

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS E SUAS  
MISTURAS APLICADAS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Ramon Henrique de Paula Dutra

JUIZ DE FORA

2021

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS E SUAS  
MISTURAS APLICADAS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha  
Alves

JUIZ DE FORA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Dutra, Ramon Henrique de.

Revisão bibliográfica sobre combustíveis renováveis e suas misturas aplicadas a motores de combustão interna / Ramon Henrique de Dutra. -- 2021.

56 f. : il.

Orientador: Marco Aurélio da Cunha Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Combustíveis renováveis. 2. Motor de combustão interna. 3. Revisão bibliográfica. I. Alves, Marco Aurélio da Cunha, orient. II. Título.

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS E SUAS  
MISTURAS APLICADAS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Ramon Henrique de Paula Dutra

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 06 de Março de 2021

Por:

---

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves

---

M. Sc. Matheus Pereira Antunes

---

M. Sc. Leomar Santos Marques

## RESUMO

A utilização de etanol, puro ou misturado à gasolina em motores a combustão interna com ignição por faísca assim como o biodiesel e sua mistura com diesel nos motores com ignição por compressão já está bem estabelecida. Isto indica que o uso de combustíveis renováveis é uma alternativa apropriada a curto prazo, pois demandam menores alterações nos motores de veículos já produzidos e configuram menores custos aos indivíduos. Apesar da substituição dos motores a combustão interna por motores elétricos estar ganhando cada vez mais força, ainda é uma realidade distante dos brasileiros, pois veículos elétricos novos apresentam elevado custo de aquisição e a modificação de um veículo não-elétrico demandaria alto investimento e grandes intervenções. Desta forma, entende-se que o uso de fontes renováveis ainda é a melhor alternativa dado seu menor custo para utilização gerando resultado mais imediato. Corroborando, os avanços tecnológicos têm propiciado estudos de desenvolvimento e aplicação de novos combustíveis e novas misturas somando ao uso de etanol e biodiesel. Dado este contexto, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da literatura referente aos diferentes combustíveis renováveis e misturas buscando analisar de forma comparativa alterações necessárias nos motores, vantagens econômicas e ambientais destes. Os resultados demonstraram que o biodiesel ainda é o principal objeto de estudo dentro dos artigos avaliados. Os estudos confirmam a efetividade da redução de emissões ao se utilizar o biodiesel e outro ponto favorável para sua utilização está na possibilidade de utilização dos sistemas de armazenamento e de alimentação de combustível já existente na maioria dos veículos. O biogás e o hidrogênio são combustíveis que gasosos tem apresentado crescente atenção na avaliação dos pesquisadores e a utilização deles também resultam na redução de emissões de monóxido de carbono. Porém, a utilização destes dos combustíveis em forma de gás demanda adaptações nos sistemas de armazenamento e injeção de combustível, o que geraria necessidade de maior investimento para que sejam aplicados nos veículos que já se encontram em circulação. Apesar deste ponto, o hidrogênio apresenta vantagens por poder ser aplicado também em células de combustíveis para veículos elétricos.

**Palavras-chave:** Combustíveis renováveis. Motor de combustão interna. Revisão bibliográfica.

## ABSTRACT

The use of ethanol, pure or mixed with gasoline in internal combustion engines with spark ignition as well as biodiesel and its mixture with diesel in engines with compression ignition is well established. This indicates that the use of renewable fuels is an appropriate alternative in the short term, as they demand less changes in the engines of vehicles already produced and configure lower costs for individuals. Although the replacement of internal combustion engines with electric motors is gaining more and more strength, it is still a distant reality from Brazilians, as new electric vehicles have a high acquisition cost and the modification of a non-electric vehicle would require high investment and major interventions. Thus, it is understood that the use of renewable sources is still the best alternative given its lower cost for use, generating a more immediate result. Corroborating, technological advances have led to studies on the development and application of new fuels and new mixtures, adding to the use of ethanol and biodiesel. Given this context, this study aimed to carry out a literature review on the different renewable fuels and mixtures of these, seeking to analyze in a comparative way the necessary changes in the engines, their economic and environmental advantages. The results showed that biodiesel is still the main object of study within the evaluated articles. Studies confirm the effectiveness of reducing emissions when using biodiesel and another favorable point for its use is the possibility of using the storage and fuel supply systems that already exist in most vehicles. Biogas and hydrogen are fuels that are gaseous and have shown increasing attention in the evaluation of researchers and their use also results in the reduction of carbon monoxide emissions. However, the use of these gaseous fuels requires adaptations in the fuel injection and storage systems, which would generate the need for greater investment so that they are applied to vehicles that are already in circulation. Despite this point, hydrogen offers advantages to be able to be applied also in fuel cells for electric vehicles.

**Keywords:** Renewable fuels. Internal combustion engine. Literature review

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor alternativo .....	15
Figura 2: Representação dos tempos de motor quatro tempos .....	16
Figura 3: Exemplo de motor dois tempos.....	18
Figura 4: Equação geral de transesterificação de um triglicerídeo.....	23
Figura 5: Fluxograma da metodologia empregada.....	28

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultado da busca das palavras chave do trabalho na base <i>Science Direct</i> .	29
Gráfico 2: Resultado da busca das palavras chave do trabalho na base <i>Scopus</i> .....	30
Gráfico 3: Resultado da busca das palavras chave do trabalho na base <i>Engineering Village</i> .....	30
Gráfico 4: Combustíveis avaliados nos trabalhos analisados.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Artigos selecionados da base <i>Science Direct</i> .....	32
Tabela 2: Artigos selecionados da base <i>Scopus</i> .....	36
Tabela 3: Artigos selecionados da base <i>Engineering Village</i> .....	41

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

- ABE - Acetona-Butanol-Etanol
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
- CFM - Coherent Flame Model
- EGR - *Exhaust gas recirculation*
- FSWM - *Flame Surface Wrinkling Model*
- GDI - *Gasoline Direct Injection*
- GLP - Gás liquefeito de petróleo
- GNV - Gás natural veicular
- HCCI - *Homogenous Charge Compression Ignition*
- LTC - *Low Temperature Combustion*
- MCI - Motor a combustão interna
- MIC - Motor de ignio por compressão
- MIE - Motor de ignio espontânea
- MIF - Motor de ignio por faísca
- PCCI - *Premixed Charge Compression Ignition*
- PMI - Ponto morto inferior
- PMS - Ponto morto superior
- PNPB - Programa Nacional de Produo de Biodiesel
- PODE<sub>n</sub> - éteres de Polioximetileno-dimetil
- RCCI - *Reactivity Controlled Compression Ignition*
- TAI - Temperatura de auto-ignio

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1. Objetivo geral .....	13
1.2. Objetivos específicos .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1. Motores alternativos .....	14
2.1.1. Motor de ciclo Otto.....	15
2.1.2. Motor de ciclo Diesel.....	15
2.1.3. Motores alternativos a quatro tempos.....	16
2.1.4. Motores alternativos a dois tempos .....	17
2.2. Combustão de Baixa Temperatura.....	18
2.2.1. Ignição por Compressão de Mistura Homogênea.....	19
2.2.2. Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada .....	19
2.2.3. Ignição por Compressão Controlada por Reatividade .....	19
2.3. Combustíveis .....	20
2.3.1. Gasolina .....	20
2.3.2. Diesel .....	21
2.3.3. Etanol.....	22
2.3.4. Biodiesel .....	22
2.3.5. Biogás .....	24
2.3.6. Hidrogênio .....	24
2.3.7. Revisões sobre combustíveis alternativos .....	24
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	27
<b>4. RESULTADOS</b> .....	29
4.1. Artigos da base <i>Science Direct</i> .....	31
4.2. Artigos da base <i>Scopus</i> .....	35
4.3. Artigos da base <i>Engineering Village</i> .....	40
<b>5. DISCUSSÕES</b> .....	45
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	47
6.1. Conclusões .....	48
6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	48
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	49

## 1. INTRODUÇÃO

O motor de combustão interna (MCI) pode ser definido como uma máquina térmica cujo calor necessário para a obtenção do trabalho é dado através de uma combustão de um fluido ativo, composto pela mistura de combustível e ar (BRUNETTI, 2012). Os motores a combustão podem ainda ser divididos em dois principais tipos, o motor de ignição por faísca (MIF) e o motor de ignição espontânea (MIE), também conhecido como motor de ignição por compressão (em inglês *compression ignition* - CI). No primeiro tipo, a combustão do fluido ativo comprimido ocorre após uma faísca ser emitida dentro do cilindro, enquanto no segundo o ar é comprimido, a injeção de combustível é realizada diretamente no interior do cilindro e a combustão ocorre pelo contato do combustível com o ar a uma temperatura elevada.

