratamento (YANG *et al.*, 2019).

Ao mesmo tempo, existe uma variedade de opções tecnológicas disponíveis para o controle de COV, cada uma associada a diferentes custos, graus de eficiência de remoção e impactos ambientais, indicando que a escolha estratégica da medida adotada para cada fonte ainda preserva um grau de complexidade elevado (ECE, 2019; XU *et al.*, 2021).

Em virtude desse desafio, muitos estudos têm explorado a eficiência e aplicabilidade de cada uma dessas tecnologias de controle (OLIVA *et al.*, 2018; PETRUSOVÁ *et al.*,

2019; ZHU; SHEN; LUO, 2020; XU *et al.*, 2021). O presente artigo se insere neste contexto, abordando explicitamente, por meio de um indicador específico, como essas tecnologias podem ser adotadas estrategicamente enquanto ferramentas de ecoeficiência, de forma a conciliar o mínimo custo com a máxima redução na poluição ambiental e eliminar os *trade-offs* decorrentes da sua operação.

PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

No contexto das emissões industriais, diferentes tecnologias e abordagens vêm sendo desenvolvidas para a redução da poluição atmosférica no mundo, e inúmeras políticas públicas vêm sendo implementadas para incentivar a adoção dessas mesmas tecnologias e abordagens pelo setor das empresas e indústrias (COUTINHO; BOTTINI, 2015).

Acompanhando a evolução da gestão ambiental empresarial ao longo das décadas, essas metodologias para o abate de emissões incluem desde medidas “fim-de-tubo” a práticas preventivas, incorporando em muitos casos uma visão integrada de gestão ambiental empresarial por meio da adoção de programas de Produção mais Limpa (P+L), Simbiose Industrial (SI) e Ecoeficiência nos processos produtivos (BARBIERI, 2016).

A partir da evolução dessas tecnologias e abordagens, a percepção da questão ambiental como um custo às empresas e como um problema a ser sanado é substituída gradualmente pela percepção de possibilidades de lucro e de crescimento através da redução de custos e de desperdícios, do aumento da produtividade e do desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis (BARBIERI, 2016).

Considerando o contexto das tecnologias fim de tubo de COV, cuja implementação e operação está associada a consideráveis gastos financeiros e a potenciais impactos ambientais, ganham destaque as abordagens relacionadas a desempenho ambiental e custo-benefício, enquanto esforços para reduzir a complexidade envolvida na escolha das melhores alternativas (JOHNSEN *et al.*, 2016; STASIULAITIENE *et al.*, 2016; OLIVA *et al.*, 2018).

Nesse sentido, diferentes diretrizes vêm sendo desenvolvidas para orientar essa escolha. Para aprovar e coordenar as legislações estaduais de controle de COV, a US. EPA, por exemplo, emprega o conceito de *Reasonably Available Control Technologies* (RACT), que considera aspectos técnicos e econômicos locais para estipular o nível de controle exigido para as emissões de COV, influenciando a adoção de tecnologias específicas (US.EPA, 2019).

Por sua vez, diversos países, especialmente da Europa, têm utilizado o conceito de *Best Available Technologies* (BAT) para nortear a formulação de políticas públicas e a tomada de decisões em diferentes setores. Nesse contexto, a *Economic Commission for Europe* (ECE) publicou em 2015 um documento base para a identificação das BAT utilizadas no abate de diferentes poluentes, entre eles os COV, com o objetivo de capacitar os signatários a cumprir as metas do Protocolo de Gothenburg (ECE, 2015).

Da mesma forma, diferentes estudos vêm abordando a escolha das tecnologias mais adequadas para o controle dos COV, considerando o custo-benefício envolvido e seu desempenho ambiental (ESTRADA *et al.*, 2011; OLIVA *et al.*, 2018).

Estrada *et al.* (2011), por exemplo, utilizaram as métricas de sustentabilidade da *Institution of Chemical Engineers* (ICChemE) para comparar diferentes tecnologias de controle com base no conceito de *triple-bottom-line*, isto é, considerando os impactos econômicos, ambientais e sociais das alternativas estudadas. Os autores destacaram as biotecnologias como as mais vantajosas em uma perspectiva ambiental, técnica e econômica, e ressaltaram a importância de considerar o Valor Presente Líquido (VPL) na comparação econômica, dado que as alternativas com maior custo de investimento apresentaram em geral os menores custos de operação.

Oliva *et al.* (2018), em uma abordagem semelhante, empregaram um procedimento numérico para quantificar os diferentes parâmetros econômicos, ambientais e operacionais das tecnologias estudadas. Identificando os pontos fortes e fracos de cada tecnologia por meio de uma classificação semi-quantitativa desses parâmetros, os autores também destacaram as biotecnologias como as mais custo-efetivas e ambientalmente amigáveis.

Por sua vez, uma série de outros estudos vêm empregando o método de *Life Cycle Assessment* (LCA) para comparar os impactos ambientais de diferentes tecnologias ao longo de seu ciclo de vida (JOHNSEN *et al.*, 2016; STASIULAITIENE *et al.*, 2016; TOMATIS *et al.* 2019).

Johnsen *et al.* (2016) e Tomatis *et al.* (2019), por exemplo, combinando o cálculo de LCA com uma análise de custos, identificaram em diferentes contextos, respectivamente, a adsorção e a oxidação térmica catalítica como as alternativas mais econômicas e ambientalmente corretas para o tratamento de COV, em comparação com outras tecnologias.

