



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ANÁLISE CRÍTICA E UMA REVISÃO DOS MÉTODOS DE TRATAMENTO  
DE EFLUENTES COM COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS NA  
INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES**

**IGOR GONÇALVES GALVÃO**

**UBERLÂNDIA - MG**  
**2023**

**IGOR GONÇALVES GALVÃO**

**ANÁLISE CRÍTICA E UMA REVISÃO DOS MÉTODOS DE TRATAMENTO  
DE EFLUENTES COM COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS NA  
INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

**IGOR GONÇALVES GALVÃO**

**ANÁLISE CRÍTICA E UMA REVISÃO DOS MÉTODOS DE TRATAMENTO  
DE EFLUENTES COM COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS NA  
INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 29 de Novembro 2023.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni  
ORIENTADOR  
FEQUI/UFU

---

MSc. Diogo Pimentel de Sá da Silva  
PPGEQ/UFU

---

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira  
PPGEQ/UFU

A Deus.

A minha família, razão de minha existência.

Agradeço ao meu orientador pela paciência e grandes ensinamentos.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

Cora Coralina

## RESUMO

Este documento propõe uma análise detalhada dos métodos de extração e purificação de compostos orgânicos voláteis (VOCs) na fabricação de semicondutores, visando a minimização do impacto ambiental e dos riscos à saúde. Inclui uma revisão da literatura abordando métodos tradicionais e inovadores, seguida por uma análise crítica da eficiência dessas abordagens. Parâmetros de avaliação são estabelecidos para classificar os métodos, considerando eficiência, seletividade e custos associados. A viabilidade comercial é abordada, avaliando aspectos econômicos de acordo com a atual demanda de mercado para os produtos resultantes. Conclui-se destacando a importância do estudo na mitigação dos impactos ambientais, com recomendações para a implementação de práticas sustentáveis na indústria de semicondutores e de sugestões para o potencial desenvolvimento de uma indústria extremamente complexa e de alto valor agregado no cenário brasileiro.

**Palavras-chave:** COVs, Compostos orgânicos voláteis, Indústria 4.0, Indústria de semicondutores no Brasil, Tratamento de resíduos



## **ABSTRACT**

This document proposes a detailed analysis of methods for extracting and purifying volatile organic compounds (VOCs) in semiconductor manufacturing, aiming to minimize environmental impact and health risks. It includes a review of the literature covering traditional and innovative methods, followed by a critical analysis of the effectiveness of these approaches. Evaluation parameters are established to classify methods, considering efficiency, selectivity and associated costs. Commercial viability is addressed, evaluating economic aspects according to current market demand for the resulting products. It concludes by highlighting the importance of the study in mitigating environmental impacts, with recommendations for the implementation of sustainable practices in the semiconductor industry and suggestions for the potential development of an extremely complex and high-value-added industry in the Brazilian scenario.

**Keywords:** VOC's, Volatile organic compounds, Industry 4.0, Semiconductor industry in Brazil, Waste treatment

## **LISTA DE SIGLAS**

BR: Brasil;

PT: Português.

COV ou COVs: Compostos orgânicos voláteis

NTP: Plasma não térmico

IoT: Internet das coisas

OR: Oxidante recuperativo

RTO: Oxidante térmico regenerativo

RCO: Oxidante catalítico regenerativo

## SUMÁRIO

Lista de Figuras .....	i
Lista de Tabelas .....	ii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. VISÃO SOBRE ENGENHARIA .....</b>	<b>3</b>
<b>3. INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES.....</b>	<b>4</b>
3.1 SEMICONDUTOR.....	5
3.2 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS .....	8
3.2.1 A importância dos compostos orgânicos voláteis na indústria .....	9
3.2.2 Riscos com o manuseio de compostos orgânicos voláteis .....	10
<b>4 TRATAMENTO DE EFLUENTES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS ...</b>	<b>12</b>
4.1 TÉCNICAS DESTRUTIVAS .....	13
4.2 TÉCNICAS RECUPERATIVAS .....	15
<b>5. PAPEL DAS TÉCNICAS DE TRATAMENTO EM RELAÇÃO A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES.....</b>	<b>17</b>
5.1 ROTOR ZEÓLITA .....	18
5.2 TRATAMENTO BIOLÓGICO .....	21
5.3 TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO .....	22
5.4 NOVAS ROTAS .....	24
<b>5.4.1 Plasma não térmico .....</b>	<b>24</b>
<b>5.4.2 Obtenção de produto de valor comercial.....</b>	<b>25</b>
<b>6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA LITERATURA.....</b>	<b>27</b>
<b>7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>31</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Países produtores de semicondutor.....	5
Figura 2- Linha de produção de semicondutores.....	6
Figura 3- Wafer.....	7
Figura 4- Chip pronto para montagem na placa de circuito .....	8
Figura 5- Região de oxidação .....	18
Figura 6- Fluxograma do sistema concentrador/oxidante .....	20
Figura 7- Diagrama do sistema experimental.....	23

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1-Dados da literatura de métodos existentes ..... 27

## 1. INTRODUÇÃO

Na intrincada paisagem da indústria de semicondutores, onde a busca incessante por inovação e precisão converge, o tratamento de efluentes torna-se um elemento crítico para assegurar práticas sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Este trabalho inaugura uma exploração abrangente do tratamento de efluentes, com um foco meticuloso nos desafios singulares apresentados pelos Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), cuja presença sutil pode ter implicações significativas na qualidade do ar e na saúde pública.

Segundo Cheng et al. (2021), a indústria de semicondutores, caracterizada por sua alta tecnologia e padrões rigorosos de produção, emerge como um centro vital para a economia global. Neste ambiente meticuloso, onde a precisão atômica é a norma, os processos industriais inevitavelmente geram efluentes, muitos dos quais contêm COVs. Estes, apesar de sua natureza fugaz, exigem uma atenção especial devido à sua potencial contribuição para a formação de poluentes atmosféricos.

De acordo com Zhang et al. (2020), os COVs, como subprodutos inevitáveis de diversas operações industriais, apresentam uma complexidade única. Compostos orgânicos que podem facilmente evaporar, esses elementos desempenham papéis cruciais em diversas aplicações na indústria de semicondutores, desde a fabricação de circuitos integrados até a utilização de solventes em processos específicos. No entanto, sua volatilidade também desencadeia desafios significativos, pois a liberação descontrolada desses compostos pode ter implicações ambientais e para a saúde humana.

O tratamento de efluentes na indústria de semicondutores enfrenta uma encruzilhada desafiadora quando se trata de COVs. A eficácia dos métodos tradicionais muitas vezes é questionada, dada a natureza fugaz e diversidade desses compostos. Estratégias que abrangem desde a remoção de impurezas até a degradação completa dos COVs tornam-se imperativas para mitigar os impactos ambientais e proteger a saúde dos trabalhadores (CHANG et al., 2019; AJMAL et al., 2023).

Como resposta aos desafios apresentados pelos COVs nos efluentes da indústria de semicondutores, uma nova onda de tecnologias emergentes surge. Desde a aplicação de processos de plasma não térmico até abordagens avançadas de oxidação catalítica, a busca por métodos mais eficientes e sustentáveis ganha destaque. Essas inovações buscam não apenas atender às regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, mas também otimizar a

gestão dos efluentes para alinhar-se aos princípios de responsabilidade corporativa e econômica.

Recentemente a crise dos semicondutores, que teve início em 2020 e continuou a impactar diversos setores em 2021 e além, trouxe à tona uma série de desafios e reflexões importantes para o setor tecnológico global. A escassez de semicondutores, peças cruciais para a fabricação de uma variedade de dispositivos eletrônicos, desde automóveis até produtos de consumo, revelou vulnerabilidades no sistema de cadeia de suprimentos e ressaltou a dependência excessiva de determinadas regiões e empresas.

A importância estratégica dos semicondutores na economia moderna, desde veículos autônomos até dispositivos médicos e infraestrutura de rede, esses componentes são essenciais para a inovação e o funcionamento eficiente de uma ampla gama de setores. Portanto, investir em pesquisa e desenvolvimento, bem como em capacidades de produção, tornou-se uma prioridade para muitos governos e empresas.

Este trabalho buscou, portanto, fornecer uma visão holística do tratamento de efluentes de COVs na indústria de semicondutores como seu objetivo geral, desde a compreensão dos desafios inerentes até a exploração das tecnologias emergentes. No que tange aos objetivos específicos, buscou-se estratégias, mediante a classificação da eficiência e confiabilidade dos diversos métodos de separação e purificação, que promovam a eficácia ambiental, a conformidade regulatória e, acima de tudo, a sustentabilidade nesse setor dinâmico e vital para o progresso tecnológico global.