O uso de motores a combustão interna se mostra de grande importância para a população, principalmente na aplicação de transporte, tanto de pessoas como de bens, e também para a geração de energia (HEYWOOD, 1988). Porém, o elevado nível de poluição resultante da combustão tem gerado preocupação nos principais órgãos ligados à saúde e ao meio ambiente, resultando em resoluções que visam exigir uma redução nos índices de poluição, como, por exemplo, a Resolução nº 436 do CONAMA (BRASIL, 2011). Diante disto, se faz necessário buscar alternativas menos poluentes, seja para substituir os combustíveis de origem fóssil, através de melhorias no motor a combustão interna para se elevar sua eficiência, como a tecnologia de combustão de baixa temperatura (*Low Temperature Combustion* - LTC) ou até mesmo com a aplicação de novos motores para serem utilizados em substituição ao MIC, como, por exemplo, motores elétricos alimentados por baterias ou por células de combustíveis.

Combustíveis alternativos são definidos por Bae e Kim (2016) como qualquer combustível que não gasolina e diesel. Choudhary e Phillips (2011) pontuam que combustíveis renováveis são geralmente definidos como aqueles resultantes de processamento e melhoria de biomassa e resíduos de óleos urbanos. A resolução 734 da ANP define biocombustível como uma substância que pode ser utilizada de forma direta ou após modificações em motores a combustão interna e são produzidas a partir de biomassa renovável (BRASIL, 2018). O uso destes combustíveis busca a sustentabilidade energética através de fontes renováveis frente aos combustíveis de

fonte fóssil limitada; aumentar a eficiência do motor e reduzir as emissões devido às qualidades físicas superiores dos combustíveis alternativos; e reduzir o uso de combustíveis fósseis. A substituição do combustível é uma alternativa mais simples e de menor custo, visto que esta mudança não demandaria a total substituição dos sistemas motores de um veículo. Atualmente, dois tipos de biocombustíveis são utilizados no Brasil, o etanol e o biodiesel.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o etanol pode ser obtido através da fermentação de cana de açúcar, milho, beterraba e batata, sendo a cana de açúcar a mais empregada na produção brasileira (ANP, 2020a). O etanol é empregado nos MIF de duas formas: anidro e hidratado. A primeira forma é aplicada na mistura com a gasolina, não sendo vendida diretamente para os consumidores finais. O etanol hidratado é vendido como combustível para motores desenvolvidos para uso de etanol ou motores de tecnologia *flex* que operam com qualquer proporção de gasolina e etanol hidratado (ANP, 2020b).

O biodiesel é definido pela ANP como um combustível resultante de uma transesterificação de gorduras animais e espécies de óleo vegetais como soja, palma, girassol, entre outros. No Brasil o principal produto utilizado para a geração de biodiesel é a soja. O biodiesel pode ser utilizado juntamente ao óleo diesel fóssil ou substituí-lo totalmente em motores de ignição espontânea (ANP, 2020c).

Estudos comprovam que a utilização de etanol juntamente com a gasolina eleva o desempenho do motor de ignição por faísca, além de reduzir as emissões de gases poluentes (KOÇ et al., 2009). Maziero et al. (2006) verificaram uma queda nas emissões de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos e particulado, mas acompanhada de um aumento nas emissões de óxido de nitrogênio e uma redução na potência do motor de ignição por compressão com o uso de biodiesel de girassol.

Atualmente os motores elétricos alimentados através de baterias são considerados por muitos como a melhor alternativa ao uso dos motores a combustão interna, pois são defendidos como zero emissão (MALAQUIAS et al., 2019). Porém, é necessário avaliar a forma pela qual se dá a geração de energia para recarregamento de baterias de veículos elétricos, dado que possa estar ocorrendo apenas uma substituição da emissão de poluição pelos escapamentos dos veículos para o local de produção de energia caso a mesma não seja suficientemente descarbonizada (KALGHATGI, 2018).

Delgado et al. (2017) consideram que a disseminação de veículos elétricos no Brasil deva ocorrer mais tarde que em países devido a dois fatores principais. O primeiro seria o uso de biocombustíveis, cujo setor já se encontra bem desenvolvido, na descarbonização da economia brasileira. O segundo fator seria o estoque de veículos movidos a motores de combustão interna, que afetaria a velocidade de adoção dos veículos elétricos. Outros pontos que corroboram para que os veículos com motores de combustão interna permaneçam exercendo papel importante para a população no Brasil são os elevados custos de aquisição de um veículo elétrico para o poder aquisitivo do brasileiro e as intervenções de grande investimento para substituir o conjunto propulsor da frota de veículos já existente (BANDEIRA, 2020).

Apesar do crescente interesse e também dos avanços da substituição dos motores em veículos automotores, os motores a combustão interna estacionários para geração de energia continuarão tendo demanda. Isto ocorre devido a locais remotos sem infraestrutura de abastecimento de energia elétrica que possuem a necessidade de uso de motogeradores sem a possibilidade de substituição por motores elétricos e a aplicação de motores a combustão interna em sistemas de geração de energia de emergência, com destaque para hospitais.

O Brasil é um país de dimensões continentais e com diversos locais de difícil acesso. Isto gera a necessidade de veículos com elevada autonomia ou a possibilidade de se reabastecer durante o trajeto. Porém, locais de difícil acesso podem não possuir estrutura de reabastecimento, gerando a necessidade de o combustível ser transportado pelos próprios veículos a fim de se ampliar o alcance. Portanto, enquanto não houver estrutura de recarga compatível com os veículos elétricos, ainda deverá haver demanda por veículos movidos por motores a combustão interna.

Por estes motivos apresentados, entende-se que o uso de combustíveis renováveis no Brasil ainda é a melhor alternativa para redução do uso de combustíveis fósseis e redução da poluição. Assim, este trabalho busca realizar um levantamento de combustíveis renováveis que atualmente estão sendo estudados bem como misturas destes.

### 1.1. Objetivo geral

- Realizar uma revisão de literatura de trabalhos acerca dos diferentes tipos de combustíveis renováveis e suas misturas em desenvolvimento atualmente.

### 1.2. Objetivos específicos

- Avaliar de forma comparativa vantagens de diferentes tipos de combustíveis renováveis;
- Avaliar as alterações necessárias nos motores de combustão interna para utilização dos diferentes combustíveis;
- Avaliar as modificações demandadas nos veículos para a aplicação destes diferentes combustíveis.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em três principais seções. A primeira seção busca realizar um breve resumo sobre o histórico de desenvolvimento dos motores de combustão interna, abordando os diferentes tipos de classificações. Na sequência, é abordado o conceito de combustão de baixa temperatura, que é um avanço dos motores a combustão interna juntamente com os principais modelos que aplicam este modelo. Por fim, será abordado um histórico dos principais combustíveis utilizados em motores a combustão interna, dando um maior enfoque nos utilizados no Brasil. Também é apresentada uma breve revisão de estudos já realizados no mundo acerca de combustíveis renováveis.

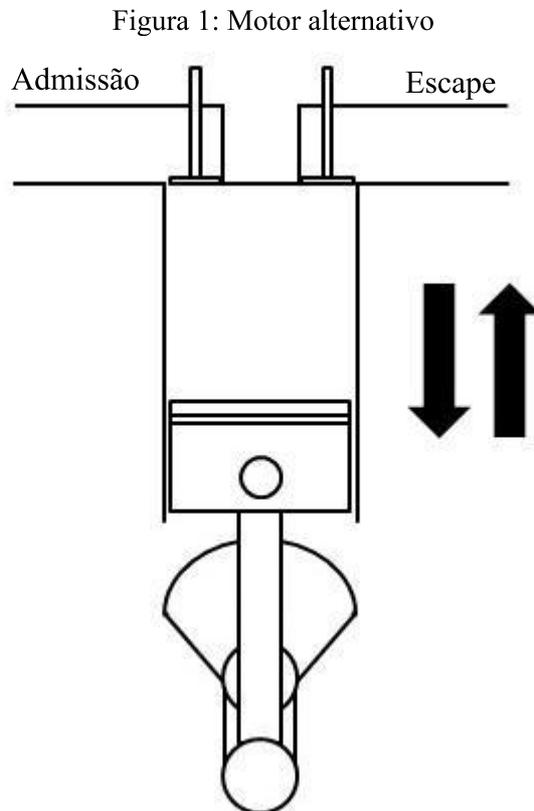
A finalidade de um motor a combustão interna é produzir potência mecânica a partir da reação de queima ou oxidação do combustível presente na mistura ar-combustível no interior do cilindro. Os motores podem ser classificados de acordo com sua aplicação, de acordo com sua construção, pelos ciclos de trabalho, pela construção e localização das válvulas, de acordo com o combustível, método de injeção, forma de ignição, de acordo com a construção da câmara de combustão, pela forma de controle da aceleração e pelo método de refrigeração (HEYWOOD, 1988). A seguir serão descritas as principais características pelas quais os motores podem ser classificados.

### 2.1. Motores alternativos

A maioria dos motores de combustão interna é do tipo alternativo, onde os pistões realizam movimentos alternados no interior dos cilindros, isto é, o pistão se desloca em um sentido e depois retorna no sentido oposto, sendo o trabalho entregue para um eixo de manivelas rotativo (PULKRABEK, 1997). O movimento que ocorre no sentido do cabeçote do motor pode ser responsável por comprimir o fluido ativo ou expelir os gases resultantes da combustão, enquanto o movimento oposto realiza a sucção do fluido de trabalho ou é realizado pela expansão da combustão.