Apesar da variedade de estudos abordando a escolha estratégica das melhores tecnologias de COV, tanto pelo aspecto técnico-econômico quanto pelo aspecto ambiental, nenhum desses estudos aborda explicitamente a relação entre ambas as dimensões por meio de um indicador específico embasado no conceito da ecoeficiência.

A ecoeficiência é definida originalmente como a razão entre o valor econômico adicionado e o impacto ambiental correspondente (SCHALTEGGER; STURM, 1990). Esse conceito engloba uma classe de indicadores empregados para caracterizar a relação entre os aspectos econômicos e ambientais de diferentes sistemas, incluindo as tecnologias de controle “fim de tubo” (HELLWEG *et al.*, 2005; ZHAO; ZHANG; BAI, 2020).

O indicador de Eficiência de Custo Ambiental (ECA) é um indicador exclusivamente empregado para a avaliação da ecoeficiência das tecnologias fim-de-tubo, já que é capaz de avaliar o impacto ambiental positivo gerado pelas tecnologias de controle e seu custo associado, integrando ambas as dimensões em um valor único (HELLWEG *et al.*, 2005; ZHAO; ZHANG; BAI, 2020).

Assim, o objetivo do presente trabalho é o de calcular o ECA das principais tecnologias de controle de emissões de COV e categorizá-las de acordo com o seu nível de

ecoeficiência, identificando as tecnologias prioritárias em um contexto de crescimento verde.

METODOLOGIA

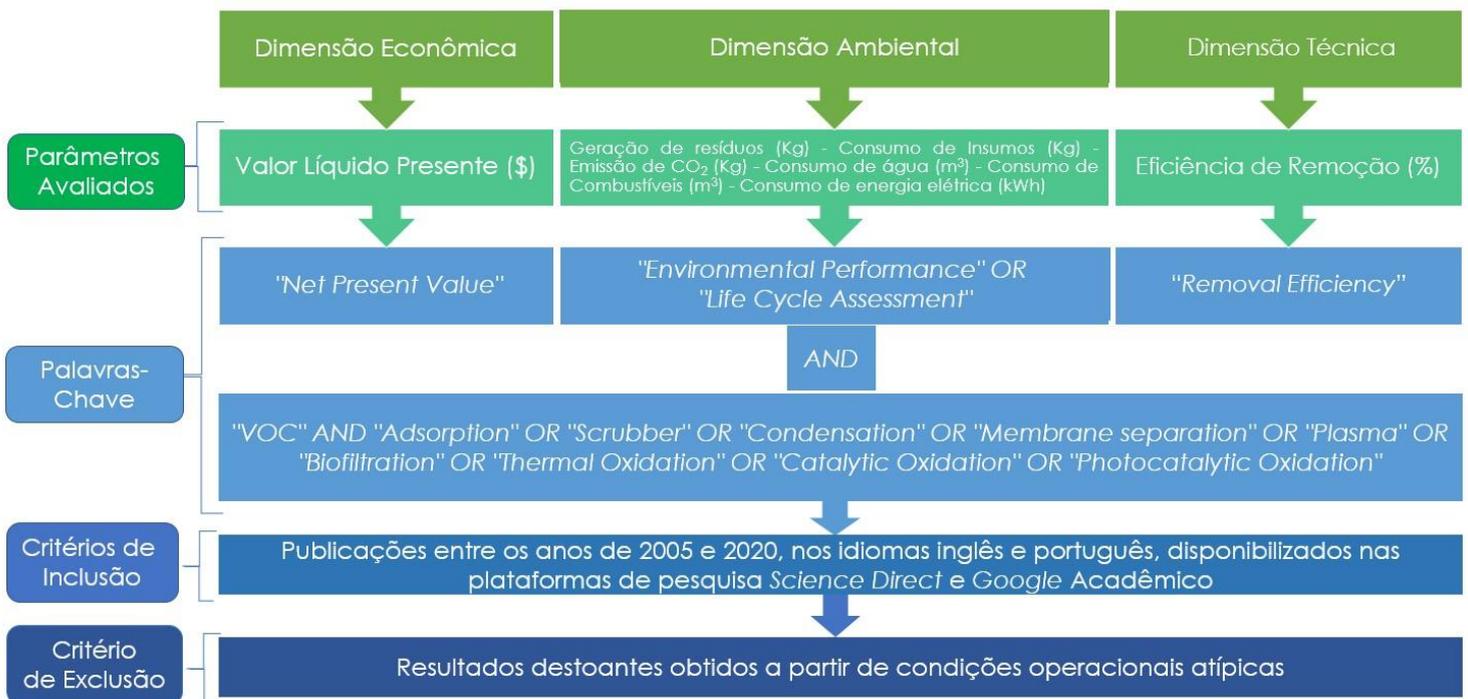
Os dados utilizados para o cálculo da ECA foram obtidos por meio de uma pesquisa bibliográfica embasada. A pesquisa bibliográfica considerou artigos científicos e relatórios técnicos publicados entre os anos de 2005 e 2020, nos idiomas inglês e português, disponibilizados nas plataformas de pesquisa *Science Direct* e *Google Acadêmico*.