## **2. VISÃO SOBRE ENGENHARIA**

Conforme destacado pela Unesco (2021), a engenharia representa um campo dedicado à resolução sistemática de problemas, visando atender às necessidades humanas básicas por meio de inovações tecnológicas, promovendo assim o desenvolvimento socioeconômico. Nas palavras de Santini (2023), a engenharia é a aplicação de conhecimentos científicos, econômicos, sociais e práticos com o propósito de construir, manter e aprimorar estruturas, máquinas, aparelhos, sistemas, materiais e processos.

A engenharia facilita a aplicação da matemática na geração de bens úteis à sociedade, utilizando os recursos naturais disponíveis. A engenharia desempenha um papel fundamental na concepção de pontes, equipamentos médicos e no desenvolvimento de processos para o tratamento de resíduos tóxicos, assim como na criação de sistemas eficientes para o transporte em massa. Em resumo, a engenharia é essencialmente o processo de produção de produtos técnicos ou sistemas que sejam adequados para resolver questões específicas, conforme destacado por Cocian (2009).

Conforme evidenciado nessa citação, a engenharia encontra aplicação em todas as áreas e é fundamental para a resolução de problemas. Um exemplo prático é o manuseio de recursos naturais, como no processamento de resíduos tóxicos, que são tratados por meio de diversas técnicas, podendo ou não serem reutilizados.

Cocian (2009) enfatiza que a engenharia é a arte da aplicação dos princípios matemáticos, da experiência, do julgamento e do senso comum, buscando implementar ideias e ações em benefício da humanidade e da natureza. Dessa maneira, a engenharia capacita os seres humanos a “domar” os recursos naturais por meio de técnicas que melhoram a qualidade de vida.

Assim, é crucial compreender que a engenharia desempenha um papel indispensável em todas as esferas de nossa vida, desde a produção de alimentos até o desenvolvimento de chips eletrônicos usados nos dias de hoje. Nesse contexto, a engenharia é exemplificada como essencial na trajetória humana em busca de melhores condições de vida.



### 3. INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES

A indústria de semicondutores representa uma narrativa fascinante de inovação, avanços tecnológicos e transformação global. Seu percurso remonta à Primeira Revolução Industrial, balizada por uma sucessão de marcos que transcenderam fronteiras geográficas e temporais. Ao longo das décadas, a indústria de semicondutores emergiu como um pilar essencial para a infraestrutura tecnológica global, desencadeando mudanças sociais, econômicas e culturais.

Conforme Venturelli (2017), a primeira revolução industrial, no século XVIII, inaugurou um período de transformação radical, impulsionado por avanços na manufatura e na maquinaria. Entretanto, foi na virada do século XIX para o XX que as fundações da indústria de semicondutores começaram a ser moldadas. As descobertas pioneiras na eletricidade por cientistas como Michael Faraday e James Clerk Maxwell estabeleceram os alicerces para a revolução elétrica que se desenrolaria.

Segundo Boettcher (2015), o início do século XX viu o advento da eletrônica, com a invenção do tubo de vácuo por John Ambrose Fleming em 1904. No entanto, foi o desenvolvimento do transistor em 1947 pelos cientistas do Bell Labs, John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley, que marcou um ponto de virada decisivo. O transistor, como o primeiro dispositivo semicondutor, substituiu os tubos de vácuo volumosos, inaugurando uma era de miniaturização e eficiência sem precedentes.

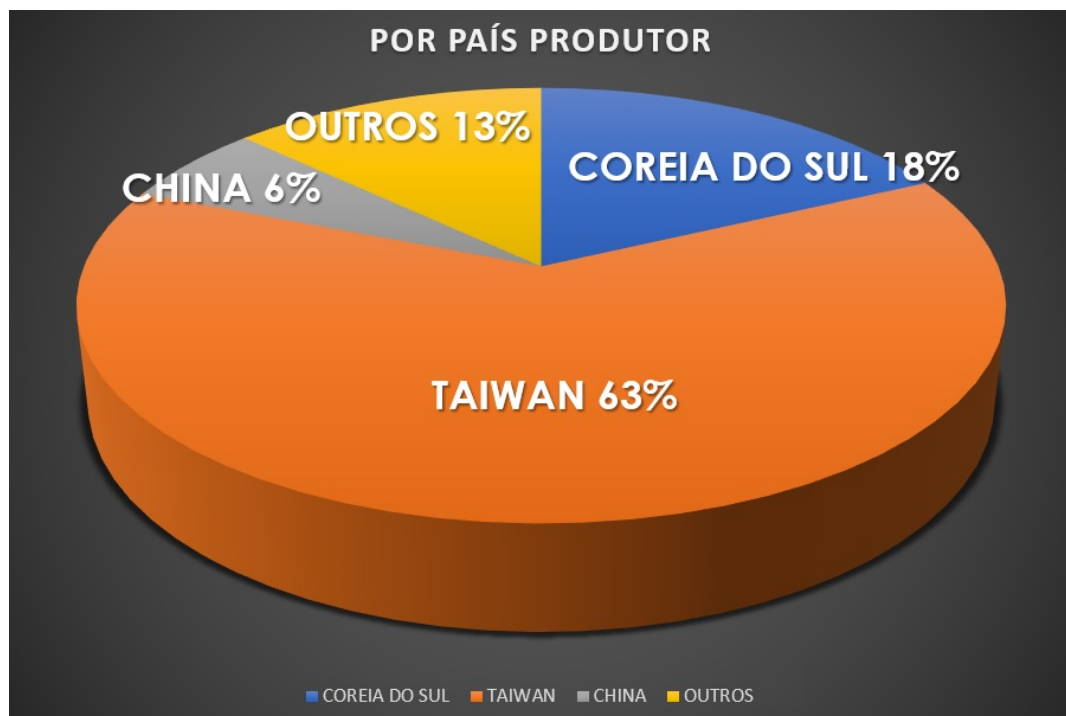
A década de 1960 testemunhou um aumento exponencial na produção de circuitos integrados, com a Lei de Moore de Gordon Moore prevendo corretamente o aumento exponencial na capacidade dos chips semicondutores. Empresas emblemáticas, como Intel e Fairchild Semiconductor, surgiram nesse período, definindo o cenário para a rápida evolução tecnológica que se seguiria.

Nas décadas seguintes, a indústria de semicondutores se expandiu globalmente, encontrando expressão em centros de inovação na Ásia, Europa e América, como descrito na Figura 1.

Avanços como o desenvolvimento de circuitos integrados complexos, a miniaturização de transistores e o advento da tecnologia de wafer de silício solidificaram a posição da indústria no epicentro da revolução digital (Silveira, 2017).

Hoje, a indústria de semicondutores continua a desempenhar um papel central na construção da infraestrutura tecnológica moderna. Desde os microprocessadores que impulsionam computadores até os semicondutores de potência que alimentam veículos elétricos, a influência dessa indústria é onipresente. À medida que a sociedade avança em direção a inovações como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial, a indústria de semicondutores está no epicentro dessa transformação (Silveira, 2017)

Figura 1- Países produtores de semicondutor.



Fonte: Isto é dinheiro (2020).

Em resumo, a trajetória da indústria de semicondutores desde a Primeira Revolução Industrial até os dias de hoje é uma narrativa de adaptação, inovação incessante e impacto global duradouro. Seu papel na formação do mundo moderno é inegável, e seu futuro promete continuadas inovações que moldarão as próximas eras da sociedade digital.

### 3.1 SEMICONDUTOR

Um semicondutor é um material que possui propriedades elétricas intermediárias entre um condutor (que permite facilmente a passagem de corrente elétrica) e um isolante (que não permite a passagem de corrente elétrica). Os semicondutores são fundamentais na fabricação de dispositivos eletrônicos, pois sua condutividade pode ser controlada e manipulada, permitindo a criação de componentes como transistores, diodos e circuitos integrados.

Os semicondutores mais comuns são cristais de silício e germânio, embora outros materiais, como arsenieto de gálio e carbeto de silício, também sejam usados em aplicações específicas.

A fabricação de semicondutores envolve uma série complexa de etapas altamente especializadas, conhecida como processo de fabricação de chips, como é visto na Figura 2, ou fabricação de semicondutores. Neste capítulo descreveu-se os passos básicos.

Figura 2- Linha de produção de semicondutores

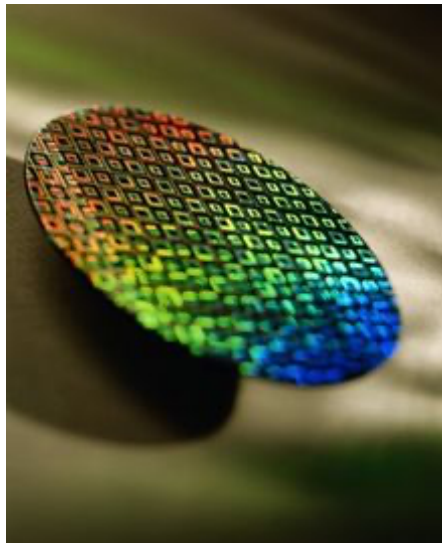


Fonte: ashcroft.com.br

Inicia-se com o crescimento de um cristal de semicondutor de alta pureza. O método mais comum é a epitaxia, onde uma fina camada de cristal é depositada sobre um substrato cristalino.