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma seção de um motor alternativo. Neste caso, trata-se de um motor montado na vertical e o movimento do pistão se dá em

subida e descida. Para os motores alternativos montados na horizontal, o movimento do pistão ocorrerá da esquerda para a direita ou vice-versa.



Fonte: Elaboração do autor com base em Heywood (1988)

#### 2.1.1. Motor de ciclo Otto

O motor de ciclo Otto recebe este nome em homenagem ao seu criador, Nicolaus A. Otto. Também é conhecido como motor de ignição por faísca (MIF) pelo fato de a mistura ar-combustível entrar em combustão devido à emissão de uma centelha pelos eletrodos de uma vela (HEYWOOD, 1988). A injeção de combustível pode ocorrer no coletor de admissão ou diretamente no interior do cilindro nos motores do tipo *Gasoline Direct Injection-GDI* (BRUNETTI, 2012).

#### 2.1.2. Motor de ciclo Diesel

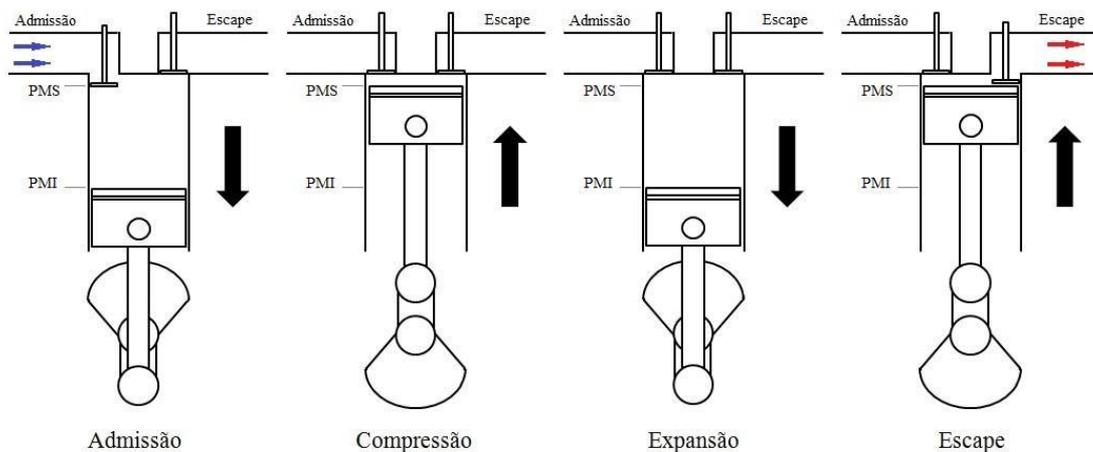
O motor de ciclo Diesel, ou motor de ignição espontânea (MIE), foi desenvolvido por Rudolf Diesel. Neste motor a combustão ocorre sem a necessidade de uma fonte externa de energia, pois o combustível líquido é injetado em um ar aquecido

pela compressão do cilindro (HEYWOOD, 1988). Para que ocorra a reação é necessário que a temperatura do ar comprimido atinja o valor da temperatura de autoignição do combustível (TAI).

### 2.1.3. Motores alternativos a quatro tempos

Pode-se definir como tempo um movimento do curso do pistão, tanto de subida ou de descida para um motor montado na vertical. Desta forma, um motor 4 tempos é aquele em que o pistão realiza quatro deslocamentos para completar um ciclo. Os quatro tempos são chamados de admissão, compressão, expansão e escape (BRUNETTI, 2012). Os quatro tempos são ilustrados na Figura 2 a seguir, onde cada tempo ocorre durante um giro de 180° do virabrequim, resultando em dois giros do mesmo para completar os quatro tempos.

Figura 2: Representação dos tempos de motor quatro tempos



Fonte: Elaboração do autor com base em Heywood (1988)

O tempo de admissão se inicia com o pistão no ponto morto superior (PMS), isto é, o ponto mais próximo do cabeçote do motor. O cilindro inicia o deslocamento se afastando do cabeçote e a válvula de admissão se abre, gerando uma sucção do fluido de trabalho devido a depressão existente dentro do cilindro. Nos motores Diesel e nos motores Otto GDI ocorre a admissão apenas de ar, enquanto nos demais motores de ciclo Otto é admitida a mistura ar-combustível. Este tempo termina quando o pistão atinge o ponto morto inferior (PMI).

Durante o tempo de compressão o pistão se desloca ao cabeçote do motor saindo do PMI para o PMS, comprimindo a mistura ar-combustível ou apenas o ar. Para isso, as válvulas de admissão e de escape encontram-se fechadas. Antes do pistão atingir o PMS, ocorre a injeção de combustível ou salto da faísca para que se tenha a combinação entre mínimo trabalho negativo e máximo trabalho positivo.

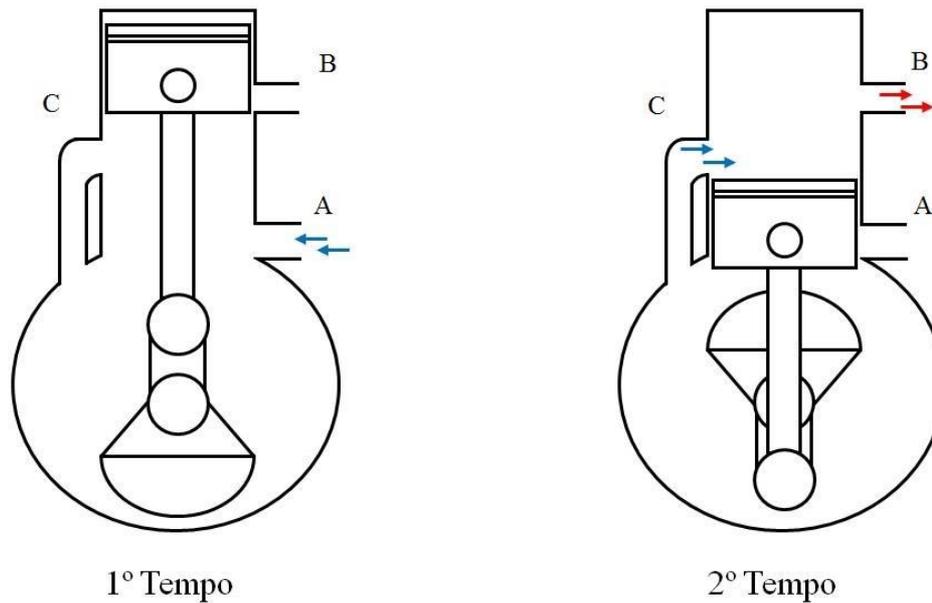
No tempo de expansão, o pistão é forçado a se deslocar do PMS para o PMI. Isto ocorre devido ao grande aumento da pressão no interior da câmara de combustão. É neste tempo que ocorre o trabalho positivo do ciclo.

Por fim, ocorre o tempo de escape. Neste ponto os gases resultantes da combustão saem do interior do cilindro através da válvula de escape, que se encontra aberta. Os gases são forçados para o sistema de escape pelo movimento de deslocamento do cilindro do PMI para o PMS.

#### 2.1.4. Motores alternativos a dois tempos

Um motor a dois tempos demanda apenas uma volta do eixo de manivelas para completar um ciclo. Desta forma, ao se comparar um motor dois tempos e um motor quatro tempos com mesmas dimensões, tem-se que o motor a dois tempos apresenta maior potência. A Figura 3 apresenta uma representação do modelo mais simples de um motor a dois tempos com portas de exaustão e de admissão que são abertas e fechadas pelo próprio pistão, reduzindo a necessidade de válvulas e comando de válvulas. Os dois tempos são a compressão e a expansão (BRUNETTI, 2012).

Figura 3: Exemplo de motor dois tempos



Fonte: Elaboração do autor com base em Brunetti (2012)

O tempo de compressão se inicia com o fechamento das portas de admissão (C) e de exaustão (B), comprimindo o conteúdo do cilindro. Neste ponto ocorre também a admissão de ar ou da mistura ar-combustível para a região do cárter através da porta A. Quando o pistão se aproxima do PMS, ocorre a injeção do combustível nos MIE e a emissão da faísca nos MIF, dando início à combustão.

No tempo de expansão o cilindro é deslocado do PMS para o PMI devido ao aumento de pressão resultante do processo de combustão. Ao se aproximar do PMI, ocorre a abertura das portas de exaustão (B) e de admissão (C). Os gases resultantes da combustão são expelidos e o fluido de trabalho que foi comprimido pelo próprio pistão no cárter entra na câmara. A construção do pistão e das portas é feita de forma a evitar que o fluido ativo escape diretamente pela porta de exaustão.

## 2.2. Combustão de Baixa Temperatura

A combustão de baixa temperatura, ou, em inglês, *low temperature combustion* (LTC) é um conceito de combustão para motores de combustão interna que atinge reduções simultâneas de óxidos de nitrogênio e material particulado além de um menor consumo específico. São exemplos de variações de motores que funcionam baseados no LTC: ignição por compressão de mistura homogênea (*homogeneous charge*

*compression ignition* - HCCI), ignição por compressão de carga pré-misturada (*premixed charge compression ignition* - PCCI) e ignição por compressão controlada por reatividade (*reactivity controlled compression ignition* - RCCI). Contudo, a aplicação de motores com o conceito LTC ainda precisa evoluir no controle de tempo de ignição e na taxa de combustão para que seja possível sua aplicação de forma comercial (AGARWAL et al., 2017).