Foram adotados como termos de pesquisa as palavras-chave: “*Net Present Value*”, “*Environmental Performance*”, “*Life Cycle Assessment*”, “*Removal Efficiency*” e “*VOC*” seguidas do nome de cada tecnologia abordada no presente trabalho.

Por meio da análise das publicações levantadas foram quantificados e analisados os seguintes parâmetros: Eficiência de Remoção (%); Geração de resíduos (Kg); Consumo de Insumos (Kg); Emissão de CO₂ (Kg); Consumo de água (m³); Consumo de Combustíveis (m³); Consumo de energia elétrica (kWh); e VPL (\$).

Por fim, foram excluídos da análise valores considerados destoantes, isto é, valores obtidos a partir de condições operacionais atípicas capazes de descaracterizar a média de um ou mais dos parâmetros avaliados em cada dimensão. Os parâmetros, critérios e palavras-chave adotados para estruturar a pesquisa bibliográfica estão apresentados resumidamente na Figura 1.

Figura 1 - Parâmetros, Critérios e Palavras-Chave adotados para a estruturação da Pesquisa Bibliográfica



Fonte: Elaboração Própria

Os dados obtidos na pesquisa bibliográfica foram empregados no cálculo da média dos parâmetros analisados para cada tecnologia.

Para a análise dos parâmetros ambientais, os valores obtidos foram padronizados considerando o tratamento de 1 m³ de emissões como unidade funcional. Complementarmente, esses valores foram tratados com a exclusão de *outliers* por meio do teste estatístico de Grubbs.

Todos os valores referentes ao VPL das tecnologias, por sua vez, foram convertidos para dólares americanos referentes ao ano de 2019, possibilitando a comparação entre os resultados na mesma base monetária e inflação.

Com os resultados obtidos foram calculados os valores de ECA_x de cada tecnologia, por meio da equação (1), adaptada de Zhao, Zhang e Bai (2020) e Hellweg *et al.* (2005).

$$ECA_x = \frac{DA_x}{CLD_x} \quad (1)$$

Onde DA representa o desempenho ambiental de uma tecnologia x e CLD representa o custo líquido descontado dessa mesma tecnologia. Os valores de DA_x e CLD_x , por sua vez, foram calculados a partir das equações (2) e (3), também adaptadas de Zhao, Zhang e Bai (2020) e Hellweg *et al.* (2005).

$$DA_x = \frac{1}{\sum_j P_j \times NOR_{j,x}} \quad (2)$$

$$CLD_x = \frac{VPL_x \times (1+r)^T \times r}{(1+r)^T - 1} \quad (3)$$

Onde P representa o fator de ponderação para um parâmetro j ; $NOR_{j,x}$ representa o valor normalizado dos parâmetros ambientais avaliados para cada tecnologia de controle; VPL_x representa o Valor Presente Líquido dessas tecnologias; T representa o tempo de vida analisado; e r representa uma taxa fixa de desconto.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo das décadas, diferentes tecnologias vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas para o controle de emissões de COV, baseadas em diferentes mecanismos de tratamento.

Essas tecnologias podem ser classificadas em destrutivas ou recuperativas de acordo com o seu mecanismo de atuação (ZHU; SHEN; LUO, 2020). Enquanto tecnologias destrutivas promovem a decomposição dos COV em CO₂, H₂O e outros compostos não-tóxicos ou menos tóxicos por mecanismos químicos e bioquímicos específicos, as tecnologias recuperativas conseguem separar os COV do meio através da modificação das condições de pressão ou temperatura (ZHU; SHEN; LUO, 2020). A Figura 2 ilustra as diferentes tecnologias e as suas respectivas classificações.

Figura 2 - Tecnologias de tratamento de COV e suas respectivas classificações



Fonte: Adaptado de Parmar e Rao (2009) e Zhu, Shen e Luo (2020).

Enquanto muitas tecnologias são seletivas, apresentando melhor eficiência para determinadas espécies de COV, outras são mais abrangentes, embora possam igualmente apresentar maiores custos de operação ou ter a sua aplicação limitada a processos específicos (BABAR; SHAREEFDEEN, 2014). Fatores como a concentração dos COV na corrente de ar, a sua composição, temperatura, umidade, o volume de resíduos ou efluentes secundários gerados, e a necessidade de complementação do tratamento com outras técnicas também são relatados como fatores relevantes na escolha das tecnologias de tratamento (PARMAR; RAO, 2009; YANG *et al.*, 2019).

- Absorção

Os processos de absorção consistem na transferência dos compostos da fase gasosa para a fase líquida com base na solubilidade desses compostos e nas diferenças de concentração entre as duas fases (BIARD *et al.*, 2016). Nessa técnica, a seleção de um absorvente eficiente e reutilizável constitui um dos principais desafios para a sua eficiência, dada a importância da pressão do vapor de cada material absorvente enquanto fator a ser considerado para a viabilidade do processo (XU *et al.*, 2021).

- Adsorção

A técnica de adsorção consiste na retenção de compostos presentes na corrente gasosa em um material sólido com grande área superficial por meio das forças intermoleculares. A adsorção apresenta-se como um tratamento eficiente para elevadas concentrações de COV, em uma faixa variando de 700 a 10.000 ppm (IULIANELLI; DRIOLI, 2020).