O cristal é cortado em fatias muito finas chamadas wafers, Figura 3. Os wafers são discos planos que servirão como a base para a fabricação dos chips.

Figura 3- Wafer



Fonte: Wikipedia

Os wafers passam por um rigoroso processo de limpeza para remover impurezas. Em seguida, dopantes (átomos de impurezas controladas) são difundidos no cristal para alterar suas propriedades elétricas.

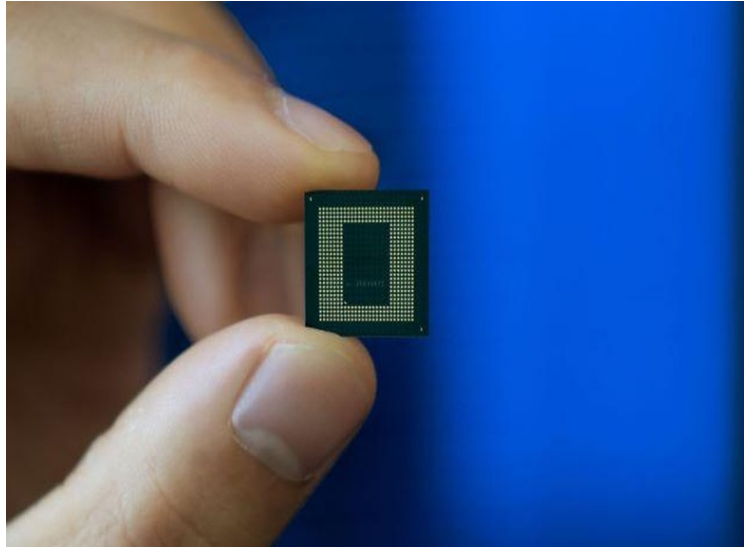
Um padrão detalhado do circuito a ser produzido é desenhado em uma máscara. A litografia é usada para transferir esse padrão para a superfície do wafer por meio de exposição à luz ultravioleta e corrosão química.

Diferentes camadas de materiais são depositadas no wafer para formar os componentes do circuito, como transistores e fios condutores. Métodos comuns incluem deposição química de vapor (CVD) e deposição física de vapor (PVD).

Processos químicos removem camadas não desejadas e esculpem as estruturas desejadas no wafer, formando os componentes do circuito. Íons são implantados no wafer para ajustar as propriedades elétricas das regiões específicas.

Os chips individuais, Figura 4, no wafer são encapsulados em invólucros protetores, e cada chip é testado para garantir sua funcionalidade. Finalmente os chips são montados em placas de circuito, conectados a outros componentes e testados novamente. Este é o estágio final antes da produção em massa.

Figura 4- Chip pronto para montagem na placa de circuito



Fonte: g1.globo.com

Esses passos representam uma simplificação do processo complexo envolvido na fabricação de semicondutores. A tecnologia na fabricação de semicondutores continua a evoluir, visando a criação de chips mais poderosos, eficientes e compactos.

### 3.2 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

Os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) constituem uma categoria ampla de compostos químicos que contêm carbono e se caracterizam por sua volatilidade, ou seja, sua propensão a vaporizar em condições normais de temperatura e pressão. Esses compostos desempenham um papel significativo na química atmosférica e têm relevância em várias indústrias. A definição completa dos COVs envolve vários elementos-chave.

De acordo com Zhang et al. (2020), os COVs são compostos orgânicos, o que significa que contêm carbono em sua estrutura molecular. Além do carbono, frequentemente incluem hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e outros elementos.

Conforme Chang et al. (2019), a característica distintiva dos COVs é sua volatilidade. Isso implica que esses compostos têm a capacidade de evaporar facilmente em condições normais de temperatura e pressão, convertendo-se do estado líquido para o gasoso, geralmente possuem ponto médio de ebulição entre 50 e 250°C.

Eles são emitidos por diversas fontes, incluindo processos naturais, como emissões de vegetação, e atividades humanas, como combustão de combustíveis fósseis, produção industrial, solventes, produtos de consumo e processos químicos.

Devido à sua volatilidade, os COVs podem contribuir para a formação de poluentes atmosféricos, como ozônio troposférico, e estão implicados em problemas de qualidade do ar e saúde humana quando presentes em concentrações elevadas (CHANG et al., 2019; AJMAL et al., 2023).

A categoria de COVs abrange uma ampla variedade de compostos, desde hidrocarbonetos simples, como metano e etano, até compostos mais complexos, como benzeno, tolueno, formaldeído e muitos outros.

Devido aos impactos ambientais e à saúde, muitos COVs são regulamentados em padrões de qualidade do ar. As regulamentações visam controlar as emissões e reduzir a exposição humana a esses compostos (CHENG et al., 2021)

A remoção de COVs é uma consideração importante em várias indústrias. Tecnologias como oxidação térmica, adsorção, catálise, e métodos baseados em plasma são empregados para mitigar as emissões de COVs.

A complexidade e diversidade dos COVs tornam esses compostos uma área significativa de estudo em química atmosférica, ciências ambientais e engenharia. A compreensão completa de sua natureza química, fontes e impactos é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão ambiental (CHENG et al., 2021).

### **3.2.1 A importância dos compostos orgânicos voláteis na indústria**

Os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) desempenham um papel central em diversos setores industriais, impactando processos de produção, qualidade dos produtos e, por vezes, apresentando desafios ambientais. Este capítulo explora a importância dos COVs na indústria, abordando suas aplicações, contribuições para a formação de poluentes atmosféricos, bem como considerações sobre saúde e segurança ocupacional (AJMAL et al., 2023).

Muitos COVs são utilizados como solventes em processos de produção, contribuindo para a fabricação de tintas, vernizes, adesivos e produtos químicos. Além disso, alguns COVs desempenham papéis cruciais como reagentes em sínteses químicas específicas.

A indústria de produtos de consumo, incluindo cosméticos, produtos de limpeza e fragrâncias, emprega COVs em formulações para melhorar propriedades sensoriais e funcionais.

A volatilidade dos COVs contribui para a formação de poluentes atmosféricos, como ozônio troposférico e partículas finas. Logo, o papel dos COVs na poluição atmosférica atmosférica e seu impacto na qualidade do ar é notável.

O aumento das preocupações ambientais levou a regulamentações rigorosas para controlar as emissões de COVs. Discutiremos as estratégias, nos capítulos 4 e 5, de conformidade e as tecnologias de controle de emissões utilizadas pela indústria.

Alguns setores enfrentam desafios relacionados à exposição ocupacional aos COVs, levantando questões de saúde e segurança para os trabalhadores. O subcapítulo 3.2.2 examina os riscos associados à exposição a altas concentrações de COVs.

Este subcapítulo destaca a dualidade dos COVs na indústria, evidenciando suas contribuições essenciais para processos de produção e, ao mesmo tempo, os desafios ambientais e de saúde associados. A compreensão holística da importância dos COVs na indústria é crucial para promover práticas sustentáveis, melhorias na qualidade do ar e proteção da saúde dos trabalhadores.

### **3.2.2 Riscos com o manuseio de compostos orgânicos voláteis**

Segundo Chang et al. (2019), os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) são onipresentes na indústria, desempenhando papéis fundamentais em diversos processos, como foi apresentado. Contudo, sua natureza volátil e propriedades químicas podem apresentar riscos significativos para a saúde ocupacional, segurança e meio ambiente. Este subcapítulo explora de forma abrangente os riscos associados aos COVs na indústria, desde exposições ocupacionais até impactos ambientais e regulamentações de segurança.

Os trabalhadores em ambientes industriais podem ser expostos aos COVs por inalação e absorção cutânea. Avaliaremos os riscos à saúde associados a essas vias de exposição, destacando os efeitos agudos e crônicos.

Os riscos associados à exposição a compostos orgânicos voláteis (COV) incluem reações alérgicas, problemas respiratórios, doenças cardiovasculares e cancro. Os COVs também podem contribuir para a poluição do ar interior e exterior, o que pode ter impactos negativos no ambiente e na saúde humana. Além disso, alguns COVs têm sido associados a distúrbios metabólicos, como obesidade e diabetes. A gravidade destes riscos depende de vários fatores, tais como o tipo de COV, o nível e a duração da exposição e a susceptibilidade do indivíduo ao produto químico (CHANG et al., 2019).