#### 2.2.1. Ignição por Compressão de Mistura Homogênea

Um motor *homogeneous charge compression ignition* (HCCI) combina características do motor de ignição por faísca e do motor de ignição espontânea. A semelhança com o MIF se dá pelo processo de mistura ar/combustível antes do início da combustão. Porém, o HCCI não possui faísca e a ignição ocorre de forma espontânea se assemelhando ao MIE (YAO et al., 2009).

#### 2.2.2. Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada

De acordo com Karwade et al. (2020) o modelo *premixed charge compression ignition* (PCCI) funciona como um intermediário entre o motor de ignição espontânea convencional e o HCCI. No PCCI ocorre ainda um adiantamento do tempo de injeção do combustível quando comparado ao MIE, mas esta injeção ocorre de forma mais tardia do que é efetuado no HCCI.

#### 2.2.3. Ignição por Compressão Controlada por Reatividade

Outra tecnologia é o motor *reactivity controlled compression ignition* (RCCI), onde um combustível de baixa reatividade, isto é, um combustível com baixa tendência de ignição, é injetado no coletor de admissão e a mistura ar e combustível é admitida para o cilindro. Um combustível de alta reatividade é injetado diretamente dentro da câmara de combustão, sendo este a fonte da ignição. A tecnologia RCCI se mostra interessante, pois atinge níveis elevados de eficiência do motor em conjunto com consideráveis reduções de emissões de NO<sub>x</sub> e fuligem (KOKJOHN et al., 2010; EICHMEIER et al., 2014; REITZ e DURAISAMY, 2015; LI et al., 2017).

### 2.3. Combustíveis

Ao longo de toda a história dos motores a combustão interna, os principais combustíveis utilizados são a gasolina e o óleo diesel. A gasolina é empregada em motores de ignição por faísca, enquanto os motores de ignição espontânea fazem uso de óleo diesel. Estes dois combustíveis são de origem fóssil, obtidos a partir do processo de destilação do petróleo cru (HEYWOOD, 1981).

Porém, com o aumento da população mundial gerando maior demanda por energia, o fato de o petróleo ser uma fonte de energia não renovável e o crescimento dos impactos ambientais dos combustíveis fósseis, faz-se necessária a busca por combustíveis alternativos com origem renováveis e com índices de poluição inferiores (ZHEN e YANG, 2015).

Malaquias et al. (2019) através da avaliação de propriedades do etanol avaliam a importância deste biocombustível na sustentabilidade da mobilidade futura. Os autores pontuam que a produção de energia não será suficiente para atender a toda frota global de veículos elétricos; veículos elétricos não geram emissões poluentes durante seu funcionamento, mas a produção e o descarte de baterias juntamente com a extração de metais para sua produção causam grandes impactos ambientais; e que veículos híbridos são melhores soluções, pois combinam as vantagens de motores elétricos juntamente com os avanços de motores a combustão interna sobrealimentados e utilizando etanol.

#### 2.3.1. Gasolina

A gasolina é um combustível obtido através da mistura de diversas naftas resultantes do processamento do petróleo. Sua composição contém hidrocarbonetos de 4 a 12 carbonos com a maioria se situando entre 5 e 9 carbonos (BRUNETTI, 2012).

Dois tipos de gasolina são comercializados no Brasil, a gasolina A e a gasolina C. O primeiro tipo é a gasolina sem a adição de etanol, que é vendida para os distribuidores de combustíveis e não comercializada aos consumidores finais. A gasolina A recebe a adição de etanol anidro combustível nos distribuidores, passando a ser chamada de gasolina C, sendo esta vendida para o consumidor final. O teor de etanol anidro na gasolina C comum é de 27% do volume e na gasolina C premium é de 25% (ANP, 2020e).

De acordo com Masum et al. (2013), o uso do etanol como aditivo na gasolina permite utilizar maiores taxas de compressões nos motores devido a maior octanagem da mistura comparada a octanagem da gasolina pura. Adicionalmente, a maior velocidade de chama do etanol resulta em uma combustão completa de misturas ricas de combustível e ar quando o motor se encontra em maiores rotações. Ribeiro e Schirmer (2017) avaliaram a literatura acerca do uso da mistura gasolina/etanol e verificaram que o uso do etanol adicionado à gasolina resulta em reduções das emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono.

### 2.3.2. Diesel

O óleo diesel é um combustível obtido pelo processo de refino do petróleo. O diesel é constituído por correntes tradicionais (nafta pesada, querosene, diesel leve e diesel pesado) e correntes hidrotratadas (BRUNETTI, 2012).

O diesel é um combustível versátil com diversos tipos disponíveis em mercado dado os vários tipos de aplicações, como, por exemplo, veículos automotivos, máquinas agrícolas, transporte ferroviário, geração de energia elétrica e embarcações (ANP, 2020f). Atualmente, o óleo diesel vendido ao consumidor final no Brasil possui uma adição de 12% de biodiesel.

A utilização do diesel permite maiores taxas de compressão e conseqüentemente possui maior eficiência que a gasolina (HEYWOOD, 1981). Contudo, a combustão do diesel se inicia logo após sua injeção, antes que ocorra a mistura do combustível com o oxigênio no interior da câmara, gerando zonas de mistura rica que resultam na formação de óxidos de nitrogênio e material particulado (KALGHATGI et al., 2013). Outro ponto de atenção no diesel está relacionado a presença de enxofre em sua composição, o que acarreta a redução da vida útil do motor e emissões de óxidos de enxofre que promovem a formação de chuva ácida (ANP, 2020f).

Karavalakis et al. (2009) apresentam estudo sobre as emissões de um motor diesel utilizando uma mistura de diesel e biodiesel de soja. Os resultados obtidos no experimento indicam uma redução da emissão de CO, HC e material particulado, provavelmente consequência da presença de oxigênio na molécula de éster. Porém, o

uso da mistura contendo biodiesel gerou maiores níveis  $\text{NO}_x$ , gerado pelo menor número de cetanos do biodiesel.

### 2.3.3. Etanol

O etanol é um combustível oxigenado que pode ser obtido de duas formas. O álcool de primeira geração é aquele que o etanol é produzido através da fermentação natural de açúcares. Por meio da hidrólise enzimática da celulose produz-se a segunda geração do álcool (BRUNETTI, 2012).

O Brasil possui grande experiência no que tange a fabricação e uso de combustível etanol fabricado a partir da cana-de-açúcar. Isto é resultado do programa Pró-Álcool, iniciado em 1975 após a crise do preço do petróleo em 1973/1974, cuja finalidade inicial era reduzir a dependência brasileira das importações de petróleo utilizando o etanol inicialmente como aditivo na gasolina (KOHLHEPP, 2010). Contudo, a segunda crise do petróleo em 1979 alterou a estratégia para a aplicação do etanol hidratado em motores alterados para o uso exclusivo deste combustível (OLIVEIRA, 1991).

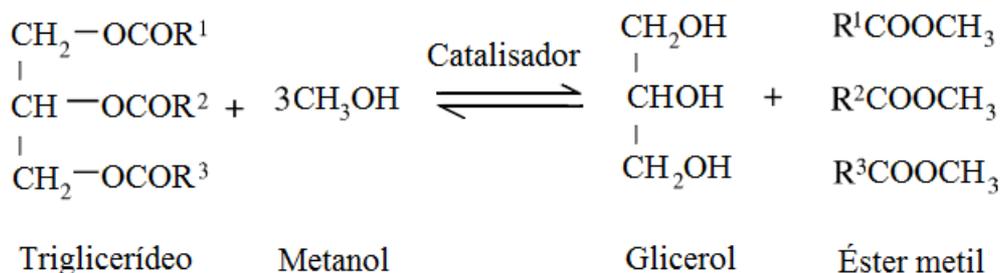
De Carvalho (2011) apresenta um estudo de comparação da eficiência de um motor Otto com diferentes combustíveis e conclui que as maiores proporções de etanol nas misturas de combustível resultaram em melhorias de desempenho e eficiência energética e exergética. O autor credita este resultado ao maior índice anti-detonção e velocidade de queima mais rápida do etanol quando comparado com a gasolina. Porém, o motor apresenta aumento de consumo específico de combustível quando utiliza o etanol.

### 2.3.4. Biodiesel

De acordo com Knothe (2010), biodiesel é um éster mono-alquílico obtido através do processo de transesterificação de um óleo vegetal ou uma gordura animal utilizando um álcool. Este processo se faz necessário principalmente pela densidade dos óleos vegetais, que se utilizados nos motores diesel causariam problemas, como a formação de depósitos.

O processo de transesterificação é basicamente a substituição do álcool de um éster por outro álcool e ocorre de forma natural a partir da mistura dos componentes, mas pode ser acelerada com o uso de um catalisador ácido ou básico (OTERA, 1993). A Figura 4 apresenta a equação geral de transesterificação de um triglicerídeo.

