

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL**

**THAMIRES INGRID LOPES PIMENTA**

**O ESTUDO DA COMBUSTÃO: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

**JOÃO PESSOA  
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL**

**THAMIRES INGRID LOPES PIMENTA**

**O ESTUDO DA COMBUSTÃO: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Química Industrial da Universidade Federal da Paraíba como requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

**Orientador:** Prof. Dr. Rennio Felix de Sena.

**JOÃO PESSOA  
2024**

**Catálogo na publicação  
Seção de Catalogação e Classificação**

P644e Pimenta, Thamires Ingrid Lopes.

O estudo da combustão: uma revisão de literatura /  
Thamires Ingrid Lopes Pimenta. - João Pessoa, 2024.  
49 f. : il.

Orientação: Rennio Felix de Sena.  
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Combustão. 2. Combustível. 3. Comburente. I.  
Sena, Rennio Felix de. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

**THAMIRES INGRID LOPES PIMENTA**

**O ESTUDO DA COMBUSTÃO: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Química Industrial da Universidade Federal da Paraíba como requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Industrial.

Aprovado em: 30 de abril de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**



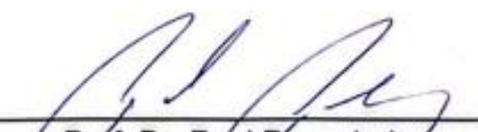
---

Prof. Dr. Rennio Felix de Sena  
Orientador – Universidade Federal da Paraíba



---

Prof. Dr. Leopoldo Oswaldo Alcazar Rojas  
Universidade Federal da Paraíba



---

Prof. Dr. Raul Rosenhaim  
Universidade Federal da Paraíba

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Deus porque sem Ele nada seria possível. Eu sou extremamente grata por tudo o que conquistei e por todas as bênçãos que recebi. Sem o Senhor nada seria possível.

Eu gostaria de expressar minha gratidão à razão da minha motivação diária, minha filha Júlia, e também ao meu esposo Mateus. Sem o apoio e o amor de vocês, esta conquista não teria sido possível. Obrigada por terem me ajudado a tornar esse desafio mais fácil de superar.

Aos meus pais, avós e irmãos por seu amor e incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Às minhas amigas Ana Paula, Bianca, Joana, Suwelane, Suiellen e Victória por estarem sempre ao meu lado, compartilhando não apenas os desafios, mas também as alegrias dessa jornada.

À Universidade Federal da Paraíba por proporcionar um ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento de pesquisas e estudos.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador, Professor Rennio, por sua orientação dedicada e valiosas sugestões ao longo deste processo.

Agradeço também aos membros da banca examinadora por dedicarem seu tempo e expertise na avaliação deste trabalho.

Sem o apoio e encorajamento de todos vocês, esta conquista não seria possível. Obrigada pelo apoio e por fazerem parte desta jornada tão significativa em minha vida.

PIMENTA, Thamires Ingrid Lopes. **O estudo da combustão**: uma revisão de literatura. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) - Universidade Federal da Paraíba, 2024.

## RESUMO

**Introdução:** a combustão é definida como uma reação química entre combustível e comburente, liberando energia na forma de calor e luz. Essa reação é crucial em diversos setores, como transporte, geração de energia elétrica, processos industriais, entre outros. Diante disso, torna-se relevante o estudo da combustão para otimização de processos industriais, controle de emissões poluentes, aumento da eficiência energética e segurança operacional. **Objetivo:** buscar evidências científicas sobre o processo de combustão. **Método:** a revisão de literatura adotou uma abordagem sistemática para reunir, analisar e sintetizar diversas fontes relevantes sobre o tema da combustão. A busca foi conduzida em bases de dados acadêmicos e páginas oficiais de órgãos associados ao governo brasileiro. Foram selecionadas 41 obras com base em critérios de qualidade metodológica, relevância e contribuição para o tema. Os dados foram organizados por temas e subtemas, seguidos por uma análise comparativa para identificar lacunas, tendências e consensos na literatura. As informações foram então sintetizadas para oferecer uma visão abrangente do conhecimento atual sobre o assunto. Todas as fontes foram devidamente citadas e referenciadas conforme as normas acadêmicas, mantendo a integridade acadêmica e evitando o plágio. **Resultados:** o estudo da combustão foi dividido em oito tópicos e seus respectivos subtópicos: Combustão; Reagentes da combustão; Excesso de ar; Combustão espontânea; Ponto de fulgor, combustão e ignição; Estrutura da chama; Poder calorífico e; Produtos da combustão. **Conclusões:** as evidências científicas selecionadas ofereceram uma visão ampla da combustão, destacando sua importância na geração de energia, sistemas de transporte e indústrias, além de ressaltar os impactos negativos como poluição ambiental e riscos à saúde.

**Palavras-chave:** Combustão; Combustível; Comburente.

PIMENTA, Thamires Ingrid Lopes. **The study of combustion:** a literature review. Course Completion Work (Bachelor's Degree in Industrial Chemistry) - Federal University of Paraíba, 2024.

## ABSTRACT

**Introduction:** combustion is defined as a chemical reaction between fuel and oxidant, releasing energy in the form of heat and light. This reaction is crucial in several sectors, such as transportation, electricity generation, industrial processes, among others. Therefore, the study of combustion becomes relevant for optimizing industrial processes, controlling pollutant emissions, increasing energy efficiency and operational safety. **Objective:** seek scientific evidence about the combustion process. **Method:** the literature review adopted a systematic approach to gather, analyze and synthesize several relevant sources on the topic of combustion. The search was conducted in academic databases and official pages of bodies associated with the Brazilian government. 41 works were selected based on criteria of methodological quality, relevance and contribution to the topic. The data was organized by themes and subthemes, followed by a comparative analysis to identify gaps, trends and consensus in the literature. The information was then synthesized to provide a comprehensive overview of current knowledge on the subject. All sources were duly cited and referenced in accordance with academic standards, maintaining academic integrity and avoiding plagiarism. **Results:** the study of combustion was divided into eight topics and their respective subtopics: Combustion; Combustion reagents; Excess air; Spontaneous combustion; Flash point, combustion and ignition; Flame structure; Calorific value and; Combustion products. **Conclusions:** the selected scientific evidence offered a broad view of combustion, highlighting its importance in energy generation, transport systems and industries, in addition to highlighting negative impacts such as environmental pollution and health risks.

**Keywords:** Combustion; Fuel; Oxidizing.

PIMENTA, Thamires Ingrid Lopes. **El estudio de la combustión:** una revisión de la literatura. Trabajo de Finalización de Curso (Licenciatura en Química Industrial) - Universidad Federal de Paraíba, 2024.

## RESUMEN

**Introducción:** la combustión se define como una reacción química entre un combustible y un oxidante, liberando energía en forma de calor y luz. Esta reacción es crucial en varios sectores, como el transporte, la generación de electricidad, los procesos industriales, entre otros. Por tanto, el estudio de la combustión cobra relevancia para optimizar los procesos industriales, controlar las emisiones contaminantes, aumentar la eficiencia energética y la seguridad operativa. **Objetivo:** buscar evidencia científica sobre el proceso de combustión. **Método:** la revisión de la literatura adoptó un enfoque sistemático para recopilar, analizar y sintetizar varias fuentes relevantes sobre el tema de la combustión. La búsqueda se realizó en bases de datos académicas y páginas oficiales de órganos vinculados al gobierno brasileño. Se seleccionaron 41 trabajos con base en criterios de calidad metodológica, relevancia y aporte al tema. Los datos se organizaron por temas y subtemas, seguido de un análisis comparativo para identificar brechas, tendencias y consensos en la literatura. Luego, la información se sintetizó para proporcionar una descripción general completa del conocimiento actual sobre el tema. Todas las fuentes fueron debidamente citadas y referenciadas de acuerdo con los estándares académicos, manteniendo la integridad académica y evitando el plagio. **Resultados:** el estudio de la combustión se dividió en ocho temas y sus respectivos subtemas: Combustión; Reactivos de combustión; Exceso de aire; Combustión espontánea; Punto de inflamación, combustión e ignición; Estructura de llama; Valor calorífico y; Productos de combustión. **Conclusiones:** la evidencia científica seleccionada ofreció una visión amplia de la combustión, destacando su importancia en la generación de energía, los sistemas de transporte y las industrias, además de resaltar impactos negativos como la contaminación ambiental y los riesgos para la salud.

**Palabras clave:** Combustión; Combustible; Oxidante.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b>	Chama de pré-mistura.....	25
<b>Figura 2</b>	Chama de difusão estável (A) e turbulenta (B).....	26
<b>Figura 3</b>	Estrutura da chama.....	27
<b>Figura 4</b>	Formação do <i>smog</i> industrial na cidade de Pequim, China (A), formação do <i>smog</i> fotoquímico na cidade de São Paulo, Brasil (B).	40
<b>Figura 5</b>	Esquema dos componentes básicos de uma CCM.....	41

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	Fontes geradoras de poluição.....	31
<b>Quadro 2</b>	Fontes naturais e antropogênicas de material particulado.....	34
<b>Quadro 3</b>	Relação da concentração de COV x efeito.....	39

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Principais gases constituintes da atmosfera.....	19
<b>Tabela 2</b>	Frações molares ( $X_i$ ) e massas moleculares ( $M_i$ ) dos compostos O <sub>2</sub> e N <sub>2</sub> .....	20
<b>Tabela 3</b>	Pontos de referência de alguns combustíveis.....	24
<b>Tabela 4</b>	Poder Calorífico de alguns gases.....	29
<b>Tabela 5</b>	Padrões nacionais de qualidade do ar para o SO <sub>x</sub> , como SO <sub>2</sub> .....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
R	Reação
X	Fração Molar
M <sub>i</sub>	Massa Molecular
AC	Razão ar-combustível
CA	Razão combustível-ar
CCM	Célula combustível microbiológica
E	Equação
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
°C	Grau Celsius
kg	Quilograma
kcal	Quilocaloria
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
n <sup>o</sup>	Número
MP	Material Particulado
PTS	Partículas Totais em Suspensão
MP <sub>10</sub>	Partículas Inaláveis
MP <sub>2,5</sub>	Partículas Inaláveis Finas
µm	Micrómetro
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
pH	Potencial Hidrogeniônico
PROCONVE	Programa De Controle De Emissões Veiculares
PI	Padrões de Qualidade do Ar Intermediários
PF	Padrão de Qualidade do Ar Final
OMS	Organização Mundial da Saúde
µg	Micrograma
mg	Miligrama

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
<b>5.1</b>	<b>Combustão.....</b>	<b>17</b>
<b>5.2</b>	<b>Reagentes da combustão.....</b>	<b>18</b>
5.2.1	<i>Combustível.....</i>	18
5.2.2	<i>Comburente.....</i>	19
<b>5.3</b>	<b>Excesso de ar.....</b>	<b>20</b>
<b>5.4</b>	<b>Combustão espontânea.....</b>	<b>22</b>
<b>5.5</b>	<b>Ponto de fulgor, combustão e ignição.....</b>	<b>23</b>
<b>5.6</b>	<b>Estrutura da chama.....</b>	<b>24</b>
5.6.1	<i>Tipos de chama.....</i>	25
5.6.2	<i>Estrutura da chama.....</i>	26
<b>5.7</b>	<b>Poder calorífico.....</b>	<b>27</b>
<b>5.8</b>	<b>Produtos da combustão.....</b>	<b>30</b>
5.8.1	<i>Monóxido de carbono.....</i>	31
5.8.2	<i>Material particulado.....</i>	33
5.8.3	<i>Óxidos de enxofre.....</i>	35
5.8.4	<i>Óxidos de nitrogênio.....</i>	36
5.8.5	<i>Compostos orgânicos voláteis.....</i>	38
<b>5.9</b>	<b>Célula combustível microbiana.....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A maior parcela da energia consumida globalmente provém da combustão, representando aproximadamente 80% da produção total de energia no mundo, conforme apontado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2018). Atualmente, mais de 70% da energia utilizada no Brasil é gerada através da combustão de fontes como carvão mineral, lenha, derivados de petróleo, carvão vegetal e biomassa. Esses processos de combustão representam a principal fonte de energia utilizada no país, alimentando uma variedade de setores industriais, comerciais e residenciais (Brasil, 2023; José; Senna, 2010).