De uma forma geral essa técnica depende da atração eletrostática entre os COV e o material adsorvente, com a interação entre COV polares e sítios hidrofílicos e a

interação entre COV não polares e sítios hidrofóbicos determinando a eficiência do processo (LI *et al.*, 2020). As tecnologias de adsorção são consideradas particularmente promissoras no tratamento de COV em virtude de seu custo-benefício, de sua flexibilidade operacional e de seu baixo consumo energético (ZHU; SHEN; LUO, 2020).

- Separação por Membranas

O tratamento de separação por membranas consiste na difusão de um fluxo de gás por membranas semipermeáveis em determinadas condições de pressão e temperatura, permitindo a segregação e recuperação dos COV e conseqüentemente a purificação desse fluxo de gás (LUENGAS *et al.*, 2015).

Para Petrusová *et al.* (2019), o uso de membranas para o tratamento de COV vêm se destacando entre as demais tecnologias em virtude de suas vantagens técnicas, como a operação em taxas de fluxo baixas ou variáveis, a baixa demanda de energia, o uso de unidades flexíveis, simples e de fácil manuseio, e as elevadas eficiências (cerca de 80 %) na retenção de COV da corrente de alimentação.

- Condensação

A condensação consiste na liquefação dos compostos presentes na corrente gasosa, seja por meio da redução de temperaturas ou da elevação da pressão (KAMAL; RAZZAK; HOSSAIN, 2016).

Li, Ma e Ling (2020) destacam que atualmente os processos de condensação não atendem a maioria das exigências legais de controle de COV em virtude da restrição que as temperaturas de resfriamento exigidas para sua operação impõem ao processo. Apesar disso, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas no intuito de aumentar sua aplicação e eficiência, possibilitando uma recuperação viável dos COV com a redução dos impactos ambientais associados a sua emissão (LI; MA; LING, 2020).

- Catálise de Plasma

Na catálise de plasma, a corrente gasosa é submetida a um forte campo elétrico capaz de induzir a ionização das moléculas, formando um corpo altamente denso de energia gasosa (EMIS, 2020). As moléculas do gás presentes na forma de radicais, elétrons livres, íons e compostos altamente reativos, garantem, por sua vez, a quebra e oxidação dos poluentes e a destruição dos compostos orgânicos indesejados (EMIS, 2020).

A catálise de plasma vem sendo amplamente estudada por suas vantagens operacionais, como a praticidade operacional e a baixa seletividade (EMIS, 2020). Entretanto, a aplicação dessa tecnologia para o tratamento de COV ainda é limitada, restringindo-se na escala industrial predominantemente ao controle de odores e de solventes em baixas concentrações (EMIS, 2020).

- Oxidação Térmica

A oxidação térmica se baseia no aquecimento da corrente de gás a temperaturas superiores às da auto ignição dos compostos presentes na corrente gasosa (BABAR; SHAREEFDEEN, 2014).

Constituindo uma das medidas de tratamento mais empregadas em indústrias petroquímicas, a oxidação térmica é geralmente aplicada com eficiência em correntes gasosas com concentrações superiores a 20 ppm (IULIANELLI; DRIOLI, 2020). As temperaturas médias de operação variam de 760 a 870 °C, e o elevado gasto com combustíveis é relatado como uma das maiores desvantagens dessa tecnologia (IULIANELLI; DRIOLI, 2020).

Apesar disso, novas tecnologias de oxidação térmica podem realizar o aproveitamento energético dos COV, reduzindo o consumo de combustíveis auxiliares (BABAR; SHAREEFDEEN, 2014; TOMATIS *et al.*, 2019). Nesse sentido, a oxidação térmica apresenta o potencial de se caracterizar como recuperativa, em que o aproveitamento energético se dá através de trocadores de calor, ou regenerativa, em que a energia térmica gerada é armazenada em camas cerâmicas para posterior uso (TOMATIS *et al.*, 2019; EMIS, 2020).

- Oxidação Catalítica

A oxidação catalítica é descrita como uma alternativa eficiente para a destruição dos COV, já que apresenta alta viabilidade econômica, baixa geração de poluentes secundários e relativo controle de seletividade dos subprodutos gerados (GUO *et al.*, 2020).

Essa tecnologia se difere da oxidação térmica por exigir temperaturas mais baixas para operar (entre 300 e 500° C), demandando menor gasto de combustíveis auxiliares e apresentando por isso menores custos operacionais (ZHANG; JIANG; SHANGGUAN, 2016). Além disso, a oxidação catalítica pode alcançar velocidades de reação superiores às dos processos térmicos, já que os catalisadores atuam reduzindo a energia exigida para as reações de oxidação (KAMAL; RAZZAK; HOSSAIN, 2016).

Apesar disso, a seleção de catalisadores eficientes constitui um desafio na prática, em virtude da variedade de espécies e complexidade das misturas de COV presentes nas emissões industriais (GUO *et al.*, 2020).

- Oxidação Fotocatalítica

A oxidação fotocatalítica, por sua vez, emprega a irradiação de luz Ultravioleta (UV) para decompor os COV presentes na corrente gasosa, promovendo uma fotólise direta dos compostos ou a sua oxidação pela formação de radicais reativos de oxigênio (EMIS, 2020).

Apesar da elevada eficiência relatada no tratamento de COV, do baixo consumo de energia e da praticidade operacional, utilizando módulos simples e compactos, a aplicação da oxidação fotocatalítica é geralmente restrita a processos descontínuos e marcados pela geração de baixas concentrações de poluentes (EMIS, 2020).