A exposição aos COVs também pode causar sintomas como dores de cabeça, tonturas, náuseas e irritação nos olhos, nariz e garganta. Alguns COVs são conhecidos por serem tóxicos e podem causar danos ao fígado, aos rins e ao sistema nervoso central. A exposição a longo prazo a determinados COV tem sido associada a um risco aumentado de câncer, especialmente em profissões onde os trabalhadores estão expostos a níveis elevados destes produtos químicos (ZHOU et al., 2023).

Os compostos voláteis, segundo Zhou et al. (2023), também contribuem para a formação de poluentes atmosféricos, como o ozônio troposférico, que pode causar problemas respiratórios e agravar condições existentes, como a asma, apresentando riscos para a qualidade do ar e saúde pública, os quais causam impactos ambientais e as consequências para comunidades circunvizinhas de regiões que são fontes emissoras. Logo, os COV podem ter impactos negativos no ambiente, nomeadamente contribuindo para as alterações climáticas e prejudicando os ecossistemas.

Exploraremos medidas de controle industrial posteriormente para reduzir as emissões de COVs, incluindo tecnologias de tratamento de ar para que estejam de acordo com as regulamentações ambientais.

Este capítulo enfatizou a importância crítica de reconhecer e gerenciar os riscos associados aos Compostos Orgânicos Voláteis na indústria. A compreensão desses riscos é vital para promover ambientes de trabalho seguros, minimizar impactos ambientais e garantir conformidade regulatória.



#### **4 TRATAMENTO DE EFLUENTES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS**

Os COVs emitidos por diversas atividades industriais e comerciais e sua presença na atmosfera podem levar a uma série de riscos ambientais e à saúde. Para mitigar estes riscos, é essencial implementar medidas de tratamento adequadas para remover o COV do ar. Segundo Khan et al (2000), teve-se uma visão abrangente das diversas técnicas disponíveis para controlar as emissões de COVs, incluindo suas vantagens, limitações e aplicabilidade. Elas visam auxiliar as indústrias e instalações na seleção das medidas de controle de COV mais adequadas com base em seus requisitos específicos.

Ainda conforme Khan et al (2000), o controle das emissões de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) é uma questão crucial devido ao impacto significativo que estes produtos químicos têm no ambiente e na saúde humana. Essas substâncias podem reagir com outras impurezas na atmosfera para formar compostos que são contraindicados a saúde, uma vez que causam a poluição do ar e as alterações climáticas. Portanto, é essencial implementar medidas de tratamento adequadas para remover o COV do ar e reduzir o seu impacto no meio ambiente e na saúde pública, tornando-as um recurso relacionado para questões, instalações e formulações de políticas que buscam mitigar os riscos associados ao COV e promover o desenvolvimento sustentável.

Atualmente, as práticas para o tratamento de compostos orgânicos voláteis são divididas em duas categorias principais: técnicas de tratamento físico e técnicas de tratamento químico. As técnicas de tratamento físico removem os COVs do ar sem alterar sua composição química, enquanto as técnicas de tratamento químico convertem as substâncias tóxicas em outras inofensivas.

As tecnologias mais comuns incluem a utilização de filtros de carvão ativado, torres de absorção, sistemas de ventilação, reatores de oxidação térmica e reatores de oxidação catalítica.

Conforme explicado acima, foi apresentado uma visão abrangente de diversas técnicas disponíveis, as quais trazem inúmeros benefícios para as regiões ao entorno dos campos industriais em que são aplicadas, tal como a melhora significativa da qualidade do ar.

A seleção da medida adequada depende de diversos fatores, tais como a concentração de COVs emitidas, o tamanho e a complexidade da instalação, os requisitos regulamentares e

as previsões econômicas da medida de controle, então nem sempre os métodos mais complexos e custosos são os ideais.

A modalidade de tratamento de COVs está evoluindo e novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, como a fotocatalise, a eletrooxidação e a biodegradação. Essas novas tecnologias têm o potencial de melhorar significativamente a qualidade do ar e reduzir os impactos ambientais dos COVs.

Em resumo, o tratamento de compostos orgânicos voláteis oferece inúmeras vantagens para a população residente próxima a campos industriais e também para o planeta, entretanto apresenta desafios que precisam ser superados. Ao longo deste capítulo, discutiu-se as práticas atuais, benefícios e desafios e as novas tendências e direções futuras para eliminação dessas substâncias tóxicas.

No entanto, é importante lembrar que o tratamento em si não é uma solução mágica para todos os problemas ambientais, e que é necessário um esforço conjunto de proprietários de fábricas e órgãos legisladores para garantir que a modalidade seja utilizada de forma efetiva e responsável.

#### 4.1 TÉCNICAS DESTRUTIVAS

De acordo com Silva et al. (2011), as técnicas de tratamento destrutivo buscam alterar a estrutura química dos compostos orgânicos voláteis (COVs), seja por meio de processos de oxidação térmica e catalítica, ou pela digestão dos compostos através de microrganismos, como é o caso da biofiltração. A seleção da técnica mais detalhada para o tratamento desses compostos é influenciada por diversos fatores, incluindo a concentração de COVs na corrente gasosa, a taxa de fluxo do processo, os níveis de controle necessários, a presença de contaminantes adicionais no efluente e considerações econômicas. Uma avaliação dos cuidados com as características específicas dos compostos orgânicos e das condições ambientais em que estão presentes é crucial para a escolha da abordagem mais adequada.

##### **Incineração via Chama Direta:**

A incineração via chama direta, realizada por meio de equipamentos conhecidos como flares, posicionados no ponto de emissão dos poluentes, consiste na queima dos COVs em espaços abertos. Este método é aplicado especialmente no tratamento de misturas poluentes

com concentrações elevadas de COVs, podendo exceder o limite inferior de inflamabilidade. Em geral, é utilizado em refinarias de petróleo e indústrias petroquímicas, devido à sua capacidade de lidar com variações substanciais de fluxo. No entanto, sua operação enfrenta desafios associados à radiação térmica, luminosidade, ruído, fumaça e consumo de energia, o que pode impactar a acessibilidade local.

### **Oxidação Térmica:**

A oxidação térmica, ou incineração térmica, destaca-se como um método altamente eficaz para a eliminação de gases e vapores orgânicos. Ampla na indústria de semicondutores, utiliza temperaturas que variam entre 700 e 1000°C, dependendo do tipo e concentração do material a ser tratado. A capacidade dos incineradores varia consideravelmente, situando-se entre 1700 e 850.000  $\frac{m^3}{h}$ , com tempos de residência de 0,5 a 1 segundo. Este método é mais aplicável para correntes gasosas com concentrações de COV superiores a 1000 ppm, oferecendo a vantagem da possibilidade de recuperação de calor, operando, em algumas condições, sem a necessidade de combustível auxiliar (KHAN E GOSHAL, 2000).

### **Oxidação Catalítica:**

Semelhante ao processo térmico, a oxidação catalítica opera em temperaturas mais baixas, entre 300 e 500°C, alcançando velocidades de ocorrências superiores devido ao uso de ocorrências. Os incineradores catalíticos apresentam uma capacidade entre 1000 e 100.000 pés<sup>3</sup>/min, para concentrações entre 100 e 2000 ppm. Uma vantagem significativa desse método é o menor custo operacional, resultando da menor necessidade de combustível auxiliar. No entanto, enfrenta desafios como a disponibilidade do especial e a sensibilidade a temperaturas superiores a 650°C.

### **Biofiltração:**

Desenvolvido originalmente para tratar compostos responsáveis por odores industriais, o processo de biofiltração surge como uma opção de baixo custo e eficiente para a remoção de COVs gerados em diversas atividades. Baseado na capacidade de conversão de microrganismos em substâncias orgânicas em água, dióxido de carbono e biomassa sob condições aeróbias, o biofiltro consiste em um leito embalado envolto por uma microflora imobilizada. O fluxo de ar poluído atravessa o biofilme aquoso, resultando na manipulação de contaminantes gasosos (SILVA et al., 2011).

A análise crítica dessas técnicas ressalta a necessidade de considerar cuidadosamente as especificações específicas de cada processo e as características dos COVs a serem tratados, garantindo uma abordagem eficaz e sustentável para a gestão desses compostos na indústria.

## 4.2 TÉCNICAS RECUPERATIVAS

Conforme destacado por Silva et al. (2011), as técnicas de tratamento físico, também conhecidas como técnicas recuperativas, não promovem alterações na estrutura química dos compostos orgânicos voláteis (COVs). Entre essas técnicas, podemos citar a amostragem, adsorção, condensação e separação por membranas, cada uma com suas características específicas que serão discutidas a seguir.

### **Absorção:**

A análise é um processo que envolve a transferência de um componente gasoso (absorvido), presente na fase gasosa ou gás de retenção, para um líquido (absorvente). No contexto do controle de poluição do ar, a absorção refere-se à remoção de um contaminante gasoso de uma corrente gasosa por meio de sua dissolução em um líquido. Esse processo de transferência de massa ocorre devido a uma diferença de concentração entre os meios envolvidos, sendo influenciado pela solubilidade do soluto. A análise apresenta eficiência significativa, com processos e equipamentos simples que permitem uma ampla faixa de concentração.