O processo de combustão é algo versátil e que apresenta aplicação em uma variedade de setores, tais como: transporte terrestre, marítimo e aéreo, geração de energia elétrica em termelétricas, processos industriais, queimadores, caldeiras, incineração de resíduos, aquecimento doméstico e industrial, fabricação de vidro e cerâmica, cozimento de alimentos e explosivos (INPE, 2018).

De forma simples, pode-se definir a combustão como uma reação química que ocorre entre um combustível e um comburente, resultando na liberação de energia na forma de calor e luz. Os combustíveis são substâncias que são queimadas para produzir calor, sendo o Carbono e o Hidrogênio os principais elementos químicos que constituem a maioria dos combustíveis, além do Enxofre, porém esse em pequenas quantidades (José; Senna, 2010). Em contrapartida, o comburente é uma substância química, geralmente o Oxigênio, capaz de fazer com que o combustível seja consumido na reação, sem a sua presença, o combustível não pode ser consumido, não ocorrendo a reação de combustão (Ribeiro, 2014)

A combustão compreende os processos reativos exotérmicos, frequentemente envolvendo transferência de calor e difusão de massa. A relevância do seu estudo é crucial por diversas razões, como: otimização de processos industriais, controle de emissões poluentes, aumento da eficiência energética, garantia da segurança em operações industriais, impulsionamento da inovação tecnológica, além de proporcionar uma abordagem multidisciplinar enriquecedora (INPE, 2018)

O estudo aprofundado desse assunto desempenha um papel crucial durante a graduação em Química Industrial, estendendo-se também a diversas áreas da engenharia. É fundamental que os alunos adquiram uma compreensão clara e

detalhada desse fenômeno, pois isso não apenas facilita a assimilação de disciplinas como termodinâmica, cinética química, mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte, mas também enriquece sua base de conhecimento.

Ao aprimorar sua capacitação profissional por meio desses estudos, os alunos se beneficiam ao enfrentar desafios complexos na prática industrial, contribuindo diretamente para o desenvolvimento de práticas mais eficientes, seguras e sustentáveis na indústria. Essa abordagem multidisciplinar não apenas fortalece a formação acadêmica, mas também prepara os estudantes para contribuir significativamente para a inovação e a melhoria contínua no cenário industrial (Turns, 2013).

## 2 JUSTIFICATIVA

A compreensão dos princípios da combustão desempenha um papel crucial na sociedade. A cada dia, depende-se dela em várias formas, desde a geração de eletricidade através da queima de combustíveis fósseis, até os sistemas de transporte que predominantemente se baseiam em motores de combustão, assim como nas indústrias que empregam equipamentos que operam com esse princípio (Turns, 2013). No entanto, é essencial reconhecer que a combustão, apesar de seus benefícios, também acarreta riscos significativos para o meio ambiente e para a saúde humana, devido à emissão de poluentes prejudiciais (Coutinho, 2022).

A complexidade da combustão e seus efeitos ambientais são temas de interesse crescente em um mundo que busca soluções sustentáveis para seus desafios energéticos. A compreensão dos processos que regem a combustão é fundamental não apenas para diminuir seus impactos negativos, mas também para explorar alternativas mais limpas e eficientes. Além disso, à medida que a preocupação com as mudanças climáticas e a degradação ambiental se intensifica, a busca por tecnologias de combustão mais eficientes e sustentáveis torna-se uma prioridade global (Coutinho, 2022).

Diante desse contexto, o presente material pode servir como uma fonte de informações valiosas, capacitando os estudantes de Química Industrial e cursos de Engenharia a compreenderem a complexidade da combustão e seu papel na sociedade atual. Ao adquirir conhecimentos sólidos sobre combustão, os futuros profissionais estarão melhor preparados para enfrentar os desafios do mercado de trabalho, contribuindo para o desenvolvimento e implementação de soluções inovadoras e sustentáveis. Além disso, a expertise em combustão pode abrir portas para oportunidades de pesquisa e desenvolvimento em áreas como energia renovável, controle de emissões e otimização de processos industriais (Turns, 2013).

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

- Buscar evidências científicas sobre o processo de combustão.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar o que é descrito na literatura científica acerca da combustão.
- Disponibilizar um recurso educacional para os discentes de Química Industrial.

## 4 METODOLOGIA

A revisão de literatura foi conduzida a partir de uma abordagem sistemática, com o objetivo de reunir, analisar e sintetizar uma variedade de fontes relevantes para o tema de combustão. A busca foi realizada de maneira sistemática em bases de dados acadêmicos (catálogos de bibliotecas e repositórios digitais) e páginas oficiais de órgãos associados ao governo brasileiro, como Corpo de Bombeiros, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental e Universidade Federal de Juiz de Fora.

Os materiais foram selecionados com base em sua qualidade metodológica, relevância, originalidade e contribuição para o tema da combustão, resultando em 41 obras. Os dados relevantes foram extraídos de cada fonte e organizados de acordo com temas e subtemas identificados. Uma análise comparativa foi realizada para identificar lacunas, tendências e áreas de consenso na literatura revisada. Em seguida, as informações foram sintetizadas para fornecer uma visão abrangente do estado atual do conhecimento sobre o tema.

Todas as fontes utilizadas foram devidamente citadas e referenciadas de acordo com as normas atualmente estabelecidas. A integridade acadêmica foi mantida ao evitar plágio e garantir a atribuição adequada de créditos aos autores originais.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Combustão

A combustão desempenha um papel fundamental no fornecimento de energia para nossa sociedade. Esse processo consiste em uma reação química exotérmica que ocorre entre um combustível e um comburente, resultando na liberação de energia na forma de calor e luz, produzindo produtos de combustão como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

Para que uma reação química ocorra, as ligações entre as moléculas dos reagentes são rompidas e os átomos e elétrons se rearranjam para formar os produtos. Dessa forma, nas reações de combustão, a oxidação rápida dos componentes combustíveis do material resulta na liberação de energia conforme os produtos de combustão são gerados. Os principais elementos químicos envolvidos na oxidação da maioria dos combustíveis são o carbono e o hidrogênio. Além desses, outro componente que normalmente está presente é o enxofre, porém em quantidades menores (Oliveira, 2022).

As reações abaixo representam simplificações do processo de combustão, mostrando as principais transformações ocorridas. Na realidade, o processo é mais complexo e envolve uma série de reações de oxidação e decomposição dos compostos presentes nos combustíveis (Carvalho Jr; Mcquay, 2007; José; Sena, 2010)



As reações mencionadas acima representam reações de combustão completa (reação ideal), que ocorrem quando há oxigênio suficiente disponível para reagir completamente com o combustível, ou seja, quando o carbono queima transformando-se em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o hidrogênio em água (H<sub>2</sub>O) e o enxofre em dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Essa transformação é desejável pois resulta na formação de produtos de combustão inertes e não poluentes. A quantidade de calor liberada em cada uma dessas reações é conhecida como calor de combustão (Carvalho Jr; Mcquay, 2007; Oliveira, 2022).

Em contrapartida a combustão incompleta acontece quando os produtos resultantes da reação contêm substâncias combustíveis, como o carbono presente em cinzas, escórias e fuligem, além de gases combustíveis como o hidrogênio. A reação de combustão incompleta do carbono presente no combustível é mostrada pela equação abaixo (Carvalho Jr; Mcquay, 2007; Oliveira, 2022):



## 5.2 Reagentes da combustão

### 5.2.1 Combustível

O combustível consiste em qualquer substância química que, em contato com um oxidante, pode ser queimada produzindo energia. Compostos formados por oxigênio e o carbono são considerados bons combustíveis, porém, na maioria das vezes, eles vêm acompanhados de outros elementos, como enxofre, nitrogênio, assim como o oxigênio, além de pequenas quantidades de metais como vanádio e sódio (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

Diversos fatores influenciam na escolha de um combustível, tais como: disponibilidade em grandes quantidades, possuir custo acessível, ser viável para utilização no processo industrial específico, além de ter eficiência no processo, formação de poluentes, facilidade de controle, presença de impurezas como cinzas e a conveniência no transporte também são considerações importantes. Alguns combustíveis podem conter componentes não combustíveis, como umidade e cinzas, que não contribuem para a produção de calor durante a combustão e fazem com que a qualidade do combustível seja menor (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

Saber a composição química de um combustível é crucial, pois é possível estimar a quantidade de energia liberada durante o processo de combustão. Geralmente, essa composição é expressa em termos de massa para combustíveis sólidos e líquidos, e em termos volumétricos para combustíveis gasosos. A maioria dos combustíveis industriais é uma mistura complexa cuja composição química precisa ser determinada, embora certos combustíveis simples, como o metano (CH<sub>4</sub>), possam ser representados por fórmulas químicas simples (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

Associado a isso, o entendimento da estrutura química de um combustível ou de seus componentes é crucial, pois oferece compreensão sobre diversas

propriedades químicas e termodinâmicas relevantes. Por exemplo, considerando os hidrocarbonetos, sua estrutura molecular determina o estado físico do combustível em condições ambientais padrão. Se a molécula contiver de um a quatro átomos de carbono, o combustível será gasoso à temperatura e pressão ambiente. Para moléculas com cinco a dezesseis carbonos, o combustível será líquido. Em contrapartida, para moléculas contendo dezessete ou mais carbonos, o combustível será sólido (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

### 5.2.2 Comburente

O oxidante, também chamado de comburente, é geralmente o oxigênio fornecido pelo ar atmosférico, que possui em sua composição volumétrica cerca de 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,01% de outros gases (neônio, hélio, metano, etc.). Contudo, somente o oxigênio (O<sub>2</sub>) desempenha um papel ativo na combustão para gerar calor. O nitrogênio (N<sub>2</sub>), por sua vez, não participa diretamente da combustão, mas é responsável pela formação dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) que são considerados poluentes atmosféricos e têm impactos significativos na qualidade do ar e no meio ambiente, contribuindo para problemas como a poluição do ar e a chuva ácida (Carvalho Jr; Mcquay, 2007; Oliveira, 2022).