- Biofiltração

O tratamento de COV por biofiltração é baseado na degradação da matéria orgânica por microrganismos aderidos a um leito compactado e poroso pelo qual o fluxo gasoso é comprimido, resultando na conversão dos poluentes em produtos inócuos como H₂O, CO₂, sulfato e nitrato (BABAR; SHAREEFDEEN, 2014; BARBUSINSKI *et al.*, 2017).

Entre as principais vantagens dessa tecnologia destacam-se: o baixo custo de investimento e de operação, a elevada eficiência, e a ausência de fluxos de resíduos secundários, resultando em uma operação ecologicamente mais limpa (BABAR; SHAREEFDEEN, 2014; BARBUSINSKI *et al.*, 2017).

Os biofiltros, entretanto, estão sujeitos a entupimento e deterioração do meio, além de apresentarem baixa eficiência em altas concentrações de poluentes ou na degradação de COV hidrofóbicos, como os alcanos, em virtude de limitações na transferência de massas (BABAR; SHAREEFDEEN, 2014; CHENG *et al.*, 2016).

Paralela à biofiltração convencional, e obtendo maiores vantagens operacionais, vem sendo desenvolvida e aplicada também a técnica dos filtros de *biotrickling*, que combinam o princípio da filtração biológica com a absorção. Por meio do líquido da absorção usado no processo, essa tecnologia garante um maior controle do pH e da concentração de sais, metabólitos e nutrientes no meio, obtendo consideráveis eficiências de remoção, especialmente para compostos ácidos (EMIS, 2020).

Essa técnica, entretanto, também é sensível a flutuações na concentração e volume de gases tratados, além de apresentar menores rendimentos para compostos pouco solúveis ou tóxicos (EMIS, 2020).

DISCUSSÃO

Para a avaliação técnica, econômica e ambiental das tecnologias de controle foram compiladas 67 publicações referentes ao tema, das quais foram selecionadas 9 para a análise dos dados, com base nos parâmetros, palavras-chave e critérios adotados para a pesquisa bibliográfica (BABBIT *et al.*, 2008; SAFFARIAN, 2009; ABROMAITIS *et al.*, 2011; ESTRADA *et al.*, 2011; BORWANKAR; ANDERSON; FOWLER, 2012; ALFONSÍN *et al.*, 2015; JOHNSEN *et al.*, 2016; STASIULAITIENE *et al.*, 2016; TOMATIS *et al.*, 2019).

Foram extraídos dados referentes às tecnologias: oxidação térmica recuperativa/regenerativa, oxidação catalítica, biofiltração, absorção, adsorção e *biotrickling*, não tendo sido obtidos dados suficientes para a análise dos parâmetros das demais tecnologias.

Os resultados obtidos indicam que a oxidação térmica apresenta, entre as demais tecnologias analisadas, a melhor eficiência média na remoção de COV, apresentando portanto, o menor valor na escala normalizada para o parâmetro “emissões residuais de COV”. Por sua vez, as tecnologias de *biotrickling*, absorção e biofiltração apresentaram os maiores valores nesse quesito devido às comparativamente baixas eficiências médias de remoção.

Em relação ao consumo de energia elétrica, a oxidação térmica, a oxidação catalítica e a adsorção se destacaram, enquanto as demais tecnologias apresentaram valores pouco significativos.

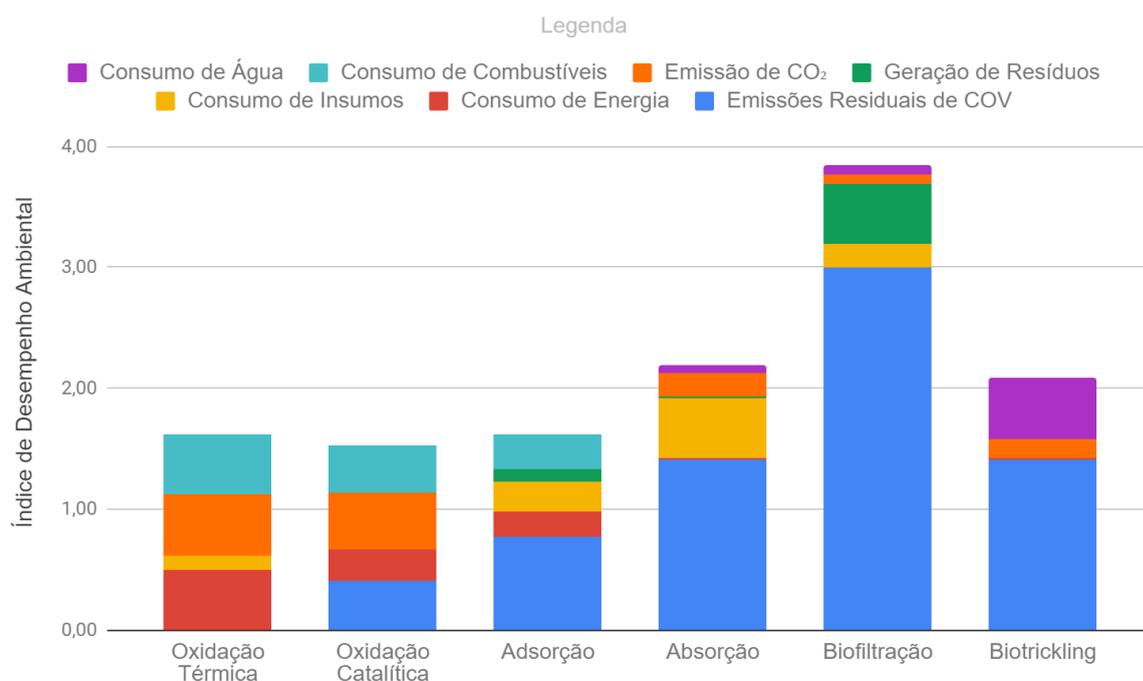
A absorção, adsorção e biofiltração, por sua vez, se destacaram em relação ao consumo de insumos, principalmente em decorrência da demanda por reagentes químicos, materiais adsorventes e substratos e nutrientes, respectivamente. A biofiltração apresentou também os maiores valores para a geração de resíduos, devido à formação de lodo biológico ou a saturação dos meios filtrantes.