### **Adsorção:**

A adsorção é uma técnica aplicada na remoção de impurezas em concentrações relativamente baixas de uma corrente de gás. Nesse processo, as substâncias poluentes são retidas em um sólido com grande área superficial, como carvão ativado ou um material cristalino com alta porosidade interna. As forças intermoleculares desempenham um papel crucial na retenção de poluentes. A adsorção é preferencialmente utilizada quando o poluente é o valor a ser recuperado, em concentrações muito pequenas, quando o poluente não pode ser oxidado ou quando é necessário proteger contra substâncias tóxicas (WEBER, 1992).

### **Condensação:**

A condensação refere-se à liquefação de contaminantes condensáveis por meio de baixas temperaturas. Nesse processo, os compostos são removidos da fase gasosa e resfriados

a uma temperatura na qual sua pressão parcial no fluxo de gás excede seu ponto de orvalho, transformando-se em líquido. A condensação é um método eficaz para reduzir o gás ou vapor em um estado líquido, envolvendo baixas temperaturas e alta pressão para favorecer a redução da energia cinética das moléculas.

### **Separação por Membranas:**

A separação por membranas é uma técnica avançada e amplamente desenvolvida, com cerca de sessenta sistemas de filtração por membranas instaladas para a recuperação de COVs. Essa tecnologia tem sido empregada em indústrias de processos químicos e tratamento de água potável há várias décadas. Embora seja uma técnica relativamente recente, datada da década de 1960, sua aplicação tem se multiplicado para diversos propósitos ao longo do tempo.

Essas técnicas específicas oferecem uma abordagem diversificada para a gestão eficiente de COVs, fornecendo soluções adaptáveis às características específicas das emissões e às condições operacionais em diferentes contextos industriais.

## **5. PAPEL DAS TÉCNICAS DE TRATAMENTO EM RELAÇÃO A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES**

Segundo Zou et al. (2007), a indústria de semicondutores desempenha um papel fundamental nas economias de países como Cingapura, China, Japão e Estados Unidos. O processo de fabricação de wafers é notavelmente complexo, envolvendo mais de 100 etapas, incluindo fotolitografia, gravação, remoção de material, difusão, implantação iônica, deposição, nivelamento de superfície e limpeza, conforme descrito no capítulo 3. Nesse contexto, diversos compostos orgânicos e inorgânicos desempenham um papel crucial no processo de fabricação. Além disso, uma quantidade substancial de água ultrapura é utilizada em várias etapas de enxágue e limpeza, o que resulta na geração de quantidades enormes de águas residuais. Mesmo com esforços consideráveis para modificar processos e adotar substituições químicas a fim de reduzir a poluição ambiental, as águas residuais ainda contêm metais pesados, solventes, ácidos, bases, aditivos e outros compostos orgânicos .

De acordo Yang et al. (2011), os compostos orgânicos voláteis são usados no processo de fabricação de semicondutores para fins específicos em quase todas as etapas. Por exemplo, no processo de gravação, gases ácidos, como ácidos orgânicos, são usados para remover camadas de material da superfície de um wafer. No processo de revestimento fotorresistente, exposição e limpeza de substrato, principalmente solventes orgânicos são usados para limpar e preparar a superfície do wafer para processamento posterior. Estes produtos químicos são essenciais para o processo de fabricação, mas também geram gases residuais que contêm COVs, que acabam sendo liberados no ambiente.

Ainda conforme Yang et al (2011), a oxidação térmica ou catalítica é comumente usada como a técnica de tratamento preferencial na indústria de semicondutores. Devido às baixas concentrações nos gases de escape, a oxidação exige uma quantidade adicional de energia que não pode ser subestimada. Portanto, foi proposta a adoção de um sistema combinado de concentração e oxidação, Figura 5, como uma solução eficaz no âmbito físico-químico, que tem se mostrado viável para auxiliar os emissores de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) a cumprir as regulamentações no âmbito global. Essa combinação demonstra ser mais econômica, eficiente e produz melhores resultados com menores emissões secundárias em comparação com abordagens de oxidação isolada, como o oxidante térmico regenerativo, o oxidante catalítico regenerativo ou os processos de oxidante térmico

catalítico. Para um sistema combinado, o concentrador remove os COV do ar de exaustão e um oxidante mineraliza então o fluxo concentrado dos COV emitidos pelo concentrador.

Não menos importante, como já visto no capítulo anterior, existe também técnicas que envolve a destruição ou recuperação de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) por meios físicos, químicos ou biológicos. Recentemente, os sistemas de biofiltração surgiram como uma tecnologia eficaz e economicamente viável para controlar as emissões de COVs, sendo amplamente utilizados na Europa há vários anos. No entanto, é importante observar que a biofiltração não é adequada para COVs altamente tóxicos e, muitas vezes, requer um tempo de retenção de leito vazio relativamente prolongado.

### 5.1 ROTOR ZEÓLITA

Figura 5- Região de oxidação



Fonte: Yang et al. (2011).

Foram conduzidas várias pesquisas no sentido de investigar a remoção de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) mediante o uso exclusivo de um concentrador de rotor. No entanto, embora tenham sido feitas observações e pesquisas, muitas vezes não ocorreram em uma escala suficientemente ampla para demonstrar completamente o potencial de otimização de um sistema combinado de concentrador/oxidante. Segundo Yang et al.

(2011) o concentrador de rotor, fabricado com diversos materiais adsorventes, muitas vezes representa a opção mais econômica para a concentração de correntes de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) de grande volume e baixa concentração. Este sistema apresenta benefícios notáveis, incluindo uma perda reduzida de pressão, operação contínua em contraste com processos por lotes e custos de manutenção reduzidos.

O aspecto crucial para garantir a eficiência do concentrador é o desempenho do adsorvente escolhido, que é determinado pelos índices-chave de capacidade e fator de taxa na adsorção. Esses parâmetros, juntamente com a expectativa de vida útil do material, desempenham um papel fundamental na seleção dos adsorventes planejados, no projeto e otimização dos processos das unidades de adsorção nas instalações industriais, bem como na análise da previsão econômica a longo prazo (YANG et al.,2011).

Conforme explicado anteriormente, a importância de um bom adsorvente é indiscutível, nesse caso, o mais promissor é a Zeólita, pois é capaz de adsorver grandes quantidades de produtos químicos em um tempo razoavelmente curto, como também possui um baixo risco de inflamabilidade.

O concentrador de rotor em favo de mel utilizando a zeólita, Figura 6, como adsorvente combinada a um oxidante recuperativo mostrou-se uma tecnologia proeminente no tratamento de COVs em parques industriais de semicondutores. O sistema físico-químico funciona primeiro passando o gás residual através de um concentrador de rotor de zeólita em forma de favo de mel, que adsorve os COVs na superfície da zeólita. O rotor então gira e os COVs adsorvidos são desadsorvidos e transferidos para um oxidante recuperativo, onde são oxidados e convertidos em dióxido de carbono e água. O sistema provou ser uma solução viável para o tratamento de gases residuais de COV e permite que os emissores de COV cumpram os regulamentos.

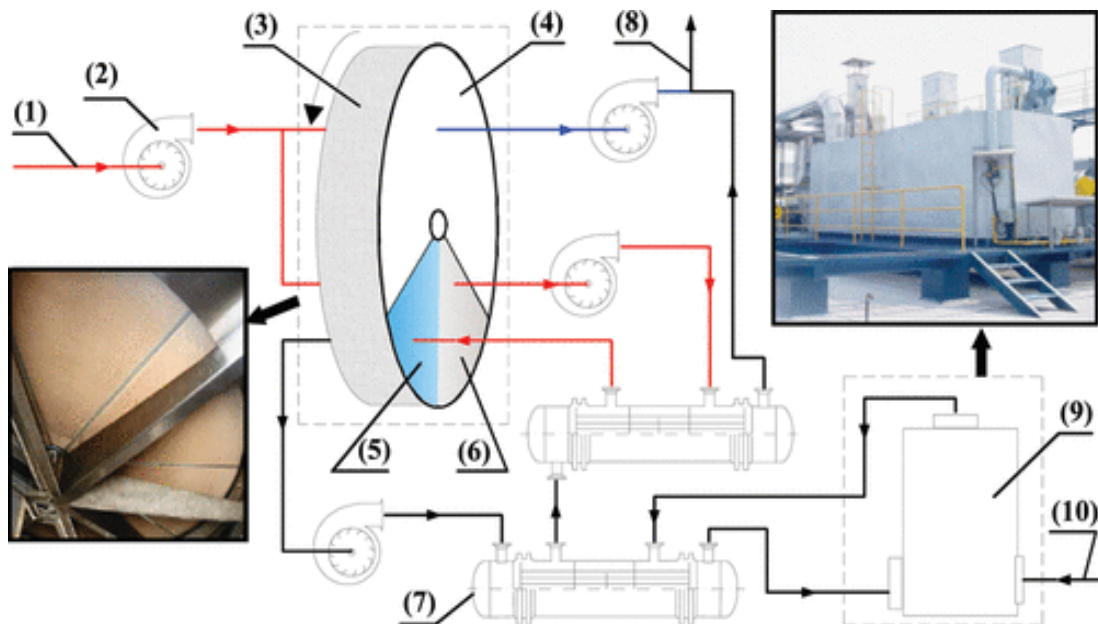
É importante salientar dois pontos críticos que interferem de maneira direta em todo o processo e pode alterar sua eficiência e custo energético, a velocidade do rotor e o tipo de oxidante.