Figura 4: Equação geral de transesterificação de um triglicerídeo



Fonte: Elaboração do autor com base em Meher et al. (2006)

O Programa Nacional de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Proóleo) foi iniciado no ano de 1975 (ALMEIDA, 2010) e foi a primeira iniciativa do governo brasileiro em se estudar o uso de biodiesel. Porém, de acordo com Leite e Leal (2007), esta tentativa veio a fracassar por diversas razões, entre elas os baixos preços do diesel na época. No ano de 2004 houve novo empenho do governo na produção de biodiesel através da criação do Programa Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB). A princípio foram estipuladas as metas de obrigatoriedade da mistura de 2% de biodiesel no óleo diesel entre 2008 e 2012, e a partir de 2013 a porcentagem seria elevada para 5%. Posteriormente, a exigência de 2% foi alterada para o período de 2008 a 2010, seguida da adição de 5% ao óleo diesel mineral (MATTEI, 2010). Entre março de 2018 e março de 2019 o percentual de biodiesel adicionado ao diesel era 10%, sendo elevado para 11% até o mês de março de 2020 e atualmente o valor empregado é de 12% (ANP, 2020d).

Muruggesan et al. (2009) apresentam um trabalho de revisão acerca de biodiesel e concluem que este combustível pode ser utilizado em motores diesel sem que haja a necessidade de se realizar alterações no mesmo. O estudo também indica que o uso de biodiesel acarreta redução de emissão de CO, CO<sub>2</sub>, HC e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Porém, há um aumento na emissão de NO<sub>x</sub> e para contornar esta desvantagem, os autores sugerem o uso da recirculação dos gases de escape (EGR).

### 2.3.5. Biogás

O biogás é uma mistura de metano, dióxido de carbono, hidrogênio e outros gases e é obtido a partir da fermentação anaeróbica de resíduos de matéria orgânica (Alves et al., 1980). Barreto (2016) estudou o desempenho de um motor de um grupo motor-gerador de ciclo Otto operando com biogás, comparando com o mesmo motor alimentado por gasolina e gás natural veicular (GNV). As emissões do motor utilizando o biogás foram inferiores ao motor operando com gasolina e semelhante ao GNV. A única exceção foi de CO<sub>2</sub>, onde o biogás emitiu maiores valores que os outros dois combustíveis.

### 2.3.6. Hidrogênio

O interesse na utilização do hidrogênio como combustível para motores a combustão interna não é algo recente. Kukkonen (1981) revisou estudos sobre esta aplicação e concluiu que a mesma era tecnicamente viável, mas o custo desta solução se mostrava elevado frente aos demais combustíveis.

A aplicação do hidrogênio de forma pura ou em uma mistura com diesel em um motor de ignição espontânea é estudada por Dimitriou e Tsujimura (2017). Como pontos positivos da alimentação do motor com hidrogênio os autores destacam a redução significativa das emissões de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dióxido de carbono e fumaça. Contudo, há um aumento da temperatura de combustão que resulta em um crescimento considerável da formação de óxidos de nitrogênio.

O hidrogênio também apresenta uma vantagem de ser um combustível aplicável em células combustíveis, que são definidas como um dispositivo eletroquímico que é capaz de produzir energia elétrica a partir da reação química entre um combustível e um oxidante. Geralmente o hidrogênio ou um composto com a presença do hidrogênio é o combustível (Santos e Santos, 2004).

### 2.3.7. Revisões sobre combustíveis alternativos

Abedin et al. (2013) realizam um estudo de literatura avaliando o balanço energético de motores a combustão interna de ciclo Otto e ciclo Diesel utilizando

misturas de combustíveis fósseis com álcoois (metanol, etanol e n-butanol), biodiesel, hidrogênio e gás liquefeito de petróleo (GLP). Os autores concluem que o uso de percentuais maiores que 50% de álcoois reduz de forma considerável a perda de calor. Quando comparado com o diesel, os biodieseis apresentam menor eficiência térmica e maior perda de calor em função da maior presença de oxigênio em sua composição. O uso de hidrogênio em conjunto com gasolina reduz a perda para o sistema de arrefecimento do motor e hidrogênio adicionado a gás natural comprimido reduz a perda na combustão, mas aumenta a perda da combustão incompleta e de calor pela parede do cilindro. O gás liquefeito de petróleo queima mais rápido que a gasolina e quando é adicionada água junto ao GLP gera um efeito de reduzir a perda de calor quando se compara com a utilização pura do GLP.

O estudo de Carbot-Rojas et al. (2017) aborda o uso de biocombustíveis para motores com ignição por faísca. A análise aborda etanol e metanol puros e as misturas de etanol, metanol, n-butanol, hidrogênio e gasolina. De acordo com os autores, o uso de biocombustíveis, na maioria dos casos, reduz as emissões de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Ao se utilizar a mistura n-butano e etanol ocorreu redução das emissões de hidrocarbonetos não queimados, de monóxido e de dióxido de carbono, mas também resultou em redução de torque, potência e eficiência volumétrica. Quando se emprega o hidrogênio, tem-se aumento na eficiência térmica e na eficiência de combustão do motor, além do aumento de emissões de  $\text{NO}_x$  e redução  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$ .

A revisão de Yusri et al (2017) busca avaliar o uso dos quatro primeiros álcoois: metanol, etanol, propanol e butanol aplicados em motores por compressão e por faísca buscando analisar performance e emissões. Os autores indicam que diversos trabalhos concluem que o uso de álcool em motores por compressão melhora o desempenho da combustão, apesar de provocar uma pequena redução na potência e do torque. Porém, alguns pesquisadores apontam que o uso de misturas com álcool com maior número de cetanos gera maiores valores de torque. Os estudos revisados neste trabalho reportam redução das emissões de óxidos de nitrogênio, material particulado, fuligem e monóxido de carbono enquanto há aumento nas emissões de hidrocarbonetos. Quando avaliado o uso dos álcoois no motor com ignição por faísca, os autores informam que ocorre um aumento de eficiência térmica. Ocorre também redução nas emissões de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$

e hidrocarbonetos em função das propriedades de vaporização e da presença de oxigênio do metanol, etanol, propanol e butanol.

Othman et al. (2017) avaliam o biodiesel de acordo com a matéria prima utilizada para sua produção. Os autores pontuam que a definição de qual fonte de óleo utilizar para a produção do biodiesel é fundamental, pois está relacionada a dois terços do custo de produção do biodiesel. Os diferentes tipos de biodiesel podem ter diferentes propriedades dependendo do país de origem. Como resultado os autores destacam que a utilização de biodiesel promove aumento na potência e no torque em conjunto com a redução do consumo específico. Com relação às emissões, ocorre redução de monóxido de carbono e hidrocarbonetos e aumento de dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio.

### 3. METODOLOGIA

Um trabalho de revisão de literatura pode ser de grande utilidade para pesquisadores, pois são uma forma de se buscar atualizações a cerca de um tema, adicionando valor ao indivíduo. Existem diversas formas de se realizar uma revisão, sendo a mais clássica aquela em que se define uma estrutura e o propósito da revisão seguida de uma apresentação lógica da literatura. Alguns casos de revisões possuem uma questão empírica e a metodologia adotada busca encontrar respostas para a mesma. Não há um número exato de artigos a serem avaliados em uma revisão, mas a maioria dos trabalhos possui um mínimo de 30 e dificilmente superam os 100 trabalhos analisados (Wee e Banister, 2016).

O principal objetivo deste trabalho é obter a resposta para o seguinte questionamento: quais são os tipos de combustíveis renováveis que estão sendo estudados atualmente e podem ser alternativas frente ao uso de combustíveis fósseis ou que possam ser utilizados juntamente com o etanol e o biodiesel de forma a reduzir impactos ambientais, aumentando vantagens econômicas frente aos combustíveis fósseis e demandando baixos custos de adaptações nos motores de combustão interna já aplicados nos veículos automotores.

Para a pesquisa, foram definidas como termos para busca as palavras-chave *renewable*, *fuel*, *internal*, *combustion* e *engine*. A escolha destes termos se deu para que seja possível encontrar combustíveis renováveis aplicáveis a motores de combustão interna.

Desta forma, a metodologia aplicada neste trabalho se baseia na busca de trabalhos através das palavras chaves definidas acima em bases de dados bibliográficas. Para obter maior abrangência em resultados, foram selecionadas três bases internacionais: *Science Direct*, *Scopus* e *Engineering Village*. Estas bases foram selecionadas por serem importantes bases no que tange o ramo da engenharia.

Adicionalmente, foi utilizado como filtro os anos de 2019 e 2020 para que os resultados sejam de trabalhos recentes e que apresentem as pesquisas mais atuais sobre os combustíveis renováveis.

Para se obter uma amostra considerável, optou-se por selecionar os dez primeiros artigos que retornaram de cada uma das bases selecionadas.