Em relação ao consumo de água, o *biotrickling* se mostrou a tecnologia mais relevante, seguido pela biofiltração e pela absorção. Para as demais tecnologias o consumo de água foi considerado insignificante.

Em relação ao consumo de combustíveis, também assumiu-se um valor desprezível para a maioria das tecnologias, com exceção da adsorção, oxidação térmica e oxidação catalítica. Nesse sentido, a oxidação térmica apresentou os maiores valores, indicando o consumo de combustíveis como uma das maiores desvantagens operacionais e ambientais dessa tecnologia, conforme já discutido na literatura (TOMATIS *et al.*, 2019).

A oxidação térmica também apresentou os maiores valores para a emissão de CO₂, seguida pela oxidação catalítica e, em menor escala, pela absorção. É possível comparar o desempenho ambiental das tecnologias analisadas no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Índice de Desempenho Ambiental das Tecnologias Analisadas

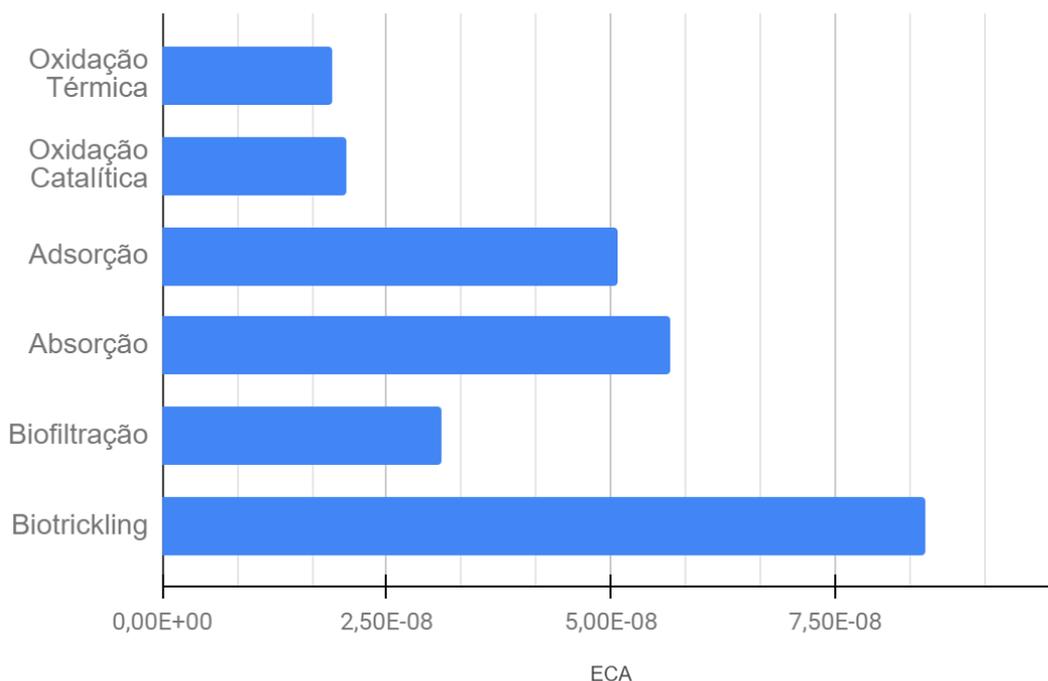


Fonte: Elaboração Própria

No cálculo do desempenho ambiental de cada tecnologia, foi adotado o peso 3 para o parâmetro Emissões Residuais de COV e 0,5 para os demais parâmetros, já que a eficiência de remoção de COV foi considerado o aspecto mais relevante das tecnologias analisadas. É importante destacar que os pesos adotados influenciam os resultados finais obtidos, devendo estes se ajustar a cada contexto específico e refletir as prioridades previamente estabelecidas.

Analisando a razão entre o desempenho ambiental de cada tecnologia e seu valor líquido foi possível comparar a ecoeficiência das opções e calcular seu ECA, conforme apresentado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Eficiência do Custo Ambiental das tecnologias analisadas



Fonte: Elaboração Própria

O *biotrickling* se destaca, nesse sentido, como a tecnologia mais ecoeficiente para a remoção de COV, com o maior valor de ECA e portanto a melhor relação entre custo e desempenho ambiental. A oxidação térmica e a oxidação catalítica, por sua vez, apresentam as menores ecoeficiências entre as tecnologias analisadas, com um custo relativamente maior para o desempenho ambiental obtido.