A Tabela 1 representa resumidamente a composição dos principais gases na atmosfera. Outras espécies também estão presentes, porém em concentrações inferiores a 10<sup>-7</sup> % em volume.

**Tabela 1** - Principais gases constituintes da atmosfera.

<b>Composto</b>	<b>Percentual (em volume)</b>
Nitrogênio	78,08
Oxigênio	20,95
Argônio	0,934
Dióxido de carbono	0,036
Neônio	1,818.10 <sup>-3</sup>
Hélio	5,24.10 <sup>-4</sup>
Metano	1,6.10 <sup>-4</sup>
Criptônio	1,14.10 <sup>-4</sup>
Óxido nitroso	3,0.10 <sup>-5</sup>
Monóxido de carbono	1,2.10 <sup>-5</sup>
Xenônio	8,7.10 <sup>-6</sup>
Amônia	10 <sup>-8</sup> - 10 <sup>-7</sup>

**Fonte:** Schirmer e Lisboa (2008).

Para os cálculos de balanços entre reagentes e produtos, pode ser considerado os valores da composição volumétrica do ar atmosférico como: 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Sendo assim, as frações molares ( $X$ ) no ar de oxigênio fica sendo de  $X_{O_2, ar} = 0,21$  e de nitrogênio  $X_{N_2, ar} = 0,79$ . Com isso, pode-se concluir que o ar contém cerca de 3,76 moléculas de nitrogênio para cada molécula de oxigênio, pois  $\frac{79}{21} = 3,76$ . (Carvalho Jr; Mcquay, 2010).

Sendo as massas moleculares ( $M_i$ ) de oxigênio e nitrogênio gasosos iguais a 32 e 28 g/gmol, respectivamente, as frações mássicas de nitrogênio e oxigênio no ar, podem ser calculadas conforme apresentado na Tabela 2 (Carvalho Jr; Mcquay, 2007):

**Tabela 2** - Frações molares ( $X_i$ ) e massas moleculares ( $M_i$ ) dos compostos  $O_2$  e  $N_2$ .

	$x_i$	$M_i$	$x_i \cdot M_i$
<b>O<sub>2</sub></b>	0,21	32	6,72
<b>N<sub>2</sub></b>	0,79	28	22,12

Fonte: Elaboração própria

Substituindo os valores calculados na Tabela 2, tem-se que:

$$W_{O_2} = \frac{O_2 * M_{O_2}}{\sum x_i * M_i} = \frac{0,21 * 32}{6,72 + 22,12} = 0,233 \quad (E1)$$

$$W_{N_2} = \frac{N_2 * M_{N_2}}{\sum x_i * M_i} = \frac{0,79 * 28}{6,72 + 22,12} = 0,767 \quad (E2)$$

A massa molecular do ar é:

$$M_{ar} = 6,72 + 22,12 = 28,84 \frac{g}{gmol}$$

### 5.3 Excesso de ar

Para que a combustão ocorra, é fundamental uma quantidade de ar teórico que representa o volume exato de oxigênio necessário, conforme as relações estequiométricas, para que a reação de combustão ocorra sem deixar resíduos não queimados. Todavia, para garantir a combustão completa, é preciso que se tenha um excesso de ar, que nos contextos industriais é definido como a quantidade adicional

de oxigênio fornecida além da quantidade estequiométrica necessária para as reações de combustão. Esse excesso de ar é quase sempre necessário para manter um nível adequado de oxigênio até o final da chama, superando eventuais deficiências na mistura provenientes do queimador (Carvalho Jr; Mcquay, 2007; Ceron, 2010).

O equilíbrio na quantidade de ar durante a combustão é crucial para sua eficiência. Um excesso considerável de ar não é ideal, pois reduz a temperatura da chama, aumentando as perdas de calor e diminuindo a eficiência térmica. Em contrapartida, uma quantidade insuficiente de ar pode resultar em combustão incompleta, levando à formação de poluentes como o monóxido de carbono (CO), geração de fuligem e fumaça, além de aumentar o risco de acúmulo de combustível não queimado, podendo causar explosões (Ceron, 2010).

Para combustíveis na forma gasosa, é comum fornecer um excesso de ar entre 1% e 2% acima da quantidade estequiométrica, enquanto para combustíveis líquidos, geralmente entre 5% e 10%. No caso de combustíveis sólidos, a exigência de excesso de ar pode ser ainda mais significativa, chegando a até 25%, devido à natureza menos uniforme da queima de combustíveis sólidos e à necessidade de uma distribuição adequada de oxigênio para garantir uma reação completa. Entretanto, em processos de incineração, em que a completa queima de resíduos é crucial para minimizar emissões nocivas, é comum trabalhar com excessos de ar que ultrapassam até mesmo 100% (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

Na análise da quantidade de ar empregada na combustão de um determinado combustível são frequentemente utilizados três parâmetros: a razão ar-combustível (AC), a razão combustível-ar (CA) e a razão de equivalência ( $\phi$ ) (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

- Razão ar-combustível (AC): determinada pela razão em massa entre o ar fornecido e o combustível quando em base mássica (E3), uma vez que para base molar (E4), é definida pela razão entre as massas moleculares de combustível e ar ( $M_c/M_{ar}$ ) (Carvalho Jr; Mcquay, 2007). Sendo:

$$AC = \frac{\text{massa de ar}}{\text{massa de combustível}} \left[ \frac{\text{kg ar}}{\text{kg combustível}} \right] \quad (\text{E3})$$

$$AC = \frac{M_c}{M_{ar}} \left[ \frac{\text{mol combustível}}{\text{mol ar}} \right] \quad (\text{E4})$$

- Razão combustível-ar (CA): representa a recíproca da razão ar-combustão.

$$CA = \frac{\text{massa de combustível}}{\text{massa de ar}} \left[ \frac{\text{kg combustível}}{\text{kg ar}} \right] \quad (\text{E5})$$

$$CA = \frac{M_{ar}}{M_c} \left[ \frac{\text{mol ar}}{\text{mol combustível}} \right] \quad (\text{E6})$$

- Razão equivalência ( $\phi$ ): é o Coeficiente de excesso de ar que representa a relação entre o número de moles realmente utilizado na combustão (atual) e o número de moles estequiometricamente necessário (Carvalho Jr; Mcquay, 2007). Sendo representado pela fórmula abaixo:

$$\phi = \frac{\left( \frac{\text{moles combustível}}{\text{moles oxidante}} \right)_{\text{atual}}}{\left( \frac{\text{moles combustível}}{\text{moles oxidante}} \right)_{\text{estequiométrico}}} \quad (\text{E7})$$

Um valor de  $\phi < 1$  é considerado uma mistura pobre em combustível, ou seja, representa uma combustão com falta de ar (incompleta) e o processo de combustão possui menos combustível (ou mais ar) que no caso estequiométrico. Já se  $\phi > 1$  indica que a mistura é rica em combustível (combustão com excesso de ar) e  $\phi = 1$  representa uma mistura estequiométrica (Carvalho Jr; Mcquay, 2007).

#### 5.4 Combustão espontânea

Para que as reações de combustão iniciem, geralmente é necessária uma fonte de calor externa. Se o calor gerado pelas reações for suficiente para sustentar a combustão, a fonte externa de calor não é mais necessária. No entanto, a quantidade de calor varia para cada tipo de material, dependendo de fatores como umidade, composição e estrutura (no caso de sólidos). Por essa razão, alguns materiais possuem calor interno suficiente para iniciar e manter a combustão, a chamada combustão espontânea. Esse processo ocorre quando um material tem processos biológicos e/ou reações químicas que liberam calor, aquecendo-o e iniciando a queima (José; Sena, 2010; Marques; Vidal, 2015).

O algodão é um exemplo de material propenso ao autoaquecimento. Ele possui inicialmente uma oxidação lenta, porém a ausência de ventilação pode fazer com que a temperatura se eleve até que atinja o ponto de ignição. Esse fenômeno pode ser atribuído a presença de pequenas quantidades de óleo no material, que são facilmente oxidadas (Albuquerque; Basílio, 2019).

O algodão é largamente utilizado na indústria têxtil e já foi responsável por diversos incidentes graves ao redor do mundo, como o incêndio que ocorreu em fevereiro de 2010 em um depósito de algodão em Qingdao, na província de Shandong (China), devido à combustão espontânea desse material. O incidente provocou o colapso das estruturas em apenas 30 minutos, resultando em um prejuízo estimado em cerca de 1 bilhão de remimbi, aproximadamente 548 milhões de reais (Albuquerque; Basílio, 2019).

### **5.5 Ponto de fulgor, combustão e ignição**

Compreender os conceitos de ponto de fulgor, combustão e ignição é crucial para a segurança industrial e ambiental. Esses conhecimentos garantem a proteção dos trabalhadores que lidam com substâncias inflamáveis, além de prevenir vazamentos e derramamentos que possam contaminar o meio ambiente. Ao evitar acidentes graves, como incêndios e explosões, também se protege a biodiversidade e os ecossistemas naturais. A aplicação correta desses conceitos contribui para a sustentabilidade das atividades industriais e para a preservação dos recursos naturais (Dufreyer; Carrim, 2014).

O ponto de fulgor é definido como a temperatura mínima na qual um produto emite vapores que podem inflamar-se na presença de uma chama, em condições controladas. No entanto, o ponto de fulgor não é o bastante para sustentar a combustão por si só, uma vez que quando a fonte de calor é removida, a combustão cessa imediatamente. Essa medida é crucial para garantir a segurança durante o armazenamento, transporte e manuseio de combustíveis, além de permitir a detecção de contaminações por outros produtos (Nichetti, 2010).

O ponto de combustão consiste na menor temperatura em que vapores de um combustível, quando aquecidos, entram em ignição ao se aproximar de uma fonte externa de calor. É importante notar que mesmo após a remoção dessa fonte, a combustão continua, ou seja, se autoalimenta. Essa medida é fundamental não apenas para avaliar a segurança e eficiência de processos industriais, mas também para o desenvolvimento e teste de materiais e combustíveis. Por exemplo, em indústrias petroquímicas, o conhecimento do ponto de combustão é crucial para garantir a segurança durante a manipulação e armazenamento de produtos inflamáveis (Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás, 2017).