Na base *Science Direct* dentre os tipos de trabalhos foi escolhida a opção *Research Article* para que seja maximizado o número de artigos avaliados que estejam realizando teste de combustíveis alternativos. A consulta realizada na base *Scopus* também utiliza as mesmas palavras chaves definidas e foram selecionados os trabalhos do tipo artigo para excluir os artigos de revisão. A pesquisa no *Engineering Village* se restringiu aos trabalhos do tipo artigo de periódico. O critério de classificação dos resultados adotado foi o do algoritmo de relevância de cada um dos sites, sendo selecionados os 10 primeiros artigos de cada uma destas bases.

O fluxograma da Figura 5 representa de forma simplificada a metodologia aplicada neste trabalho.

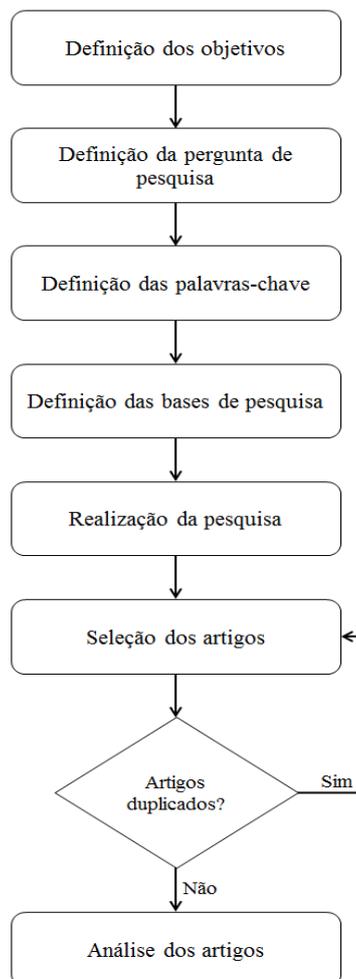


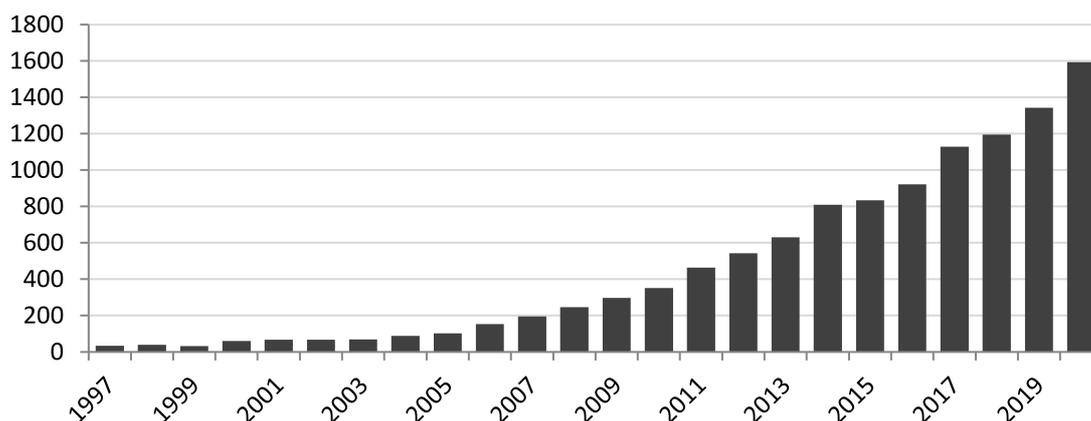
Figura 5: Fluxograma da metodologia empregada

#### 4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da metodologia adotada na seção anterior bem como um resumo com os tipos de combustíveis renováveis estudados e os principais resultados encontrados em cada um dos trabalhos que resultaram da pesquisa bibliográfica.

De forma ampla, a base *Science Direct* apresentou resultados para as palavras chave deste trabalho a partir de 1997. O Gráfico 1 apresenta o crescimento do número de trabalhos sobre combustíveis renováveis ao longo dos anos. O ano de 2020 se destaca como o maior em número de trabalhos publicados com 1594 artigos.

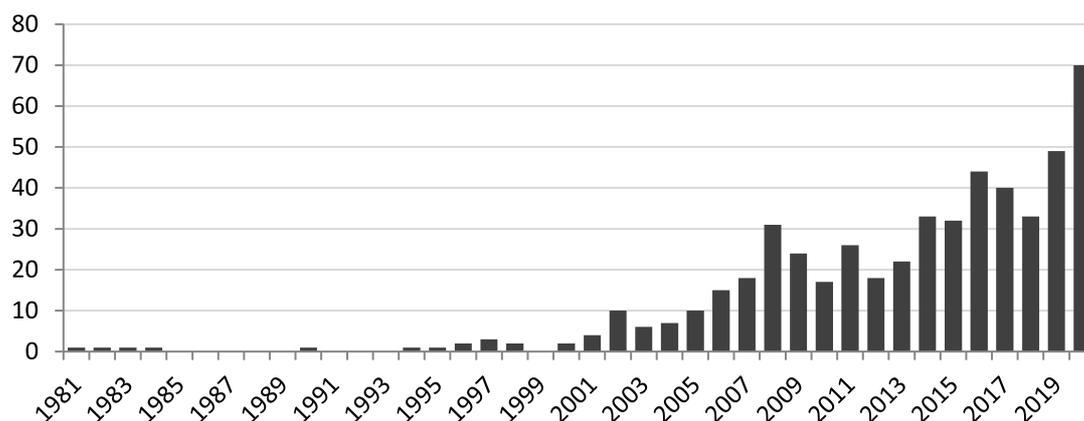
Gráfico 1: Resultado da busca das palavras chave do trabalho na base *Science Direct*



Fonte: Elaboração própria do autor com base nos dados da pesquisa na base *Science Direct*

A base *Scopus* traz resultados a partir do ano de 1981 quando se realiza uma busca de estudos relacionados a combustíveis renováveis e motores de combustão interna. Nesta base também se tem o pico de trabalhos em 2020 com um total de 70 artigos conforme Gráfico 2.

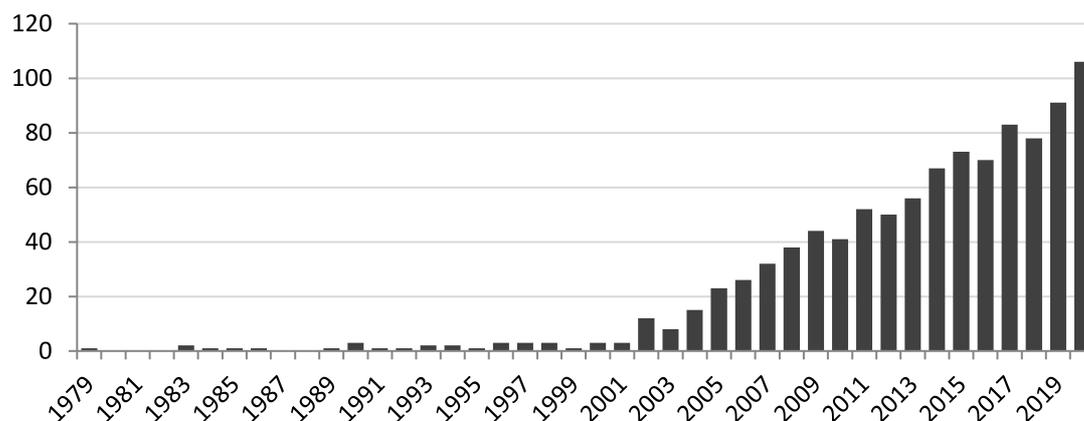
Gráfico 2: Resultado da busca das palavras chave do trabalho na base *Scopus*



Fonte: Elaboração própria do autor com base nos dados da pesquisa na base *Scopus*

A pesquisa na base *Engineering Village* traz como resultado mais antigo um artigo do ano de 1979 e, conforme apresentado no Gráfico 3, apresenta uma tendência de crescimento a partir do ano de 2002 até atingir 106 trabalhos no ano de 2020.

Gráfico 3: Resultado da busca das palavras chave do trabalho na base *Engineering Village*



Fonte: Elaboração própria do autor com base nos dados da pesquisa na base *Engineering Village*

Como definido na metodologia, um total de 30 artigos foi selecionado. Após agrupar todos os artigos selecionados, verificou-se que três trabalhos apareceram na base *Engineering Village* já haviam sido selecionados por meio da base *Scopus*. Desta forma, optou-se por selecionar os três próximos artigos da busca da *Engineering Village* para que se alcance o número de 30 artigos.

Outro ponto relativo aos resultados foi um artigo da base *Scopus* que, apesar de trazer os parâmetros na busca, não estava disponível devido a um problema relativo ao

armazenamento do site do periódico de origem. Portanto, optou-se por substituir este artigo pelo 11º da lista de resultados desta base.

#### 4.1. Artigos da base *Science Direct*

A Tabela 1 apresenta os 10 artigos que foram selecionados a partir da pesquisa na *Science Direct*, trazendo os principais pontos de cada trabalho, além do tipo de motor utilizado em cada estudo e de forma resumida os principais resultados. Cada um dos trabalhos é abordado a seguir.