O cálculo dos valores de ECA fornece, assim, um embasamento para orientar a tomada de decisões na escolha de tecnologias de controle de COV, permitindo a comparação de diferentes aspectos ambientais a partir de resultados quantitativos.

CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada a quantificação dos aspectos técnico, econômico e ambientais de diferentes tecnologias de controle de COV, a partir de dados relatados na literatura, possibilitando o cálculo de um indicador de ecoeficiência e, conseqüentemente, uma análise comparativa entre as mesmas.

Os resultados obtidos destacam a tecnologia de *biotrickling* como a mais vantajosa na perspectiva da ecoeficiência, apresentando o maior impacto ambiental positivo pelo menor custo. As tecnologias oxidativas, por sua vez, apesar dos elevados desempenhos ambientais, apresentaram os menores valores de ECA, em decorrência dos maiores custos associados.

Compilando dados operacionais de diferentes publicações a respeito do tema e apresentando os resultados obtidos por meio de um indicador de desempenho simples e robusto, este trabalho procura fornecer um subsídio à tomada de decisões para o controle das emissões de COV, bem como difundir o uso de um instrumento metodológico prático e de fácil aplicação em qualquer contexto específico. As conclusões deste trabalho se mostram, portanto, capazes de reduzir as complexidades atreladas à escolha das diferentes tecnologias de controle, facilitando a análise dos seus *trade offs*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABROMAITIS, V.; OCHMANAITE, V.; DENAFAS, G.; MARTUZEVICIUS, D. LCA-Based Comparison of VOC Removal from Exhaust Gases by Plasma and Conventional “End-Of-Pipe” Methods. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ENGINEERING. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property*, 2011. p. 1- 5.

ALFONSÍN, C.; LEBRERO, R.; ESTRADA, J. M.; MUÑOZ, R.; KRAAKMAN, N. B.; FEIJOO, G. *et al.* Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: A guideline based on Life Cycle Assessment. *Journal of environmental management*, v. 149, p. 77-84, 2015.

BABAR, Z.B.; SHAREEFDEEN, Z. Management and control of air emissions from electronic industries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 16, n. 1, p. 69-77, 2014.

BABBITT, C.W.; STOKKE, J.M.; MAZYCK, D. W.; LINDNER, A.S. Design-based life cycle assessment of hazardous air pollutant control options at pulp and paper mills: a comparison of thermal oxidation to photocatalytic oxidation and biofiltration. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, v. 84, n. 5, p. 725-737, 2009.

BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**. São Paulo, Saraiva, 2016, 312 p.

BARBUSINSKI, K.; KALEMBA, K.; KASPERCZYK, D.; URBANIEC, K.; KOZIK, V. Biological methods for odor treatment—A review. *Journal of cleaner production*, v. 152, p. 223-241, 2017.

BOLDEN, A.L.; KWIAKOWSKI, C.F.; COLBORN, T. New look at BTEX: are ambient levels a problem? *Environmental science & technology*, v. 49, n. 9, p. 5261-5276, 2015.

BORWANKAR, D.S.; ANDERSON, W.A.; FOWLER, M. *A technology assessment tool for evaluation of VOC abatement technologies from solvent based industrial coating operations*. In: BADILLA, G. L.; VALDEZ, B.; SCHORR, M. ***Air Quality–New Perspective***, p. 1-26, 2012.

BIARD, P.F.; COUDON, A., COUVERT, A., GIRAUDET, S. *A simple and timesaving method for the mass-transfer assessment of solvents used in physical absorption*. ***Chemical Engineering Journal***, v. 290, p. 302-311, 2016.

CHENG, Y.; HE, H., YANG, C., ZENG, G., LI, X., CHEN, H *et al*. *Challenges and solutions for biofiltration of hydrophobic volatile organic compounds*. ***Biotechnology Advances***, v. 34, n. 6, p. 1091-1102, 2016.

COUTINHO, M.; BOTTINI, F. J. **Diálogo Setorial União Europeia/Brasil sobre Gestão da Qualidade do Ar**. Diálogos Setoriais União Europeia/Brasil, 2015, 90 p.

ECE. *Guidance document on control techniques for emissions of sulphur, nitrogen oxides, volatile organic compounds and particulate matter (including PM10, PM2.5 and black carbon) from stationary sources*. Economic and Social Council, 2015, 265 p.

EMIS. LUSS. Disponível em: <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/luss>. Acesso em: 16 set. 2021.

ESTRADA, J.M.; KRAAKMAN, N.B.; MUÑOZ, R.; LEBRERO, R. *A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants*. ***Environmental science & technology***, v. 45, n. 3, p. 1100-1106, 2011.

GUO, Y.; WEN, M.; LI, G.; AN, T. *Recent advances in VOC elimination by catalytic oxidation technology onto various nanoparticles catalysts: a critical review*. ***Applied Catalysis B: Environmental***, n. 119447, 2020.

HELLWEG, S.; DOKA, G.; FINNVEDEN, G.; HUNGERBÜHLER, K. *Assessing the Eco-efficiency of End-of-Pipe Technologies with the Environmental Cost Efficiency Indicator*. ***Journal of Industrial Ecology***, v. 9, n. 4, p. 189-203, 2005.

IULIANELLI, A.; DRIOLI, E. *Membrane engineering: Latest advancements in gas separation and pre-treatment processes, petrochemical industry and refinery, and future perspectives in emerging applications*. ***Fuel Processing Technology***, v. 206, n. 106464, 2020.