Em contrapartida, o ponto de ignição é a temperatura na qual um combustível libera vapores em quantidade suficiente para, ao entrar em contato com o ar (comburente), inflamar-se e continuar a queimar por conta própria, sem precisar de uma fonte de ignição externa. No caso de gases combustíveis, é a temperatura na qual o gás, estando dentro de sua faixa de inflamabilidade, se inflama sem a necessidade de uma fonte de ignição externa (Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás, 2017)

Na Tabela 3 pode-se observar a variação dos valores para vários pontos de fulgor, combustão e ignição para diferentes combustíveis comerciais e industriais.

**Tabela 3** - Pontos de referência de alguns combustíveis.

<b>Materiais</b>	<b>Ponto de fulgor</b>	<b>Ponto de combustão (°C)</b>	<b>Ponto de ignição (°C)</b>
Madeira dura	245	270	290
Papel	230	-	230
Gasolina	-40	-20	227
Etanol	13	-	370
Butano	-60	-	430

**Fonte:** NFPA 921, 2004.

## 5.6 Estrutura da chama

Quando um gás entra em combustão, pode produzir uma chama que pode ser visível, o que significa que emite luz (chama luminosa), ou não visível, quando não há emissão de luz (não luminosa), o que significa que não faz parte do espectro visível. A estrutura e composição das chamas são bem complexas e existem várias coisas acontecendo dentro dela. A luz que é vista na chama não vem apenas de átomos e íons excitados, mas também de fragmentos de moléculas e partículas sólidas incandescente (Gracetto; Hioka; Santin Filho, 2006; José; Sena, 2010).

A cor da chama varia de acordo com os materiais que estão sendo queimados e das condições de combustão. As chamas azuladas surgem quando gases como o gás natural ou hidrocarbonetos leves queimam eficientemente, emitindo principalmente luz na região azul do espectro visível, devido à sua queima limpa e quente, o que ocorre quando há oxigênio suficiente presente na combustão para uma queima completa. Por outro lado, chamas amareladas são causadas por impurezas ou materiais mais pesados na combustão, como partículas de carbono incandescente,

que são produzidas quando há pouca disponibilidade de oxigênio durante a queima, resultando na cor amarelada da chama (Gracetto; Hioka; Santin Filho, 2006).

### 5.6.1 Tipos de chama

Existem dois tipos de chamas: pré-mistura e difusão. Na pré-mistura, o combustível (normalmente gasoso) e o oxigênio se misturam antes da queima, resultando em alta temperatura e baixa luminosidade, controlada pela proporção entre os dois. Esse tipo de chama tende a ser mais quente e limpa, com uma cor azulada devido à eficiência da queima. Um exemplo disso pode ser visto na Figura 1, que mostra uma chama de pré-mistura típica no qual o combustível (como gás liquefeito de petróleo) e o comburente ( $O_2$ ) são misturados antes da queima, resultando em uma chama mais quente e sem fuligem (Gracetto; Hioka; Santin Filho, 2006)

**Figura 1** - Chama de pré-mistura.



**Fonte:** Gracetto, Hioka e Santin Filho (2006).

Em contrapartida, nas chamas de difusão, não há mistura prévia de seus componentes, sendo a mistura de gases feita através da difusão molecular, geralmente de forma turbulenta. Isso dificulta o controle da proporção entre combustível e oxigênio, levando a chamas luminosas, turbulentas e fuliginosas, comuns na combustão livre de sólidos e líquidos expostos ao ar. Esse tipo de chama possui coloração amarelada (Gracetto; Hioka; Santin Filho, 2006). A Figura 2 representa um exemplo desse tipo de chama.

**Figura 2** - Chama de difusão estável (A) e turbulenta (B).



Fonte: Google Imagens.

### 5.6.2 Estrutura da chama

A chama pode conter quatro zonas distintas, sendo elas (Figura 3) (José; Sena, 2010; UFJF, 2020):

- **Zona interior:** é a região mais próxima da base da chama, onde o combustível ainda não teve a chance de queimar completamente. A falta de oxigênio suficiente nesta região impede a combustão completa do combustível, resultando na presença de gases não queimados. Como resultado, esta zona pode não apresentar cor ou ser escura, indicando que a reação de combustão ainda não começou ou está incompleta.
- **Zona Azul:** é a parte mais central e quente da chama, onde ocorre a combustão completa do combustível. Na presença de oxigênio em quantidade suficiente, o combustível queima completamente, produzindo principalmente dióxido de carbono e água. A alta temperatura nesta região resulta na emissão de luz visível, que geralmente aparece com uma coloração azulada.
- **Zona Redutora:** região logo acima da zona azul, onde há uma quantidade significativa de combustível ainda não queimado. Devido à alta temperatura, o combustível que não queimou completamente na zona azul é decomposto, liberando carbono na forma de partículas incandescentes. É a zona mais brilhante da chama devido à presença de carbono em forma luminosa, resultando em uma coloração amarelada ou alaranjada característica.
- **Zona Oxidante:** região mais externa da chama, onde o oxigênio atmosférico entra em contato com os produtos da combustão da zona redutora. Nesta região, os produtos da combustão incompleta que foram liberados na zona redutora queimam facilmente em presença de oxigênio, completando assim o

processo de combustão. A temperatura nesta região é geralmente mais baixa do que na zona redutora, pois a energia liberada na queima dos produtos da zona redutora é dissipada para o ambiente circundante.

**Figura 3** - Estrutura da chama.



Fonte: José e Senna (2010).

### 5.7 Poder calorífico

A energia liberada durante o processo de combustão pode ser quantificada através do poder calorífico de um combustível, o qual corresponde a uma medida termodinâmica que representa a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de um mol de substância em condições específicas de temperatura e pressão padrão (José; Sena, 2010).

O poder calorífico é uma característica crucial de um combustível, determinando a quantidade de energia disponível durante sua queima. É influenciado por várias características do combustível, como sua composição química, presença de metais, umidade e outras propriedades. Além disso, ele é fundamental em diversas aplicações, incluindo motores de combustão interna, sistemas de aquecimento e geração de energia elétrica (Costa *et al.*, 2009).

Existem dois tipos principais de poder calorífico, que são (Costa *et al.*, 2009; Soares, 2011):

- Poder Calorífico Superior (PCS): quando os produtos da combustão contêm água na fase líquida. Isso ocorre porque o PCS inclui o calor latente de vaporização da água condensada durante a combustão.
- Poder Calorífico Inferior (PCI): quando os produtos da combustão contêm água na fase gasosa. Neste caso, o PCI não inclui o calor latente de vaporização da água, pois esta permanece no estado gasoso.

O poder calorífico pode ser determinado tanto teoricamente através de cálculos, quanto experimentalmente por meio de calorímetros. Na determinação teórica, o poder calorífico pode ser calculado com base na composição elementar do combustível e nos calores de combustão dos elementos ou compostos gasosos presentes. Para isso, é necessário conhecer a quantidade de cada elemento no combustível e os calores de combustão correspondentes, que são geralmente dados em tabelas de química (Costa *et al.*, 2009; José; Sena, 2010).

Em contrapartida, na determinação experimental, o poder calorífico de um combustível é determinado usando um calorímetro, conhecido como bomba calorimétrica. Este dispositivo permite medir a quantidade de energia liberada quando o combustível é queimado ou oxidado completamente (Costa *et al.*, 2009).

- Combustíveis Sólidos e Líquidos

Para combustíveis sólidos e líquidos, o poder calorífico pode ser calculado, com boa aproximação, através das equações abaixo. A equação 8 é usada para o poder calorífico superior, a equação 9 o poder calorífico inferior e por fim, a equação 10 calcula a quantidade de água formada nos produtos (Costa *et al.*, 2009; José; Sena, 2010).

$$PCS = 8100 * C + 34400 * \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500 * S \quad (E8)$$

$$PCI = 8100 * C + 34400 * \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500 * S - 600 * w \quad (E9)$$

$$W = 9 * H + U \quad (E10)$$

Em que:

- PCS: Poder calorífico superior [kcal/kg];
- PCI: Poder calorífico inferior [kcal/kg];
- C: Teor de carbono [kg C / kg combustível];
- H: Teor de hidrogênio [kg H / kg combustível];

- O: Teor de oxigênio [kg O / kg combustível];
- S: Teor de enxofre [kg S / kg combustível];
- w: Água formada nos produtos [kg H<sub>2</sub>O / kg combustível];
- u: Umidade [kg H<sub>2</sub>O / kg combustível].

- Combustíveis Gasosos

O poder calorífico de um combustível gasoso é determinado pela composição do gás, ou seja, pelos percentuais de cada composto presente na mistura, juntamente com seus respectivos poderes caloríficos. Por exemplo, para um combustível gasoso composto por uma mistura de diferentes compostos como CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, pode ser seguido os seguintes passos (José; Sena, 2010):

1. Identificar a composição do gás: determinar os percentuais de cada composto presente na mistura. Por exemplo, se tem 20% de CO, 30% de H<sub>2</sub>, 40% de CH<sub>4</sub> e 10% de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>.
2. Obter os poderes caloríficos de cada composto: como exemplo da Tabela 4, que contém os poderes caloríficos de cada composto em unidades de energia por unidade de massa.
3. Calcular o poder calorífico total: multiplicando o percentual de cada composto pelo seu poder calorífico correspondente e em seguida somar os produtos. Por exemplo: Poder calorífico total = (20% \* Poder calorífico do CO) + (30% \* Poder calorífico do H<sub>2</sub>) + (40% \* Poder calorífico do CH<sub>4</sub>) + (10% \* Poder calorífico do C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>).

**Tabela 4** - Poder Calorífico de alguns gases.

Composto	Fórmula	PCS [kcal/kg]	PCI [kcal/kg]	PCS [kcal/Nm <sup>3</sup> ]	PCI [kcal/Nm <sup>3</sup> ]
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	34.400	29.000	3.070	2.580
Monóxido de carbono	CO	2.440	-	3.050	-
Metano	CH <sub>4</sub>	13.250	11.900	9.500	8.530
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	12.000	11.230	15.000	14.050
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	12.000	11.600	13.950	13.500

**Fonte:** José e Senna (2010).

$$PCS = 3050 * CO + 3070 * H_2 + 9500 * CH_4 + 13950 * C_2H_2 + 15000 * C_2H_4 \quad (E11)$$

$$PCI = 3050 * CO + 2580 * H_2 + 8530 * CH_4 + 13500 * C_2H_2 + 14050 * C_2H_4 \quad (E12)$$

Em que:

- PCS: Poder calorífico superior [kcal/Nm<sup>3</sup>];
- PCI: Poder calorífico inferior [kcal/Nm<sup>3</sup>];
- CO: Teor de monóxido de carbono [Nm<sup>3</sup> CO / Nm<sup>3</sup> combustível];
- H<sub>2</sub>: Teor de hidrogênio [Nm<sup>3</sup> hidrogênio / Nm<sup>3</sup> combustível];
- CH<sub>4</sub>: Teor de metano [Nm<sup>3</sup> metano / Nm<sup>3</sup> combustível];
- C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>: Teor de acetileno [Nm<sup>3</sup> etino / Nm<sup>3</sup> combustível];
- C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>: Teor de eteno [Nm<sup>3</sup> eteno / Nm<sup>3</sup> combustível].