Mahmoodi et al. (2020) buscaram avaliar o impacto do uso do biogás reformado através da eliminação de H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub> como combustível de baixa reatividade em um motor RCCI (*Reactivity Controlled Compression Ignition*). O uso do biogás reformado permite que haja uma maior concentração de hidrogênio na admissão e permite maior pressão dentro do cilindro. A presença de vapor de água, nitrogênio e o excesso de dióxido de carbono acarretam na redução da temperatura média do cilindro e conseqüentemente reduz a emissão de óxidos de nitrogênio, pois não há energia suficiente para que ocorra a decomposição do N<sub>2</sub>. A menor temperatura da combustão da mistura de biogás reformado e diesel e a elevada taxa H/C faz com que ocorra um alto nível de emissão de CO, transferindo mais energia para a exaustão e acarretando em perda de potência quando comparado a utilização pura do diesel.

Dhahad e Fayad (2020) realizaram um estudo prático através de um motor de injeção direta com quatro cilindros e refrigerado a água utilizando diesel, biodiesel de semente de girassol e uma mistura de biodiesel com diesel (B20). Também foram avaliados quatro aditivos antioxidantes: hidroxitolueno butilado (BHT), hidroxianisol butilado (BHA), 1,4-Fenilenodiamina (DPPD) e P-fenilenodiamina (PPD). Foi observado um aumento do consumo específico com biodiesel e B20 quando comparado ao diesel. A adição do PPD ao biodiesel puro e ao B20 gera maior redução de NO<sub>x</sub> que os outros três antioxidantes. Ao se avaliar as emissões de poluentes, o uso de aditivo em combustíveis renováveis gera efeitos positivos na redução de óxidos de nitrogênio, mas acabam aumentando as emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais.

Tabela 1: Artigos selecionados da base *Science Direct*

Artigo	Motor utilizado	Combustível estudado	Principais Resultados
MAHMOODI et al. (2020)	Simulação computacional de um motor RCCI	Biogás reformado e diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de NO<sub>x</sub></li> <li>• Redução de potência</li> </ul>
DHAHAD e FAYAD (2020)	MIE, injeção direta e quatro cilindros	Diesel, biodiesel ou biodiesel/diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de NO<sub>x</sub></li> <li>• Aumento de HC e CO</li> </ul>
da COSTA et al. (2020)	MIF e um cilindro	Biogás, etanol ou biogás/etanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de CO e HC</li> <li>• Redução de NO<sub>x</sub></li> </ul>
AWAD et al. (2020)	Artigo de revisão em MIE	Éteres de polioximetileno-dimetil (PODE <sub>n</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PODE<sub>n</sub> (n=3–5) mais apropriados para MIE</li> <li>• PODE<sub>3</sub> e a mistura PODE<sub>2-4</sub> para motores HCCI</li> <li>• PODE<sub>n</sub> pode ser um aditivo para misturas gasolina/etanol MIF</li> </ul>
DECAN et al. (2020)	Simulação computacional de MIE	Diesel/gás natural ou diesel/metanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métodos de propagação não conseguiram capturar o processo de combustão completo</li> </ul>
TEMIZER et al. (2020)	MIE, injeção direta e um cilindro	Biodiesel/diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior pressão máxima no interior do cilindro</li> <li>• Maior emissão de CO<sub>2</sub> indicando uma melhor combustão</li> </ul>
DIMITRIOU e TSUJIMURA (2019)	MIE, injeção direta e quatro cilindros	Diesel, biodiesel ou Hidrogênio/biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de CO e HC</li> <li>• Aumento de NO<sub>x</sub></li> </ul>
YU et al. (2020)	MIF, injeção direta e quatro cilindros	Acetona-butanol-etanol ou Acetona-butanol-etanol/hidrogênio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de temperatura e pressão</li> <li>• Redução de CO e HC</li> <li>• Aumento de NO<sub>x</sub></li> </ul>
ZHU et al. (2020)	Simulação de MIF, quatro tempos e quatro cilindros	Hidrogênio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor valor de hidrogênio: aumento de potência e eficiência térmica</li> <li>• Maiores valores de hidrogênio: queda no desempenho e na eficiência</li> <li>• Redução das emissões de NO<sub>x</sub></li> </ul>
VELMURUGAN et al. (2020)	MIE e um cilindro	Diesel, Biogás/Diesel ou Gás Natural/Diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustão no modo bicombustível similar à combustão do diesel</li> <li>• Eficiência do biogás foi superior ao do gás natural.</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria do autor a partir dos dados da pesquisa na base *Science Direct*

Da costa et al. (2020) estudaram um motor monocilíndrico com ignição por faísca com modificação do coletor de admissão para que seja possível trabalhar com dois combustíveis: biogás e etanol e aumento na taxa de compressão. Foram realizados testes com etanol puro, biogás puro, e duas misturas de 20% de biogás com 80% de etanol e 50% de biogás com 50% de etanol, sendo esta divisão com base na fração de energia. A eficiência da combustão das misturas se mostrou maior que a do biogás, pois houve uma redução de emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos devido à redução do metano não queimado. No modo bicomcombustível foi verificada redução de óxidos de nitrogênio frente à combustão de etanol puro em razão da composição química do biogás.

O uso dos éteres de polioximetileno-dimetil (PODE<sub>n</sub>) como combustíveis foram analisados através de uma revisão sistemática de bibliografia por Awad et al. (2020). O uso do PODE<sub>n</sub> misturado ao diesel ou gasolina em motores diesel resultaram em redução de emissão de fuligem, mas gerou um aumento aceitável do consumo do combustível. PODE<sub>n</sub> (n=3–5) se mostraram mais apropriados para substituição do diesel por suas propriedades. PODE<sub>3</sub> e a mistura PODE<sub>2-4</sub> são opções para uso em motores HCCI (*Homogenous Charge Compression Ignition*). Os autores também concluem que PODE<sub>n</sub> pode ser utilizado em misturas gasolina/etanol em motores de ignição por faísca em condições estequiométricas para otimizar eficiência, emissões e desempenho.

Através de modelagem computacional de um motor bicomcombustível Decan et al. (2020) simularam o uso de diesel em conjunto dois combustíveis renováveis, metanol e gás natural sendo vaporizados no coletor de admissão. Os modelos de propagação de chama Coherent Flame Model (CFM) e Flame Surface Wrinkling Model (FSWM) foram aplicados no trabalho. Apesar de dos dois métodos terem capturados alguns pontos da combustão, nenhum dos dois foi capaz de captura com êxito o processo completo. Desta forma, os autores concluem que este trabalho foi um ponto de partida para este tipo de estudo e que aprimoramentos precisam ser realizados em trabalhos futuros.

Temizer et al. (2020) realizaram um estudo prático e computacional da mistura de 10%, 20% e 30% de biodiesel de girassol misturado ao diesel além do diesel puro em um motor diesel de injeção direta com um cilindro. Nos resultados os autores verificaram que ocorre um aumento da pressão máxima no interior do cilindro conforme

se aumenta a fração de biodiesel e este comportamento deve-se a necessidade de maior injeção de combustível, pois o biodiesel possui uma maior densidade, ao menor número de cetano do biodiesel e a presença de oxigênio no biodiesel que melhora a combustão. Também foi verificado que ocorre maior formação de CO<sub>2</sub> na combustão com a presença do biodiesel de girassol, evidenciando que ocorre uma melhor combustão em temperaturas adequadas em função da presença do oxigênio.

Motores de combustão interna também podem ser aplicados como fonte alternativa de energia de plantas de energia renovável, como em uma usina de energia solar e eólica. Dimitriou e Tsujimura (2019) estudam a adaptação de um motor diesel para operar de forma bicombustível com hidrogênio e biodiesel em um motor de ignição por compressão. Os experimentos foram realizados com o motor operando com apenas diesel, com apenas biodiesel e com a mistura biodiesel/hidrogênio. Ao se utilizar biodiesel e comparar com o funcionamento alimentado por diesel, os autores concluem que há uma redução da eficiência térmica, acompanhada de um aumento nas emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos totais e óxidos de nitrogênio, mas resulta em uma grande redução de emissão de fuligem. Ao se realizar testes com a presença do hidrogênio sendo injetado no coletor de admissão, verificou-se considerável redução de emissões de carbono, hidrocarbonetos totais e fuligem, porém houve aumento nas emissões de NO<sub>x</sub>.

Yu et al. (2020) utilizaram um motor quatro tempos de ignição por faísca com quatro cilindros e refrigerado a água com um injetor direto na câmara de combustão para hidrogênio e outro no coletor de admissão para acetona-butanol-etanol (ABE), permitindo que a proporção entre os dois combustíveis seja alterada. Os experimentos foram realizados com o ABE puro e com as proporções de 5%, 10%, 15% e 20% de hidrogênio em três valores de lambda (1, 1,1 e 1,2). Como conclusões do trabalho os autores verificaram uma elevação da pressão máxima do cilindro e da temperatura conforme há o aumento dos valores de hidrogênio. A presença do hidrogênio também acarretou uma redução significativa no desenvolvimento da chama e na duração da combustão. O hidrogênio proporcionou uma queda nas emissões de CO e HC. Com relação às emissões de óxidos de nitrogênio, houve um aumento das emissões conforme se elevou a taxa de hidrogênio. Os autores verificaram que o uso do hidrogênio juntamente com o ABE se mostrou mais significativo em misturas pobres.