De acordo com Yang et al (2011), uma velocidade de rotação mais alta está associada a um ciclo de adsorção/regeneração mais curto, o que resulta no fornecimento de uma maior quantidade de adsorvente e na remoção das impurezas da zona de processo antes que a saturação de adsorção seja atingida. No entanto, quando a rotação de rotação é elevada, a temperatura do adsorvente não apresenta diferença significativa entre as zonas de adsorção e



recuperação, fazendo com que o rotor aja principalmente como um trocador de calor, em vez de funcionar como um concentrador. Nesse cenário, uma velocidade de rotação mais baixa pode garantir que o adsorvente entre a zona de processo após ser devidamente resfriado na zona de resfriamento anterior.

Figura 6- Fluxograma do sistema concentrador/oxidante



(1. VOCs de entrada, 2. bomba, 3. concentrador de zeólita, 4. seção de adsorção, 5. seção de regeneração, 6. seção de resfriamento, 7. trocador de calor, 8. gás de exaustão, 9. oxidante e 10. combustível para o oxidante).

Fonte : Yang et al. (2011).

O ar concentrado no rotor é eliminado por degradação térmica. Para isso é preciso escolher entre os oxidantes disponíveis no mercado que são oxidante térmico de queima direta (DFTO), oxidante recuperativo (RO), oxidante térmico regenerativo (RTO) e oxidante catalítico regenerativo (RCO), mas como o primeiro tem baixa eficiência e alto custo energético ele é desconsiderado

Conforme verificado a remoção de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) no sistema de concentrador/oxidante do rotor é altamente dependente de fatores como a temperatura do oxidante e a concentração de COVs na entrada. Isso ocorre porque a temperatura de operação e a concentração de COVs na corrente de ar têm um impacto direto tanto na remoção de impurezas quanto no consumo de combustível do sistema, logo esses parâmetros devem estar bem definidos para um projeto adequado.

## 5.2 TRATAMENTO BIOLÓGICO

O purificador úmido é o método mais amplamente adotado nas indústrias de semicondutores devido aos custos iniciais e operacionais relativamente baixos. No entanto, ele gera quantidades significativas de águas residuais orgânicas, contendo COVs, o que torna necessário o uso de processos de pós-tratamento. Segundo Munoz et al. (2015), para lidar com essa questão, diversas tecnologias biológicas têm sido exploradas, tais como biofiltros, filtros biotrickling, bioscrubbers e sistemas de difusão de lodo ativado.

Entretanto, Munoz et al. (2015) afirmam que o procedimento biológico possui algumas desvantagens de tecnologias biológicas para o tratamento de águas residuais, tais como a acumulação de excesso de biomassa causando bloqueio, dificuldade em controlar o crescimento excessivo de biofilme e desempenho instáveis devido às mudanças da comunidade microbiana e da sua atividade.

No entanto, o tratamento biológico de águas residuais contendo COV proveniente de lavadores húmidos pode ser uma aplicação mais fiável, uma vez que as unidades biológicas poderiam ser operadas individualmente para ter melhor controle sobre a atividade biológica (CHENG et al.,2021).

O estudo foi proposto em laboratório utilizando duas águas residuais, de lavadores úmidos, contendo COVs de uma planta funcional em grande escala, uma contendo compostos orgânicos altamente voláteis e a outra contendo compostos orgânicos menos voláteis. Com a utilização de dois biorreatores com leito móvel e um biocarreador de poliuretano comercial, BioNET, em escala laboratorial tratou-se essas águas residuais de forma aeróbica e anóxica, a primeira no efluente contendo compostos orgânicos altamente voláteis e segunda na outra água residual. Ele mostrou que esse processo pode ser eficiente para o tratamento de COVs, especialmente os que possuem alta solubilidade em água. A combinação de purificação úmida

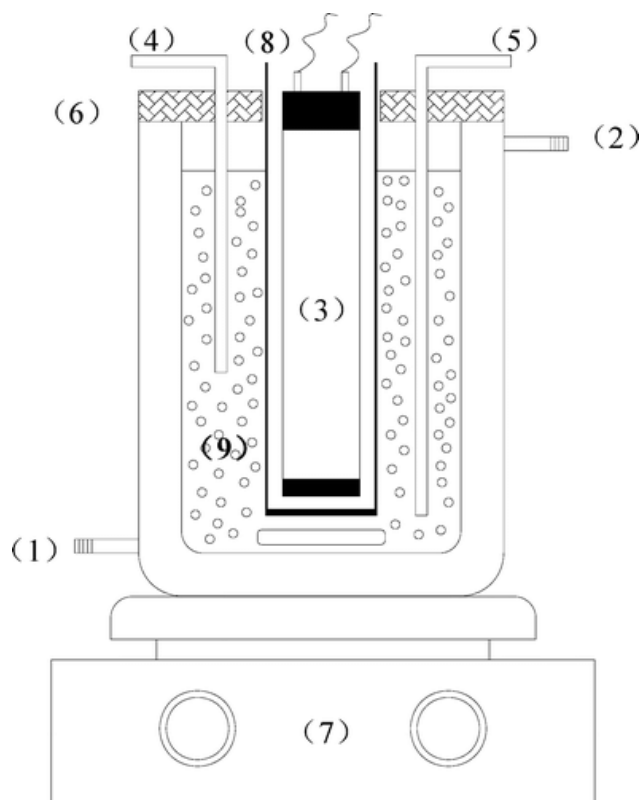
com o tratamento biológico também produz menos dióxido de carbono que os métodos físico-químicos tradicionais (CHENG et al., 2021).

### 5.3 TRATAMENTO FOTOCATALÍTICO

Atualmente, existem diversos métodos de gestão de resíduos na prática, cada um com diferentes graus de eficácia. Esses métodos são agrupados em categorias que oferecem vários níveis de tratamento, incluindo sistemas de tratamento primário, primário avançado, secundário e avançado. Segundo Zou et al. (2007), o objetivo de um processo ideal de tratamento de resíduos é a mineralização completa de todas as espécies tóxicas presentes no fluxo de resíduos, sem gerar resíduos perigosos, e ao mesmo tempo ser economicamente viável. Muitos tratamentos convencionais impedem tratamentos adicionais, o que resulta em custos elevados. Por exemplo, a manipulação biológica não é aplicável a fluxos de resíduos contendo produtos orgânicos extremamente tóxicos.

Ainda conforme Zou et al. (2007), para substâncias poluentes é importante pesquisar outras vias que não requerem tratamento adicional e descobriu-se que a degradação fotocatalítica, como apresentada na Figura 7, poderia ser uma tecnologia eficaz no tratamento de contaminantes altamente concentrados de natureza metal-orgânica nas unidades-chave do processo de fabricação de semicondutores. No seu estudo, foram escolhidos dois compostos químicos orgânicos, o lactato de étila (EL) e o fenol. Esses dois compostos apresentam diferenças notáveis em suas estruturas químicas. Diversos parâmetros cruciais que afetaram o processo de tratamento foram investigados, incluindo a carga de catalisador ( $TiO_2$ ), o pH e a presença ou ausência de oxigênio e presença de metais pesados.

Figura 7- Diagrama do sistema experimental



1. entrada de resfriamento de água; 2. saída de refrigeração a água; 3. Lâmpada UV; 4. porta de amostragem; 5. gás de purga; 6. Cobertura de teflon; 7. agitador magnético; 8. tubo de quartzo; 9.  $TiO_2$  suspenso .

Fonte: Zou et al. (2007).

Percebe-se que a carga de catalisador aumenta a remoção de COVs até o seu ponto ótimo, depois disso qualquer incremento adicional atrapalha a eficiência do mesmo, uma vez que  $TiO_2$  excede a dosagem ideal, ocorre um aumento da turbidez da solução, o que dificulta a passagem de luz UV, e por consequência a reação.

O pH tem grande influência nas propriedades superficiais do catalisador, logo em um efluente multicomponente é preciso saber qual o pH ótimo para a solução, uma vez que trabalhar com a solução fora dessa condição altera a eficiência de remoção.