## 5.8 Produtos da combustão

Os produtos provenientes da combustão, são substâncias geradas durante o processo de combustão, o qual desencadeia uma série de reações e resultam na formação de vários compostos gasosos que contribuem significativamente para poluição atmosférica. Dentre eles, destacam-se o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor de água (H<sub>2</sub>O), óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub>, ou NO<sub>x</sub>), entre outros. Além dos gases, a queima de sólidos e líquidos também pode liberar partículas sólidas em suspensão, conhecidas como materiais particulados, contribuindo para a complexidade e diversidade dos produtos da combustão (José; Sena, 2010).

A poluição do ar é uma mistura complexa de gases e partículas sólidas ou líquidas, provenientes de atividades tanto naturais quanto antrópicas. A composição e concentração desses poluentes variam de acordo com as fontes de poluição e as condições meteorológicas. Além disso, alguns poluentes atmosféricos são formados a partir de reações entre poluentes emitidos diretamente pelas fontes (primários) e outros produtos químicos ou pela interação com a luz solar (secundários) (Barbosa, 2017; Coutinho, 2022).

De acordo com a Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2021), a carga global de doenças relacionadas à poluição do ar tem um impacto significativo na saúde e qualidade de vida da população. Estima-se que ocorram milhões de mortes devido à exposição à poluição do ar todos os anos, sendo reconhecida como a maior ameaça ambiental à saúde humana. Além disso, as implicações negativas das doenças associadas à poluição do ar apresentam atualmente uma carga semelhante a outros riscos importantes à saúde, como má alimentação e tabagismo.

A maioria dos poluentes ambientais é resultante de atividades humanas em larga escala, tais como o funcionamento de máquinas industriais, usinas geradoras

de energia, motores a combustão e veículos automotores. Devido à sua amplitude, essas atividades são os grandes causadores da poluição do ar, sendo os automóveis os principais emissores de gases poluentes. Outras atividades humanas, como práticas agrícolas, operações em postos de combustível, sistemas de aquecimento de tanques e procedimentos de limpeza também têm um impacto significativo, embora em menor escala (Coutinho, 2022).

As Resoluções CONAMA nº 382/2006, nº 436/2011 e nº 491/2018 desempenham papéis fundamentais no controle e na redução da poluição atmosférica no Brasil. A Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece padrões de qualidade do ar, definindo limites máximos de concentração de poluentes em diversas áreas, com o objetivo primordial de proteger a saúde humana e o meio ambiente (CONAMA, 2006; 2011; 2018).

Complementando essa iniciativa, a Resolução CONAMA nº 436/2011 direciona-se especificamente ao controle do material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>), reconhecido por seu potencial nocivo à saúde respiratória. Por fim, a Resolução CONAMA nº 491/2018 estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de empreendimentos geradores de poluição atmosférica, promovendo a prevenção e o controle eficaz da emissão de poluentes (CONAMA, 2006; 2011; 2018; Coutinho, 2022; Queiroz *et al.*, 2020; Vergnhanini Filho, 2020). No Quadro 1 estão categorizados os poluentes atmosféricos, com ênfase nas fontes que são as principais geradoras de poluição.

**Quadro 1** - Fontes geradoras de poluição.

<b>Fonte</b>	<b>Descrição</b>
<b>Fontes móveis</b>	Automóveis, carros, ferrovias, vias aéreas e outros tipos de veículos.
<b>Fontes estacionárias</b>	Usinas de energia, refinarias e petroquímicas, indústria química e de fertilizantes, metalúrgicas e outras plantas industriais e incineração municipal.
<b>Fontes de área</b>	Atividade de limpeza doméstica, lavanderias, gráficas e postos de combustíveis.
<b>Fontes naturais</b>	Incêndios florestais, erupção vulcânica, tempestade de poeira e queimadas agrícolas.

**Fonte:** Coutinho (2022).

### 5.8.1 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é formado quando há queima de substâncias em condições de insuficiência de oxigênio ou em uma combustão muito rápida, o que

resulta em uma combustão incompleta. Essas condições de baixo oxigênio levam à produção de monóxido de carbono em vez de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que é o produto usual da queima completa (D'Amelio; Campos; Alvim, 2017).

A formação do monóxido de carbono apresenta uma preocupação significativa, por se tratar de um gás tóxico, inodoro, insípido e não irritante. Uma vez que não possui uma assinatura clínica única, só pode ser detectado por instrumentos de análise, podendo imitar outros distúrbios comuns. Essa característica o torna especialmente perigoso, haja vista que a exposição prolongada ou em altas concentrações pode levar ao envenenamento por monóxido de carbono, com efeitos graves na saúde, incluindo sintomas como dor de cabeça, tontura, náusea, confusão e, em casos extremos, até a morte (Coutinho, 2022; José; Sena, 2010).

Quando o monóxido de carbono é inalado, ocorre a absorção rápida pela corrente sanguínea e a sua ligação à hemoglobina, reduzindo a capacidade de transporte de oxigênio. Isso pode resultar em uma redução do suprimento de oxigênio para os tecidos do corpo, levando a uma condição conhecida como hipóxia. Os riscos à saúde associados à exposição ao monóxido de carbono variam dependendo da concentração do gás no ambiente e da duração da exposição. Em concentrações elevadas ou em exposições prolongadas, o monóxido de carbono pode levar à perda de consciência e, em casos mais graves, à morte devido à falta de oxigênio nos tecidos (Coutinho, 2022).

O monóxido de carbono é gerado, especialmente, pela queima de veículos automotores, sendo conhecido como o principal poluente nas áreas urbanas. O crescimento da frota de veículos e a expansão da atividade industrial têm impulsionado o aumento da poluição do ar nessas regiões. Esse cenário tem causado sérios impactos na qualidade de vida das pessoas, bem como no bem-estar das plantas e animais (D'Amelio; Campos; Alvim, 2017).

As principais fontes antropogênicas de monóxido de carbono na atmosfera incluem a queima de combustíveis, sistemas de aquecimento, usinas termoelétricas e a queima de biomassa. Além disso, há contribuições naturais provenientes de atividades vulcânicas, descargas elétricas, emissões de gás natural e reações atmosféricas. Essa diversidade de fontes contribui para a complexidade do problema da poluição atmosférica urbana (D'Amelio; Campos; Alvim, 2017).

Embora o monóxido de carbono não seja considerado um gás de efeito estufa primário, pois não absorve a radiação infravermelha terrestre com intensidade

suficiente para causar aquecimento global, ele desempenha um papel importante nas reações químicas que contribuem para a formação dos principais gases de efeito estufa. O monóxido de carbono atmosférico influencia na destruição do metano e na produção de dióxido de carbono, ozônio e aerossóis de sulfato, impactando assim o clima (D'Amelio; Campos; Alvim, 2017).

### 5.8.2 *Material particulado*

A formação e a emissão de material particulado (MP) são principalmente observadas durante a combustão de combustíveis líquidos e sólidos. Esse tipo de poluente é composto por poeira, fumaça e outros materiais sólidos e líquidos que permanecem suspensos na atmosfera devido ao seu tamanho reduzido (Brito; Araújo; Silva, 2018; Araújo; Moraes; Costa, 2017).

Essas partículas são classificadas de várias maneiras, incluindo Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis ( $MP_{10}$ ) e Partículas Inaláveis Finas ( $MP_{2,5}$ ) (Araújo; Moraes; Costa, 2017). As principais fontes de emissão de MP para a atmosfera são veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa e ressuspensão de poeira do solo (Brito; Araújo; Silva, 2018).

As Partículas Totais em Suspensão (PTS) têm um diâmetro aerodinâmico inferior a 50  $\mu m$ . Uma parte dessas partículas pode ser inalada, contribuindo para problemas de saúde, enquanto outras podem afetar a qualidade de vida ao prejudicar o ambiente estético e interferir nas atividades cotidianas da comunidade. Em contrapartida, as Partículas Inaláveis ( $MP_{10}$ ) possuem um diâmetro aerodinâmico menor que 10  $\mu m$ , podendo ser retidas nas vias respiratórias superiores ou penetrar profundamente nos alvéolos pulmonares, dependendo da distribuição de tamanhos na faixa de 0 a 10  $\mu m$  (Araújo; Moraes; Costa, 2017).

Por último, as Partículas Inaláveis Finas ( $MP_{2,5}$ ), conhecidas como Partículas Respiráveis, possuem um tamanho aerodinâmico menor que 2,5  $\mu m$ . Por serem tão pequenas, têm a capacidade de adentrar profundamente o sistema respiratório, chegando aos alvéolos pulmonares (Araújo; Moraes; Costa, 2017).

De acordo com sua origem, o MP pode ser classificado como primário ou secundário. O MP primário é diretamente emitido na atmosfera, proveniente de fontes naturais e humanas. As fontes naturais incluem vulcões, queimadas, aerossóis marinhos e elementos biológicos como pólen, enquanto as fontes antropogênicas

abrangem emissões veiculares, combustão em instalações fixas, diversos processos industriais e descarte de resíduos sólidos (Belo; Tofoli, 2011).

Por outro lado, o MP secundário é formado na atmosfera por reações químicas envolvendo gases, aerossóis e água em seu estado líquido ou sólido. Essas partículas secundárias, predominantemente compostas de sulfatos, nitratos e hidrocarbonetos oxigenados, são provenientes da oxidação de compostos como enxofre, nitrogênio e hidrocarbonetos voláteis não-metânicos (Belo; Tofoli, 2011). O Quadro 2 apresenta uma síntese das principais fontes de material particulado, classificadas em naturais e antropogênicas.