JOHNSEN, D.L.; EMAMIPOUR, H.; GUEST, J. S.; ROOD, M. J. *Environmental and economic assessment of electrothermal swing adsorption of air emissions from sheet-foam production compared to conventional abatement techniques*. ***Environmental science & technology***, v. 50, n. 3, p. 1465-1472, 2016.

KAMAL, M.S.; RAZZAK, S.A.; HOSSAIN, M.M. *Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)–A review*. ***Atmospheric Environment***, v. 140, p. 117-134, 2016.

KUMAR, A.; SINGH, D.; KUMAR, K.; SINGH, B.B.; JAIN, V.K. *Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment. Science of the Total Environment*, v. 613, p. 492-501, 2018.

LELIEVELD, J.; EVANS, J.S.; FNAIS, M.; GIANNADAKI, D.; POZZER, A. *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature*, v. 525, n. 7569, p. 367-371, 2015.

LI, X.; MA, J.; LING, X. *Design and dynamic behaviour investigation of a novel VOC recovery system based on a deep condensation process. Cryogenics*, n. 103060, 2020.

LI, X.; ZHANG, L.; YANG, Z.; WANG, P.; YAN, Y.; RAN, J. *Adsorption materials for volatile organic compounds (VOCs) and the key factors for VOCs adsorption process: A review. Separation and Purification Technology*, v. 235, n. 116213, 2020.

LUENGAS, A.; BARONA, A.; HORT, C.; GALLASTEGUI, G.; PLATEL, V.; ELIAS, A. *A review of indoor air treatment technologies. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 14, n. 3, p. 499-522, 2015.

OLIVA, A.G.; ZARRAA, T.; NADDEOA, V.; MUNOZB, R.; LEBREROB, R.; ÁNGELESB, R. *et al. Comparative analysis of AOPs and biological processes for the control of VOCs industrial emissions. Chemical Engineering*, v. 68, 2018.

OMS. *Air pollution*. Disponível em: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Acesso em 29 set. 2021.

PARMAR, G.R.; RAO, N. N. *Emerging control technologies for volatile organic compounds. Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 39, n. 1, p. 41-78, 2008.

PETRUSOVÁ, Z.; MACHANOVÁ, K.; STANOVSKÝ, P.; IZÁK, P. *Separation of organic compounds from gaseous mixtures by vapor permeation. Separation and Purification Technology*, v. 217, p. 95-107, 2019.

RAFAJ, P.; KIESEWETTER, G.; GÜL, T.; SCHÖPP, W.; COFALA, J.; KLIMONT, Z. *et al. Outlook for clean air in the context of sustainable development goals. Global Environmental Change*, v. 53, p. 1-11, 2018.

SAFFARIAN, S. *A LCA study of activated carbon adsorption and incineration in air pollution control*. 2009. 129 f. Dissertação (Master of Science with a Major in Chemical Engineering) - School of Engineering, University of Borås, Borås, 2009.

SCHALTEGGER, S.; STURM, A. *Öologische rationalität (German/in English: environmental rationality). Die Unternehmung*, v. 4, p. 117-131, 1990.

STASIULAITIENE, I.; MARTUZEVICIUS, D.; ABROMAITIS, V.; TICHONOVAS, M.; BALTRUSAITIS, J.; BRANDENBURG, R. *et al. Comparative life cycle*

assessment of plasma-based and traditional exhaust gas treatment technologies. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 1804-1812, 2016.

TOMATIS, M.; MOREIRA, M.T.; XU, H.; DENG, W.; HE, J.; PARVEZ, A.M. *Removal of VOCs from waste gases using various thermal oxidizers: A comparative study based on life cycle assessment and cost analysis in China. Journal of cleaner production*, v. 233, p. 808-818, 2019.

US.EPA (2019). *Volatile Organic Compound (VOC) Control Regulations*. Disponível em: <https://www3.epa.gov/region1/airquality/voc.html>. Acesso em: 13 mai. 2021.

YANG, C.; MIAO, G.; PI, Y.; XIA, Q.; WU, J.; LI, Z.; *et al.* *Abatement of various types of VOCs by adsorption/catalytic oxidation: A review. Chemical Engineering Journal*, v. 370, p. 1128-1153, 2019.

XU, R.; DAI, C.; MU, M.; CHENG, J.; LEI, Z.; WU, B. *et al.* *Highly efficient capture of odorous sulfur-based VOCs by ionic liquids. Journal of Hazardous Materials*, n. 123507, 2021.

ZHANG, Z.; JIANG, Z.; SHANGGUAN, W. *Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: A state-of-the-art review. Catalysis Today*, v. 264, p. 270-278, 2016.

ZHAO, Q.; LI, Y.; CHAI, X.; XU, L.; ZHANG, L.; NING, P. *et al.* *Interaction of inhalable volatile organic compounds and pulmonary surfactant: Potential hazards of VOCs exposure to lung. Journal of hazardous materials*, v. 369, p. 512-520, 2019.

ZHAO, X.; ZHANG, C.; BAI, S. *Eco-Efficiency of End-of-Pipe Systems: An Extended Environmental Cost Efficiency Framework for Wastewater Treatment. Water*, v. 12, n. 2, p. 454, 2020.

ZHU, L.; SHEN, D.; LUO, K.H. *A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods. Journal of Hazardous Materials*, v. 389, p. 102-122, 2020.