Por último, a presença de oxigênio inibe a redução de metais pesados, através da eliminação dos elétrons, e sua remoção se dá a partir da precipitação de carbonatos, logo a maior concentração de metais pesados auxilia a descontaminação de COVs.

## 5.4 NOVAS ROTAS

### 5.4.1 Plasma não térmico

Com o decorrer do tempo, os métodos tradicionais de separação e purificação de COVs ficaram obsoletos e novos caminhos precisaram ser seguidos para atingir a máxima eficiência possível. Conforme visto acima as tecnologias já existentes foram combinadas e reinventadas, mas a busca por meios ainda mais eficientes é um fato. Segundo Zhu et al. (2023), métodos mais ou menos convencionais não são adequados para a remoção de COV presentes em baixas concentrações.

Segundo Chen et al. (2009), uma tecnologia emergente e bastante promissora tem sido o uso de plasma não térmico, pois pode ser inflamado e funciona à temperatura ambiente. Logo, nenhum tempo de aquecimento é necessário. Em contraste com a adsorção, o NTP poderia decompor diretamente os COVs, em vez da transferência de fase. A tecnologia tem sido amplamente testada em laboratório e demonstra eficiência na remoção de baixas concentrações de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) de diferentes misturas de gases. Esta eficácia é atribuída à simplicidade do equipamento e à alta energia gerada pelo plasma durante o processo.

Um plasma gerado produz elétrons de alta energia e radicais livres, que promovem a decomposição das moléculas de COV em moléculas menores por colisão física e então essas moléculas são removidos por oxidação (Zhu et al.,2023).

Uma prática desenvolvida foi a catálise plasmática, essa técnica combina as vantagens da alta seletividade da catálise e da rápida ignição/resposta da técnica de plasma a temperatura ambiente. Ela foi dividida em estágio único, na qual se integra plasma não térmico e catálise no mesmo reator, e 2 estágios, em que a localização do reator de plasma em relação ao catalisador pode ser dividida em duas categorias principais: pré-processamento de plasma e pós-processamento de plasma.

Para a catálise plasmática de estágio único a maior dificuldade é estabelecer qual catalisador é o ideal, como também qual entre a catálise e o plasma tem o seu protagonismo evidente no método, pois se o plasma é o principal responsável pela remoção de poluentes, o trabalho adicional deve ser focado na compreensão de como as propriedades dos catalisadores

influenciam as características do plasma. Por outro lado, se a catálise desempenha um papel mais importante, deve-se focar em como aumentar a atividade catalítica por descarga plasmática.

Em termos de catálise plasmática de 2 estágios, como o catalisador é bem definido, pois deve decompor ozônio e formar espécies reativas de oxigênio para remover COVs. A dificuldade do método é evitar a produção de outras substâncias que atrapalhem a catálise.

#### 5.4.2 Obtenção de produto de valor comercial

A acetona, amplamente utilizada na indústria, é produzida principalmente pela oxidação do cumeno sintetizado a partir de benzeno e propileno. A oxidação catalítica seletiva do isopropanol em acetona é um método complementar crucial. O estudo examina nano catalisadores de ouro (Au) apoiados por nano folhas de  $\alpha - Fe_2O_3$  para a oxidação catalítica selecionada de isopropanol em acetona, abordando um método econômico e sustentável para o controle de COVs.

A oxidação catalítica, método tradicional de purificação, completa a oxidação de COVs em  $CO_2$  e  $H_2O$  sem poluição secundária. Catalisadores de metais nobres suportados em óxidos metálicos, como Au, Pt e Pd, destacam-se devido às suas excelentes atividades em baixas temperaturas. No entanto, o seu uso exige grandes investimentos. Nesse cenário, a pesquisa procura desenvolver métodos eficientes para o tratamento da poluição atmosférica, alinhados com benefícios econômicos (ZHANG et al., 2020)

Os estudos de Zhang et al. (2020) revelam que nanopartículas de Au suportadas em óxidos de metais de transição, apresentam notável atividade catalítica.  $\alpha - Fe_2O_3$ , modificado por nanopartículas de Au, destaca-se devido a suas diversas morfologias, sendo amplamente utilizado como heterogêneo.

Segundo Zhang et al. (2020), apresenta informações sobre um método de utilização de recursos para reduzir as emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) da indústria de semicondutores. O estudo concentra-se na oxidação catalítica seletiva do isopropanol para acetona sobre nanofolhas de Au/ $\alpha - Fe_2O_3$ . A pesquisa foi conduzida por uma equipe de especialistas de diversas universidades e instituições na China, Taiwan e nos Estados Unidos.

O estudo destaca os benefícios do uso da oxidação catalítica seletiva para reduzir as emissões de COVs na indústria de semicondutores. O método é eficaz, eficiente e

ecologicamente correto, convertendo COVs relevantes em produtos úteis, como a acetona que é economicamente viável e aplicável em diversas rotinas industriais.

A equipe de pesquisa preparou nanofolhas de  $\alpha -Fe_2O_3$  apoiadas por nano folhas de Au e investigou seu desempenho e mecanismo para a oxidação catalítica selecionada de isopropanol em acetona. Os resultados mostraram que as folhas de Au apoiadas pelo óxido metálico em questão, mostraram desempenho notável em várias reações importantes, incluindo oxidação de CO e reações de deslocamento água-gás.

Ainda conforme Zhang et al. (2020), detalhes sobre a preparação e caracterização dos catalisadores de nanofolhas  $Au/\alpha -Fe_2O_3$ , utilizou-se técnicas como difração de raios X, microscopia eletrônica de transmissão e espectroscopia de fotoelétrons de raios X para analisar a estrutura e propriedades da combinação.

A discussão inclui o mecanismo de oxidação catalítica seletiva do isopropanol em acetona sobre os catalisadores de nanofolhas  $Au/\alpha -Fe_2O_3$ , apresentando um modelo proposto com base em resultados experimentais e cálculos teóricos. Além disso, são fatores envolvidos que influenciam o desempenho dos eventos, como carga de Au, temperatura de ocorrência e taxas de fluxo de gás, bem como estabilidade e reutilização.

Concluiu-se com uma análise das aplicações potenciais do método na indústria de semicondutores e em outros setores industriais, destacando a conversão de diversos COVs em produtos úteis, como aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos.

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA LITERATURA

A variedade de métodos disponíveis reflete a complexidade das aplicações e a diversidade dos COVs presentes em ambientes industriais e urbanos. Neste contexto, a comparação de técnicas de separação de COVs torna-se essencial para identificar a abordagem mais adequada em termos de eficiência, seletividade e aplicabilidade prática.

Nesta análise da literatura, exploraremos e contrastaremos as técnicas de separação de COVs, como veremos na Tabela 1, com foco nas indústrias de semicondutores apresentadas no capítulo anterior, destacando suas características distintivas e aplicabilidades específicas para proporcionar uma compreensão dessas ferramentas críticas na gestão da qualidade do ar.

**Tabela 1-Dados da literatura de métodos existentes**

<b>Técnica</b>	<b>Eficiência remoção (%)</b>	<b>T operação (°C)</b>	<b>Custo (<math>\frac{\\$}{(m^3.h)}</math>)</b>	<b>Resíduo gerado</b>
<b>Incineração térmica</b>	90-98	500-1100	13-88	Produtos de combustão
<b>Incineração catalítica</b>	90-98	220-480	13-53	Produtos de combustão
<b>Biofiltração</b>	80-99	50-105	13-44	Biomassa
<b>Condensação</b>	70-85	Ambiente	12-71	Condensado
<b>Absorção</b>	90-99	Não há limite	15-71	Água residual
<b>Adsorção</b>	90-99	< 50	6-21	Orgânicos coletados
<b>Membrana</b>	>90	Ambiente	13-18	Membranas exauridas

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2011).



A oxidação ou incineração catalítica é uma técnica tradicionalmente eficaz na remoção de COVs convertendo-os em produtos, como  $CO_2$  e  $H_2O$ , assim como a incineração térmica, mas a última possui o custo energético muito elevado e uma faixa de custo/metros cúbicos maior. Logo, essa escolha torna-se obsoleta.

Catalisadores à base de metais nobres, como Au, Pt e Pd, suportados em óxidos metálicos, demonstraram excelente atividade catalítica conforme explicado no capítulo anterior em baixas temperaturas. No entanto, a necessidade de grandes investimentos pode limitar a sua aplicação de fato.

Materiais adsorventes, como zeólitas e carvão ativado, têm sido extensivamente treinados para capturar COVs através de interações físicas e químicas. A eficácia da adsorção depende da seleção adequada do adsorvente, considerando a natureza dos COVs. O desempenho pode variar de acordo com a concentração e composição específica dos compostos.