**Quadro 2 - Fontes naturais e antropogênicas de material particulado.**

	Fontes naturais		Fontes antropogênicas	
	Primária	Secundária	Primária	Secundária
<b>MP<sub>2,5</sub></b>	Queimadas (carbono elementar e carbono orgânico)	Carbono orgânico a partir de compostos orgânicos voláteis (COV)	Combustão de combustíveis fósseis (carbono elementar e carbono orgânico)	Carbono orgânico a partir de fontes antropogênicas de COV (automóveis, processos industriais)
		Nitrato a partir de óxido de nitrogênio (NOx) natural	Combustão de madeira em residências (carbono elementar e carbono orgânico)	Sulfatos e nitratos a partir de fontes antropogênicas de óxido de enxofre (SOx) e NOx (automóveis, termelétricas, etc.)
<b>MP<sub>10</sub></b>	Poeira carregada pelo vento		Poeira mineral de indústrias de mineração e de extração	
	Spray de sal marinho		Poeira de rodovias e construções	
	Pólen, esporos			

**Fonte:** Belo e Tofoli (2011).

O MP de origem antropogênica é composto principalmente por sulfato, amônio, nitrato, sódio, cloreto, metais traço, material carbonáceo, elementos da crosta terrestre e água. Esses compostos desempenham um papel crucial na formação da chuva

ácida, um fenômeno ambiental prejudicial que resulta em consequências econômicas e para a saúde pública. A chuva ácida ocorre quando esses componentes químicos se misturam com a umidade atmosférica, formando precipitação com pH abaixo do normal, o que pode causar danos significativos a edifícios, plantações, ecossistemas aquáticos e à saúde humana (Belo; Tofoli, 2011).

Uma das diretrizes estabelecidas pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (CETESB, 2012) é a redução das emissões de material particulado provenientes da combustão dos motores a diesel em veículos de transporte de carga. Esse programa impôs às montadoras a necessidade de incorporar novas tecnologias para tornar seus veículos mais eficientes em termos de emissões. Além disso, teve um impacto significativo nas indústrias de combustíveis, exigindo a oferta de diesel com baixo teor de enxofre (CETESB, 2012; Oliveira; Farias, 2021).

### 5.8.3 Óxidos de enxofre

Nas indústrias, os óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) são gerados durante o processo de queima de combustíveis fósseis contendo enxofre em sua composição, como óleo combustível e carvão mineral. Durante esse processo de combustão, ocorre a oxidação do enxofre presente nos combustíveis, resultando principalmente na formação de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e, em menor quantidade, de trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>), que contribuem significativamente para a poluição atmosférica e representam um sério problema ambiental e de saúde pública (Silva *et al.*, 2013).

Durante a combustão nos motores a diesel, o trióxido de enxofre pode reagir com a água presente, formando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), como mostra a reação 5, o qual pode corroer componentes metálicos do motor. Quando o SO<sub>2</sub> entra em contato com a umidade atmosférica, contribui para a formação de chuva ácida, que pode acidificar o solo e a água, afetando negativamente o desenvolvimento de organismos aquáticos, como larvas, pequenas algas e insetos. Além disso, a chuva ácida pode causar a lixiviação de metais pesados do solo para corpos d'água, contaminando e prejudicando a vida aquática e os seres dependentes dela (Silva *et al.*, 2013).



Os SO<sub>x</sub> são considerados poluentes primários, pois são liberados diretamente pelas fontes de emissão, como a queima de combustíveis fósseis. No ser humano, podem causar irritações no sistema respiratório e na pele, além de contribuir para o

desenvolvimento de doenças cardiovasculares. Os sintomas mais comuns associados à exposição a esses gases incluem tosse, irritação nos olhos, náuseas, vômitos e dificuldades respiratórias (Vergnhanini Filho, 2020).

Os padrões nacionais de qualidade do ar para os óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), são estabelecidos através da resolução CONAMA nº 491 (Brasil, 2018) são descritos na Tabela 5. Esses padrões definem os valores limite legalmente permitidos para a concentração de SO<sub>x</sub> no meio ambiente. Além disso, esses padrões são categorizados em duas classes distintas. A primeira, conhecida como Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI), refere-se a valores temporários estabelecidos como metas a serem alcançadas em etapas específicas. Em contraste, a segunda é denominada Padrão de Qualidade do Ar Final (PF), representando valores-guia definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005 (Vergnhanini Filho, 2020).

**Tabela 5** - Padrões nacionais de qualidade do ar para o SO<sub>x</sub>, como SO<sub>2</sub>.

Tempo de amostragem	SO <sub>x</sub> , como SO <sub>2</sub> (µg/Nm <sup>3</sup> )			
	PI 1*	PI 2*	PI3*	PF**
<b>24 horas</b>	125	50	30	20
<b>Média aritmética anual</b>	40	30	20	-

**Fonte:** CONAMA (2018). \*PI: padrões de qualidade do ar intermediários; padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas. \*\*PF: padrão de qualidade do ar final.

#### 5.8.4 Óxidos de Nitrogênio

Durante processos de combustão, como os encontrados nos escapamentos de veículos, centrais termoelétricas e fábricas industriais, ocorre a emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>). Estes poluentes são compostos principalmente de óxido nítrico (NO), representando cerca de 95% da composição, juntamente com dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Vaz; Codaro; Acciari, 2013; José; Senna, 2010).

O óxido nítrico e o dióxido de nitrogênio são altamente reativos e, na presença de oxigênio (O<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>) e hidrocarbonetos, o óxido nítrico pode ser convertido em dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) como mostra na reação 6 simplificada. Por sua vez, o NO<sub>2</sub>, quando exposto à luz solar, reage com hidrocarbonetos e oxigênio para formar ozônio (reação 7), que é um dos principais precursores desse poluente fotoquímico

na troposfera, desempenhando um papel crucial na formação da poluição atmosférica urbana (Coelho, 2014).

Formação de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) a partir de óxido nítrico (NO):



Formação de ozônio (O<sub>3</sub>) a partir de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) na presença de luz solar:



Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são poluentes primários que afetam diretamente as vias respiratórias dos seres humanos, causando irritação e problemas respiratórios. Além disso, eles participam de complexas reações fotoquímicas na atmosfera, alternando-se em diferentes estágios de oxidação. Essas reações contribuem para o aumento de poluentes secundários, como ozônio (O<sub>3</sub>), peróxidos e formaldeído, que são conhecidos como oxidantes fotoquímicos e prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Os NO<sub>x</sub> também estão associados à formação de chuva ácida, devido à conversão em ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) na atmosfera e ao esgotamento da camada de ozônio na estratosfera (Vergnhanini Filho, 2016).

A formação de óxido nítrico durante os processos de combustão pode ocorrer por meio de quatro mecanismos distintos: térmico, combustível, ativo e via N<sub>2</sub>O (José; Senna, 2010).

- **NO térmico:** é o principal mecanismo de formação de NO durante a combustão. Ocorre devido à alta temperatura atingida durante o processo de queima, que causa a oxidação direta do nitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>) presente no ar. A alta temperatura da chama quebra as ligações entre os átomos de nitrogênio e leva à formação de NO. Esse processo é influenciado pela temperatura, tempo de residência dos gases na zona de combustão e disponibilidade de oxigênio.
- **NO ativo:** em combustíveis fósseis, as taxas de formação de NO podem exceder aquelas atribuídas à oxidação direta de N<sub>2</sub> pelo mecanismo térmico, especialmente em condições ricas em combustível. Esse NO formado, conhecido como NO ativo, é gerado em regiões próximas à zona da chama. NO ativo surge principalmente do radical CH, uma espécie intermediária produzida por uma reação complexa. Esse radical reage com o nitrogênio do

ar de combustão para formar cianeto de hidrogênio, que subseqüentemente é convertido em NO por meio de reações posteriores.

- NO combustível: na combustão de carvão, ocorre a conversão do nitrogênio quimicamente ligado ao combustível em óxido nítrico (NO), especialmente devido ao fato de que o carvão contém, no mínimo, cerca de 1% em massa de nitrogênio. Durante o processo de gaseificação, compostos contendo nitrogênio evaporam, resultando na formação de NO na fase gasosa. Esses compostos incluem cianeto de hidrogênio (HCN), principal produto quando o nitrogênio está presente em anéis aromáticos, e amônia (NH<sub>3</sub>), quando o nitrogênio está contido em aminas. Tanto o HCN quanto o NH<sub>3</sub> podem ser oxidados a NO, mas também podem ser reduzidos a N<sub>2</sub> por meio de reações paralelas.
- NO via N<sub>2</sub>O: o processo de formação de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) segue um mecanismo análogo ao térmico, onde átomos de oxigênio atacam as moléculas de N<sub>2</sub>. No entanto, na presença de uma terceira molécula M, a reação resulta em N<sub>2</sub>O, que pode então reagir com átomos de oxigênio para formar óxido nítrico (NO). As condições pobres em combustível reduzem a formação de CH e NO, conseqüentemente, a produção de NO ativo, enquanto baixas temperaturas diminuem a formação de NO térmico. Isso deixa o NO formado via N<sub>2</sub>O como a principal fonte de emissões de NO em combustão pré-misturada pobre, especialmente em turbinas a gás, devido às altas pressões e baixa energia de ativação desse processo. Assim, as baixas temperaturas têm um impacto menor nas reações envolvendo N<sub>2</sub>O em comparação com as reações do NO térmico.

#### 5.8.5 Compostos orgânicos voláteis

Os compostos orgânicos voláteis (COVs) são caracterizados pela sua alta pressão de vapor em condições normais, o que significa que eles evaporam facilmente em temperatura ambiente e entram na atmosfera. Esses compostos abrangem uma ampla variedade de substâncias, incluindo aldeídos, cetonas e hidrocarbonetos aromáticos monocíclicos, como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (Schirmer; Quadros, 2010).

As emissões de COVs têm duas origens principais: biogênicas e antropogênicas. As emissões biogênicas são naturais, como por exemplo, pela

vegetação, queima de florestas, erupções vulcânicas. Em contrapartida, as antropogênicas são resultado de atividades humanas, como queima de combustíveis fósseis, incineração de resíduos sólidos e processos industriais (Silva *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2023).

Durante os processos de combustão, uma variedade de COVs pode ser liberada, resultando da combustão incompleta. Esses compostos podem incluir frações do próprio combustível que não foram completamente queimadas e são expelidas com outros produtos de combustão e com compostos formados a partir de hidrocarbonetos não oxidados completamente (José; Senna, 2010).

Quando liberados na atmosfera, esses compostos podem reagir com óxidos de nitrogênio (Nox) e luz solar para formar ozônio troposférico (“smog fotoquímico”), que é prejudicial à saúde humana e contribui para a formação de problemas na qualidade do ar. Além disso, compostos como benzeno, tolueno e xilenos têm sido foco de preocupação tanto em relação à formação do ozônio quanto aos efeitos adversos à saúde. O benzeno é carcinogênico e pode aumentar o risco de leucemia em exposições ocupacionais, tanto o tolueno quanto os xilenos podem causar irritação respiratória e afetar o sistema nervoso (Merten *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2023).

Os aldeídos são os segundos gases orgânicos mais comuns na atmosfera, logo após os hidrocarbonetos. A utilização de etanol como combustível veicular contribui consideravelmente para a emissão desses compostos. Entre os aldeídos, o formaldeído é particularmente prevalente, ele é conhecido por ser irritante para os olhos e o trato respiratório, sendo classificado como altamente suspeito de ser um composto carcinogênico, levantando preocupações adicionais sobre os riscos à saúde associados à sua exposição (Alvim *et al.*, 2011).

O Quadro 3 resume os efeitos resultantes da exposição aos compostos orgânicos voláteis nos indivíduos.

**Quadro 3** - Relação da concentração de COV x efeito.

Concentração de COV (mg/m <sup>3</sup> )	Efeito	Faixa de exposição
< 0,20	Sem efeitos	Faixa de conforto
0,20 - 3,0	Irritação; possível desconforto	Faixa de exposição multifatorial
3,0 - 25,0	Irritação e desconforto; possíveis dores de cabeça	Faixa de desconforto
> 25,0	Efeitos neurotóxicos	Faixa tóxica

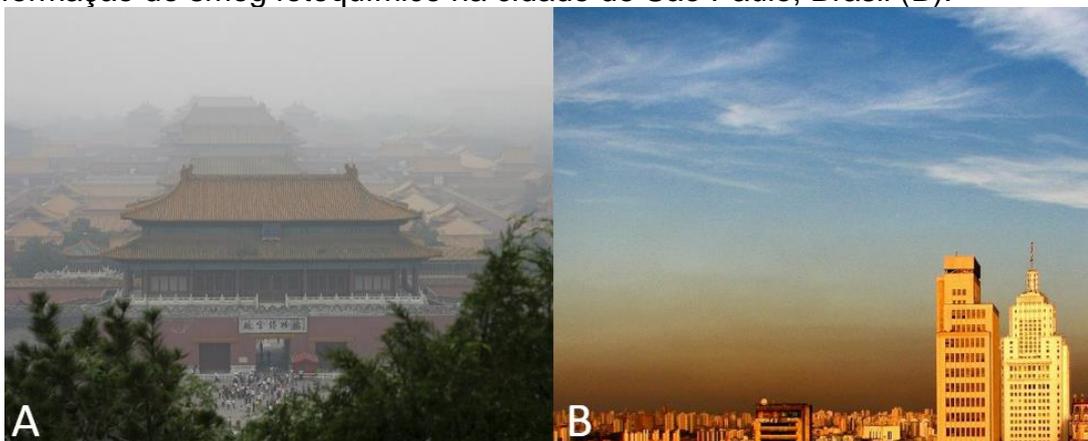
**Fonte:** Merten *et al.* (2016).

Os compostos orgânicos voláteis possuem influência na formação de *smog* fotoquímico, esse termo "*smog*" é uma combinação das palavras "*smoke*" (fumaça) e "*fog*" (neblina). Ele descreve uma forma de poluição do ar que é composta por uma mistura de poluentes, incluindo gases como dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (Nox), compostos orgânicos voláteis e material particulado. Esta mistura pode ser causada por fontes industriais, veículos a motor, processos de combustão, entre outros (Schirmer; Quadros, 2010; Souza *et al.*, 2023).

Existem dois tipos de *smog*: o industrial, geralmente com tons acinzentados (Figura 4 - A), é associado principalmente à queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, em indústrias e usinas de energia. Os poluentes liberados por essas fontes combinam-se com a umidade do ar para formar partículas suspensas, criando uma névoa de poluição (Souza *et al.*, 2023).

O *smog* fotoquímico, com tonalidade amarelada, amarronzada ou em alguns casos avermelhada (Figura 4 - B), é mais comum em áreas urbanas, sendo formado pela reação de poluentes atmosféricos primários, como óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, na presença de luz solar. A reação química produz uma mistura complexa de produtos, incluindo ozônio troposférico, que é prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente (Souza *et al.*, 2023).

**Figura 4** - Formação do *smog* industrial na cidade de Pequim, China (A), formação do *smog* fotoquímico na cidade de São Paulo, Brasil (B).



Fonte: Souza *et al.* (2023).

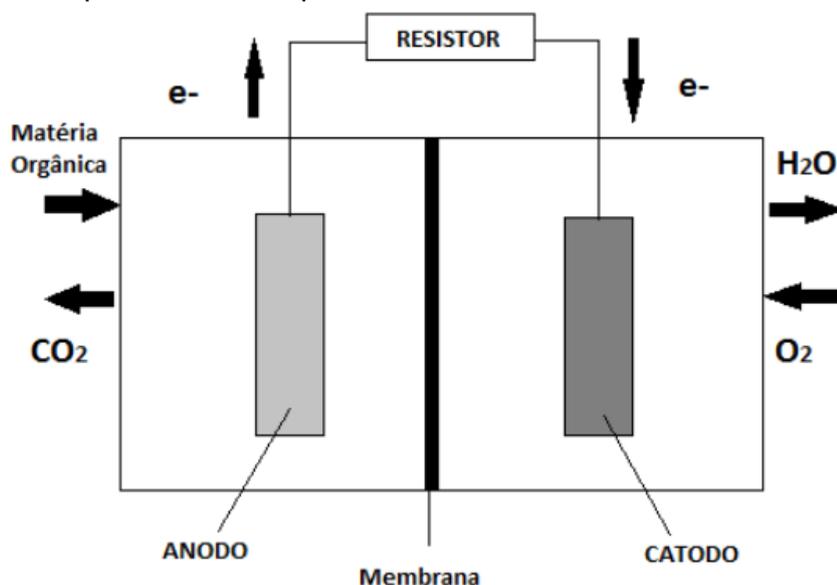
## 5.9 Célula combustível microbiana

As células combustíveis microbiológicas (CCM) emergem como uma inovação promissora não apenas na produção de energia elétrica e tratamento de efluentes, mas também na redução dos impactos ambientais. Ao substituir os combustíveis

fósseis, as CCMs contribuem significativamente para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e para a preservação dos recursos naturais. Essa tecnologia eficiente não só gera eletricidade de forma sustentável, mas também promove a quebra da matéria orgânica, tornando-a menos prejudicial ao meio ambiente (Costa *et al.*, 2019; Galera; Prado; Duarte, 2018).

A célula de combustível microbiológica possui duas seções divididas por uma membrana que transporta prótons. Cada seção tem um eletrodo, chamado de ânodo e cátodo. As bactérias crescem na CCM ao oxidar matéria orgânica, liberando elétrons para o ânodo e prótons para a solução. Esses prótons movem-se através da membrana para a seção do cátodo. No cátodo, onde há oxigênio disponível, ocorrem reações com os elétrons e prótons. O ânodo e o cátodo são conectados por um resistor, e esse circuito é ligado a um multímetro e a um computador para coletar dados, como mostra na Figura 5 (Costa *et al.*, 2019; Galera; Prado; Duarte, 2018).

**Figura 5** - Esquema dos componentes básicos de uma CCM.



**Fonte:** Galera, Prado e Duarte (2018).

No ânodo, as bactérias decompõem a matéria orgânica gerando elétrons, o que requer um ambiente sem oxigênio para garantir que os elétrons possam migrar para o eletrodo e participar do circuito. A membrana entre as seções permite apenas a passagem de prótons, não de elétrons. Posteriormente, os elétrons alcançam o cátodo, onde há oxigênio disponível. Nesse ambiente, o oxigênio age como receptor

final dos elétrons e, juntamente com os prótons transportados através da membrana, forma moléculas de água (Costa *et al.*, 2019; Galera; Prado; Duarte, 2018).

As células combustíveis microbiológicas também oferecem vantagens econômicas significativas. Ao integrar a produção de energia elétrica com o tratamento de efluentes, as CCMs podem reduzir os custos operacionais associados ao tratamento de resíduos. Além disso, a geração de eletricidade de forma sustentável pode proporcionar uma fonte de energia mais econômica a longo prazo, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e os custos associados a eles (Costa *et al.*, 2019; Galera; Prado; Duarte, 2018).

No entanto, apesar desses benefícios, as CCMs ainda enfrentam desafios, como a necessidade de otimização do desempenho e a redução dos custos de produção, para uma adoção mais ampla em diferentes setores industriais e comerciais (Costa *et al.*, 2019; Galera; Prado; Duarte, 2018).

## 6 CONCLUSÃO

O presente estudo proporcionou uma visão abrangente sobre o processo de combustão. Ao explorar a literatura científica, foi possível identificar a importância desse processo em diversos aspectos do cotidiano, desde a geração de energia até os sistemas de transporte e as indústrias. No entanto, também foram evidenciados os impactos negativos associados à combustão, como a poluição ambiental e seus efeitos adversos na saúde e no meio ambiente.

Nesse contexto, torna-se claro que compreender a combustão é crucial para os alunos dos cursos de Química Industrial e Engenharia, uma vez que poderá proporcionar uma base sólida para atuarem efetivamente no setor industrial. Além disso, ao disponibilizar recursos educacionais sobre o tema, pode-se contribuir para a formação de profissionais mais conscientes e capacitados para lidar com os desafios relacionados à combustão.

Desta forma, a presente revisão de literatura buscou não apenas ampliar o conhecimento sobre o processo de combustão, mas também fornecer subsídios para a formação acadêmica e profissional dos alunos, preparando-os para enfrentar os desafios e contribuir para soluções sustentáveis no campo da energia e da indústria.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, B. S.; BASÍLIO, R. G. **Combustão espontânea**: estudo da fermentação do algodão como fator gerador de incêndios em indústrias têxteis. CBM-SC, 2019. Disponível em: <https://cbm.sc.gov.br/index.php/biblioteca/trabalhos-academicos/tcc-egov-cpie/category/51-pgpie-2019?download=657:combustao-espontanea-estudo-da-fermentacao-do-algodao-como-fator-gerador-de-incendios-em-industrias-texteis-bruno-souza-de-albuquerque-1-rodrigo-goncalves-basilio-2#:~:text=No%20contexto%20da%20investiga%C3%A7%C3%A3o%20de,alguns%20deles%2C%20vultosos%20preju%C3%ADzos%20econ%C3%B4micos>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- ALVIN, D. S. *et al.* Estudos dos compostos orgânicos voláteis precursores de ozônio na cidade de São Paulo. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 2, p. 189-196, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/GVfxgPBBmFLW8PmncMKcrmN/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 09 dez. 2023.
- ARAÚJO, I. P. S.; MORAES, R. J. B.; COSTA, D. B. Boas práticas para redução da emissão de material particulado proveniente dos canteiros de obras. *In*: SERRA, S. B. *et al.* **Tecnologias para o Canteiro de Obras Sustentável**. São Carlos: FINEP, 2017. p. 91-105. Disponível em: [https://editorascienza.com.br/pdfs/978\\_85\\_5953\\_027\\_8\\_capitulo\\_4.pdf](https://editorascienza.com.br/pdfs/978_85_5953_027_8_capitulo_4.pdf). Acesso em: 27 mar. 2024.
- BARBOSA, J. L. **Desenvolvimento de amostrador passivo para óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) na atmosfera**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/34243>. Acesso em: 03 fev. 2024.
- BELO, P. I. D.; TOFOLI, R. **Quantificação dos níveis de partículas finas (MP<sub>2,5</sub>) no município de Vitória**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2011. Disponível em: [https://engenhariaambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br/files/field/anexo/quantificacao\\_dos\\_niveis\\_de\\_particulas\\_finas\\_mp25\\_no\\_municipio\\_de\\_vitoria.pdf](https://engenhariaambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br/files/field/anexo/quantificacao_dos_niveis_de_particulas_finas_mp25_no_municipio_de_vitoria.pdf). Acesso em: 15 mar. 2024.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - BEN 2023**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf). Acesso em: 21 fev. 2024.
- BRITO, P. H. F.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, G. M. M. Composição química do material particulado atmosférico: uma revisão de literatura. **HOLOS**, v. 3, p. 62-74, 2018. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4648/pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

CARVALHO JR, J. A.; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis, Editora da UFSC, 2007.