Membranas poliméricas foram exploradas para separar COVs com base em diferenças nas propriedades de solubilidade. Essa abordagem apresenta seletividade promissora, mas desafios relacionados à durabilidade e seletividade frente a diferentes COVs precisam ser endereçados para aplicações práticas.

A utilização de tecnologias de plasma, como reatores de descarga por barreira dielétrica (DBD), tem demonstrado potencial na remoção de baixas concentrações de COVs. O plasma gera espécies reativas que promovem a acomodação dos COVs. Contudo, a eficácia pode depender das condições do reator e das características específicas dos COVs.

A combinação de plasma e catálise foi explorada para melhorar a eficiência na remoção de COVs. A escolha entre plasma e catálise como componente dominante ainda requer esclarecimento sobre o papel mais crucial na remoção eficaz de COVs.

A literatura destacou a diversidade de abordagens para a separação de COVs, diminuindo que não há uma solução única. A escolha da técnica deve considerar a natureza específica dos COVs, as condições do ambiente e os requisitos práticos. Além disso, a integração de tecnologias emergentes e a pesquisa contínua são essenciais para avançar nas estratégias para mitigar os impactos ambientais.

## 7 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

A crise de 2020 mostrou uma necessidade urgente de diversificação das cadeias de abastecimento. A concentração significativa da produção de semicondutores em poucas empresas e países tornou-se suficientemente suscetível a danos indiretos, como os causados pela pandemia de COVID-19 e outros eventos inesperados. Dessa forma, é imperativo que empresas e governos considerem estratégias que promovam uma distribuição mais equitativa da produção e reduzam a vulnerabilidade a choques externos.

A importância estratégica dos semicondutores na economia moderna, desde veículos autônomos até dispositivos médicos e infraestrutura de rede, esses componentes são essenciais para a inovação e o funcionamento eficiente de uma ampla gama de setores. Portanto, investir em pesquisa e desenvolvimento, bem como o tratamento de resíduos dessa indústria, tornou-se uma prioridade para muitos governos e empresas.

A abordagem abrangente e inovadora no tratamento de Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) na indústria de semicondutores é vital para promover práticas sustentáveis e mitigar os impactos ambientais. A complexidade dos COVs exige estratégias eficazes que vão além dos métodos tradicionais como visto nos capítulos anteriores.

A utilização de rotores zeolíticos destaca-se pela capacidade de adsorção seletiva, proporcionando uma eficiente remoção de COVs presentes nos efluentes industriais. A volatilidade intrínseca dos COVs é gerenciada de maneira eficiente pelo rotor zeólita, enquanto a oxidação subsequente garante uma redução significativa do potencial impacto ambiental, mas perde eficácia ao operar em altas concentrações.

Por sua vez, a eficácia do tratamento biológico reside na capacidade dos microrganismos em metabolizar os COVs, convertendo-os em produtos menos nocivos, entretanto, sua alta capacidade de conversão está intimamente atrelada ao comportamento desses seres microscópicos, o que torna esse método imprevisível e de difícil manutenção.

Por último, a utilização de processos fotocatalíticos destaca-se pela capacidade de degradar COVs de forma rápida e completa. A eficácia do tratamento fotocatalítico não apenas atende às normativas ambientais cada vez mais exigentes, mas também proporciona uma solução tecnologicamente avançada para os desafios específicos enfrentados pela indústria de semicondutores, mas sua implementação gera altos custos, pois os parâmetros de operação do leito devem estar sempre extremamente próxima de uma condição ótima .

Logo, a escolha da técnica correta envolve diversos fatores durante a operação em si, como a natureza específica dos compostos voláteis, quanto a sua toxicidade, o volume e a concentração dos COVs na corrente a ser tratada, e não menos importante as condições ambientais que ditarão a legislação da região. .

Este trabalho visou incentivar a pesquisa e desenvolvimento de uma indústria altamente especializada no Brasil, em busca de soluções inovadoras e não menos importante, sustentáveis. Por isso, foi visto de maneira abrangente nos capítulos anteriores métodos e técnicas de separação para os poluentes gerados por essa indústria.

Por fim, como sugestão, seria interessante pesquisar e experimentar cada um dos métodos tratados no capítulo 5, atrelado as legislações brasileiras como também o ambiente industrial ao qual estamos inseridos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJMAL, Z., NACIRI, Y., AHMAD, M., HSINI, A., BOUZIANI, A., LAABD, M., ... & DJELLABI, R. Use of conductive polymer-supported oxide-based photocatalysts for efficient VOCs & SVOCs removal in gas/liquid phase. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 108935, 2023.
- BOETTCHER, M. **Revolução Industrial -Um pouco de história da Indústria 1.0 até a Indústria 4.0.** 2015. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-um-pouco-de-hist%C3%B3ria-da-10-at%C3%A9-boettcher>>. Acesso em: 22, novembro de 2023.
- CHANG, T. Y., LIU, C. L., HUANG, K. H., & KUO, H. W. Indoor and outdoor exposure to volatile organic compounds and health risk assessment in residents living near an optoelectronics industrial park. **Atmosphere**, v. 10, n. 7, p. 380, 2019.
- CHEN, H. L., LEE, H. M., CHEN, S. H., CHANG, M. B., YU, S. J., & LI, S. N. Removal of volatile organic compounds by single-stage and two-stage plasma catalysis systems: a review of the performance enhancement mechanisms, current status, and suitable applications. **Environmental science & technology**, v. 43, n. 7, p. 2216-2227, 2009.
- CHENG, H. H., LU, I. C., HUANG, P. W., WU, Y. J., & WHANG, L. M. Biological treatment of volatile organic compounds (VOCs)-containing wastewaters from wet scrubbers in semiconductor industry. **Chemosphere**, v. 282, p. 131137, 2021.
- COCIAN, L. F. E. **Descobrimos a engenharia: A profissão.** 2009. Disponível em: <[https://www.google.com.br/books/edition/Descobrimos\\_a\\_Engenharia\\_A\\_Profiss%C3%A3o/wmy674GbIEUC?hl=pt-BR&gbpv=0](https://www.google.com.br/books/edition/Descobrimos_a_Engenharia_A_Profiss%C3%A3o/wmy674GbIEUC?hl=pt-BR&gbpv=0)> Acesso em: 22, novembro de 2023.
- DA SILVA, V. P.; DA ROCHA, F. W. Comparação entre as técnicas dos compostos orgânicos voláteis. 2011.
- KHAN, F.I., GHOSHAL, A.K. Removal of volatile organic compounds from polluted air. **Journal of loss prevention in the process industries**, v.13, pp.527-545, 2000.
- SANTINI, E. **O que é engenharia de produção.**2023. Disponível em: <<https://hs.toledoprudente.edu.br/blog/o-que-e-engenharia-de-producao#:~:text=Al%C3%AAs%20chamamos%20de%20Engenharia%20a,%20%20sistemas%20materiais%20e%20processos.>> Acesso em: 22, novembro de 2023.
- SILVEIRA, C. B. **O que é a Indústria 4.0 e como ela vai impactar o mundo.** Citisystems. 2017. Disponível em:<<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Acesso em: 22, novembro de 2023.
- UNESCO. **Engineering for sustainable development: executive summary.** 2021. Disponível em: < [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375634\\_por](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375634_por)> Acesso em: 22, novembro de 2023.
- VENTURELLI, M. **Indústria 4.0: uma visão da automação industrial.** ] 2017. Disponível em:< <https://www.automacaoindustrial.info/industria-4-0-uma-visao-da-automacao-industrial/>>. Acesso em: 22, novembro de 2023.
- WEBER, W.J. **Physico-chemical process for water quality control.** USA: John Wiley & Sons, 1992.

- YANG, J., CHEN, Y., CAO, L., GUO, Y. E JIA, J. Development and field-scale optimization of a honeycomb zeolite rotor concentrator/recuperative oxidizer for the abatement of volatile organic carbons from semiconductor industry. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 1, p. 441-446, 2012.
- ZHANG, H., DAI, L., FENG, Y., XU, Y., LIU, Y., GUO, G., ... & DENG, J. A Resource utilization method for volatile organic compounds emission from the semiconductor industry: selective catalytic oxidation of isopropanol to acetone over Au/ $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanosheets. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 275, p. 119011, 2020.
- ZHOU, X., ZHOU, X., WANG, C. & ZHOU, H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review. **Chemosphere**, p.137489, 2022
- ZHU, X., WANG, T., SERAGELDIN, M. A., & PAN, W. P. Removal of Volatile Organic Compounds from Coal-Fired Power Plants Using Nonthermal Plasma Generated by a Dielectric Barrier Discharge Reactor: Carbon Yield and Application Feasibility. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 62, n. 38, p. 15434-15448, 2023.
- ZOU, S.W.; HOW, C.W.; CHEN, J. P. Photocatalytic treatment of wastewater contaminated with organic waste and copper ions from the semiconductor industry. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 46, n. 20, p. 6566-6571, 2007. 3.