CERON, L. P. Controle do excesso de ar em processos de combustão. **Rev Meio Filtrante**, n. 44, 2010. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/770/controle-do-excesso-de-ar--em-processos-de-combustao#:~:text=O%20excesso%20de%20ar%20%C3%A9,entalpia%20dos%20produtos%20da%20combust%C3%A3o>. Acesso em: 15 jan. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Proncove**. São Paulo, 2012. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>. Acesso em: 19 jan. 2024.

COELHO, S. O. **Avaliação das emissões atmosféricas das principais termelétricas brasileiras a gás natural – Ano Base 2013**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2014. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2014/02/TFC-SILAS-FINAL.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2024.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 382, de 26 de dezembro de 2006**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Disponível em: <https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-382-Poluentes-atmosfericos.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2024.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 436, de 22 de dezembro de 2011**. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. Disponível em: <https://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Conama-436-11-Limites-m%C3%A1ximos-de-emiss%C3%B5es-de-poluente-do-ar.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2024.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: <http://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/11/2018&jornal=515&pagina=155&totalArquivos=178>. Acesso em: 19 jan. 2024.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE GOIÁS. **Manual operacional de bombeiros: perícia de incêndio**. Goiânia, 2017. Disponível em: <https://www.bombeiros.go.gov.br/wp-content/uploads/2017/11/MOB-PER%C3%8DCIA-DE-INC%C3%80NDIO.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2023.

COSTA, A. B. *et al.* Determinação do poder calorífico no controle de qualidade de combustíveis para sistemas de geração de energia e aquecimento industrial. **Anais...** XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador: ENEGEP, 2009. Disponível em: [https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_tn\\_stp\\_091\\_615\\_14073.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_stp_091_615_14073.pdf). Acesso em: 19 jan. 2024.

COSTA, L. N. *et al.* Produção de biocompostos a partir de célula combustível microbiológica. **Braz J Develop**, v. 5, n. 7, p. 8544-8550, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/2260/2277>. Acesso em: 03 maio 2024.

COUTINHO, S. L. **Emissão de poluentes atmosféricos por automóveis no Brasil, 2010-2020**: uma revisão de literatura. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Federal do Pará. Ananindeua, 2022. Disponível em: [https://bdm.ufpa.br/bitstream/prefix/3876/1/TCC\\_EmissaoPoluentesAtmosfericos.pdf](https://bdm.ufpa.br/bitstream/prefix/3876/1/TCC_EmissaoPoluentesAtmosfericos.pdf). Acesso em: 11 mar. 2023.

D'AMELIO, M. T. S.; CAMPOS, L. C. L.; ALVIM, D. S. Estudo da variabilidade do monóxido de carbono atmosférico na Região Metropolitana de Campinas – SP e comparação com São Paulo – SP. **Ensaio USF**, v. 1, n. 1, p. 80-90, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.24933/eusf.v1i1.50>. Acesso em: 21 mar. 2023.

DUFROYER, C. R.; CARRIM, A. J. I. Modelo teórico para determinação do ponto de fulgor de misturas binárias de solventes orgânicos em água. **Rev UniAraguaia**, v. 6, p. 1-10, 2014. Disponível em: <https://sipe.uniaraquuaia.edu.br/index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/view/206/188>. Acesso em: 11 mar. 2024.

GALERA, R.; C.; PRADO, P, F. Célula combustível microbiana: material didático para o ensino de Microbiologia. **Revista de Ensino de Biologia da SBEnBio**, v. 11, n. 1, p. 25-35, 2018. Disponível em: <https://renbio.org.br/index.php/sbenbio/article/view/80/22>. Acesso em: 03 maio 2024.

GRACETTO, A. C.; HIOKA, N.; SANTIN FILHO, O. Combustão, chamas e testes de chama para cátions: proposta de experimento. **Química Nova na Escola**, n. 23, 2006. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc23/a11.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Combustão e Propulsão**. INPE, 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: <http://www.lcp.inpe.br/linhas-pesquisa/combustao/#:~:text=A%20import%C3%A2ncia%20da%20combust%C3%A3o%20pode,g%C3%A1s%20natural%2C%20carv%C3%A3o%20ou%20biomassa>. Acesso em: 23 jan. 2024.

JOSÉ, H. J.; SENA, R. F. **Combustão e combustíveis**. UFPB, 2010.

MARQUES, M. L.; VIDAL, V. V. **Combustão espontânea**: entendendo os mecanismos de reação e a sua relação com a dinâmica de incêndio. CBM-SC, 2015. Disponível em: <https://www.cbm.sc.gov.br/index.php/biblioteca/trabalhos-academicos/tcc-outros-cursos/category/86-cpi-curso-de-pericia-de-incendio-e-explosao-2015?download=646:combustao-espontanea-entendendo-os-mecanismos-de-reacao-e-a-sua-relacao-com-a-dinamica-de-incendio-marcos-leandro-marques-1-vanderlei-vanderlino-vidal-2>. Acesso em: 06 dez. 2023.

MERTEN, H. O. *et al.* Compostos orgânicos voláteis de tintas imobiliárias e certificações ambientais: estudo de caso para subsolos. **REEC**, v. 13, n. 1, p. 128-132, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/reec/article/view/41988/pdf>. Acesso em: 05 fev. 2024.

NFPA 921. **Guide for Fire and Explosion Investigations**. Quincy, Massachusetts: NFPA, 2004.

NICHETTI, T. **Atualização do conhecimento científico tecnológico sobre as técnicas de determinação do ponto de fulgor, massa específica de produtos do petróleo e condutividade elétrica do etanol**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29717/000777635.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 mar. 2024.

OLIVEIRA, R. N.; FARIAS, L. N. Análise da emissão de material particulado através do sistema de transporte rodoviário. **Braz J Develop**, v. 7, n. 3, p. 26430-26443, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/26409/21621>. Acesso em: 09 mar. 2024.

OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde. **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS**. OPAS, 2021. Disponível em: [https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613\\_por.pdf](https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/54963/9789275724613_por.pdf). Acesso em: 09 mar. 2024.

QUEIROZ, M. T. A. *et al.* Aspectos da poluição atmosférica: análise da qualidade do ar em Coronel Fabriciano e Timóteo, MG, Brasil. **R Gest Industr**, v. 16, n. 1, p. 204-223, 2020. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/11768>. Acesso em: 02 fev. 2024.

RIBEIRO, D. Comburente. **Rev Ciência Elem**, v. 2, n. 3, p. 231, 2014. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2014/231/>. Acesso em: 21 jan. 2024.

SCHIRMER, W. N.; LISBOA, H. M. Química da atmosfera: constituintes naturais, poluentes e suas reações. **Rev Tecno-Lógica**, v. 12, n. 2, p. 37-46, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v12i2.563>. Acesso em: 21 jan. 2024.

SCHIRMER, W. N.; QUADROS, M. E. Compostos orgânicos voláteis biogênicos emitidos a partir de vegetação e seu papel no ozônio troposférico urbano. **REVSBAU**, v. 5, p. 25-42, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/revsbau.v5i1.66235>. Acesso em: 12 dez. 2023.

SILVA, C. M. *et al.* Avaliação da eficiência do método TO-15 para determinação de compostos orgânicos voláteis em condições típicas de ambiente urbano. **Quim Nova**, v. 39, n. 10, p. 1245-1253, 2016. Disponível em: <https://quimicanova.sbq.org.br/pdf/NT20160261>. Acesso em: 16 fev. 2024.

SILVA, T. E. P. *et al.* Enxofre: um poluente em potencial na composição do óleo diesel brasileiro. **Anais...** IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador: ConGeA, 2013. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/XI-081.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2024.

SOARES, E. L. S. F. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_m/ErikaLeiteDeSouzaFerreiraSoares.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/ErikaLeiteDeSouzaFerreiraSoares.pdf). Acesso em: 25 mar. 2024.

SOUZA, M. C. R. *et al.* A influência dos compostos orgânicos voláteis nas mudanças climáticas: uma breve revisão. **Rev Virtual Quim**, v. 15, n. 2, p. 227-240, 2023. Disponível em: <https://rvq.s bq.org.br/pdf/v15n2a04>. Acesso em: 23 jan. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Laboratório de Transformações Químicas**: QUI-168. UFJF, 2020. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Disponível em: [https://www2.ufjf.br/quimica/files/2018/08/Apostila\\_QUI168\\_2022.pdf](https://www2.ufjf.br/quimica/files/2018/08/Apostila_QUI168_2022.pdf). Acesso em: 12 dez. 2023.

TURNES, S. R. **Introdução à Combustão**: conceitos e aplicações. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.

VAZ, E. L. S.; CODARO, E. N.; ACCIARI, H. A. Efeito dos óxidos de nitrogênio e de enxofre na corrosão de cobre e zinco: um experimento para o ensino da corrosão. **Rev Virtual Quim**, v. 5, n. 4, p. 713-723, 2013. Disponível em: <https://rvq-sub.s bq.org.br/index.php/rvq/article/download/297/331/3264>. Acesso em: 13 fev. 2024.

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) na combustão industrial. **Rev IPT**, v. 1, n. 3, p. 6-19, 2016. Disponível em: <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/24>. Acesso em: 13 fev. 2024.

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) na combustão industrial. **Rev IPT**, v. 4, n. 14, p. 65-76, 2020. Disponível em: <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/119>. Acesso em: 13 fev. 2024.