Através de uma simulação de um motor a hidrogênio de ignição por faísca a quatro tempos com quatro cilindros Zhu et al. (2020) realizam uma avaliação dos efeitos do excesso de combustível. Quando há uma pequena quantidade de excesso, ocorre um aumento da pressão máxima e eficiência térmica, ajudando também na potência e na economia. Porém, com maiores taxas de hidrogênio ocorre a redução do ar admitido e acarretando a redução da participação do H<sub>2</sub> na combustão e, por consequência, queda no desempenho e na eficiência térmica. Com relação às emissões de óxidos de nitrogênio, os autores verificam que conforme se eleva o excesso de hidrogênio, há queda nas emissões de NO<sub>x</sub>.

Velmurugan et al. (2020) utilizaram um motor de ignição por compressão com um cilindro para realizar um estudo do desempenho do uso de gás natural em combinação com o diesel e biogás com diesel, fazendo com que o motor opere como bicomcombustível. Os autores finalizam o trabalho concluindo que a combustão no modo bicomcombustível foi similar à combustão do diesel. Também foi observado que a eficiência do biogás foi superior ao do gás natural.

#### 4.2. Artigos da base *Scopus*

A Tabela 2 introduz os dez artigos que foram resultados das buscas na base *Scopus* juntamente com as informações de tipo de motor utilizado, combustíveis estudados no trabalho e principais conclusões dos artigos. Cada um dos artigos é mais bem detalhado ao longo das próximas páginas.

Apesar de não estar diretamente relacionado a uma análise de um combustível alternativo o trabalho de Sharma e Maréchal (2019) avaliam uma alternativa de redução de emissões de CO<sub>2</sub> com um sistema de captura e armazenamento deste gás. Três modelos diferentes são avaliados através análises energéticas e exergéticas, sendo o primeiro o de adsorção no veículo e dessorção no estacionamento, o segundo o de adsorção-dessorção no veículo com liquefação de CO<sub>2</sub> e o último o de adsorção-dessorção no veículo com compressão de CO<sub>2</sub>. Os autores pontuam que este dióxido de carbono capturado pode se reutilizado para produção de combustível líquido ou gasoso e concluem que o método de adsorção-dessorção no veículo com liquefação de CO<sub>2</sub> se sobressaiu frente aos outros dois estudados.

Tabela 2: Artigos selecionados da base *Scopus*

Artigo	Motor utilizado	Combustível estudado	Principais Resultados
SHARMA e MARÉCHAL (2019)	Sistema de captura e armazenamento de CO <sub>2</sub>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> capturado pode ser reutilizado para produção de combustível</li> <li>• Método de adsorção-dessorção no veículo com liquefação de CO<sub>2</sub> se mostrou melhor</li> </ul>
MIKESKA, M. et al. (2020)	Comparação das propriedades de gases gerados a partir de pellets		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pellets de madeira se mostraram mais apropriados que os de feno e palha</li> </ul>
MARKIEWICZ e MUŚLEWSKI (2019)	MIE, quatro tempos e quatro cilindros	Ésteres metílicos de ácidos graxos e diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem alterações de desempenho até 30% e configuração original</li> <li>• Aumento de torque e potência com alterações nas configurações do motor e uso de misturas</li> </ul>
SZABADOS e BERECKZY (2019)	MIE	Diesel, biodiesel ou TBK-biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo de emissões do motor com os biocombustíveis se mostrou mais elevada que com o diesel puro</li> </ul>
MALAQUIAS et al. (2020)	MIF e um cilindro	Etanol ou etanol/gasolina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O uso do E100 associado a uma maior taxa de compressão resultou em uma melhor combustão e um menor consumo específico</li> </ul>
VAN NGUYEN et al. (2019)	MIE, seis cilindros e quatro tempos	Biogás/diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptações não são significativas e de elevado investimento</li> <li>• Sistema de armazenamento do biogás se mostra crítico por requisitos de segurança</li> </ul>
GHENAI et al. (2019)	Uso de energia solar para redução da demanda de motor diesel		<ul style="list-style-type: none"> <li>• O uso de fontes renováveis se mostrou eficiente na substituição parcial do motor diesel gerando redução de emissões de poluentes</li> </ul>
ELFASAKHANY et al. (2020)	Modelo matemático do processo de combustão de pó biomassa		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcançou um modelo que reproduziu de forma satisfatória a combustão com simplicidade e economia computacional</li> </ul>
RAMEGOUDA e JOSEPH (2021)	MIF e um cilindro	Gasolina/n-butanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento de potência e eficiência térmica</li> <li>• Redução das emissões de CO e HC</li> <li>• Aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub></li> </ul>
GA e THAI (2020)	Simulação MIE, quatro tempos e um cilindro	Biogás/dimetil éter/diesel ou biogás/dimetil éter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biogás/dimetil éter/diesel: redução de CO e fuligem e aumento do trabalho e NO<sub>x</sub></li> <li>• Biogás/dimetil éter: uso do dimetil éter definida como ideal</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria do autor a partir dos dados da pesquisa na base *Scopus*

Mikeska et al. (2019) estudam a qualidade dos gases produzidos a partir de pellets de madeira, palha e feno avaliando a composição elementar, valor calorífico, umidade e teor de cinzas, que são características que podem influenciar diretamente no desempenho do motor. Os autores concluíram que os gases produzidos a partir dos pellets de madeira possuem as melhores propriedades desejadas para uso como combustível. Adicionalmente, os autores indicam que as propriedades encontradas se enquadram nas aplicações em motores de combustão interna e que para uso em turbinas a gás se faz necessária aplicação de uma tecnologia diferenciada para limpeza.

Markiewicz e Muślewski (2019) estudaram diferentes proporções de ésteres metílicos de ácidos graxos ao diesel em um motor de quatro cilindros e quatro tempos com ignição por compressão. Como conclusão os autores apontam que o percentual de 30% é o limite com base no critério de potência e torque para as configurações de fábrica. Porém, com as alterações do sistema de injeção houve um aumento do torque e potência quando utilizado misturas de ésteres metílicos de ácidos graxos e óleo diesel.

Utilizando um motor de ignição por compressão de aplicação em veículos de transporte de passageiros, Szabados e Bereczky (2019) buscaram avaliar três tipos de combustíveis: diesel, biodiesel convencional e o TBK-biodiesel, também chamado de triglicerídeos de estrutura modificada, que é um novo tipo de biodiesel. No estudo foram coletadas as emissões do motor funcionando com diferentes misturas dos biocombustíveis com o diesel e em diferentes cargas do motor, sendo em seguida utilizados dados da literatura para transformar estas emissões em custos a partir de custos específicos de emissão de óxidos de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, material particulado e metano. Os autores concluem que o custo de emissões do motor com os biocombustíveis se mostrou mais elevada que com o diesel puro, indicando que os biocombustíveis não se mostram adequados para serem parte de uma abordagem sustentável.

Malaquias et al (2020) utilizam um motor de ignição por faísca com um cilindro para experimentos com injeção de combustível no coletor de admissão, diferentes modelos de pistão e injeção direta e com diferentes taxas de compressão (11,5:1, 13,0:1 e 15,0:1) para avaliar o uso de etanol hidratado (E100) e a mistura gasolina com etanol hidratado na proporção de 22% do volume de etanol e 78% de gasolina. Como resultados dos experimentos não se observou anomalias na combustão como pré-

detonação quando utilizado o E100 com a taxa de compressão de 15:1. O uso de um pistão desenvolvido especificamente para cada tipo de injeção combinado com a taxa de compressão apropriada se mostrou efetiva para maximizar a eficiência da conversão. Os autores concluem que maiores taxas de compressão resultam em ganhos na eficiência da conversão do combustível e reduzem o consumo específico. O uso do E100 também resultou em uma melhor combustão e permitiu funcionamento com tempo de faísca ótimo.

Van Nguyen et al. (2019) buscaram elencar quais são as alterações necessárias em um motor marítimo de seis cilindros a quatro tempos para que opere de forma bicomustível com a mistura biogás/diesel. As alterações verificadas pelos autores giram em torno do desenvolvimento do sistema de injeção do biogás, regulador de velocidade e sistema de admissão de ar. Os autores concluem que as alterações não demandam grandes modificações no motor não são grande e não demandam elevados investimentos, mas o principal ponto de atenção se dá na forma de armazenamento do biogás que possui requisitos de segurança para utilização em um navio.

Ghenai et al. (2020) avaliam os efeitos do uso de painéis solares fotovoltaicos e células a combustível de membrana de troca de prótons na redução de emissões de motores diesel em pequenos e grandes navios e que são utilizados para geração de energia elétrica. A metodologia utilizada no trabalho foi de modelagem e simulação para determinação do desempenho e custo da eletricidade do sistema renovável. Como conclusão tem-se que um percentual de 13,83% pode ser obtido com as fontes renováveis e isto resultou em uma redução de 9,84% das emissões. Como o estudo foi realizado na Suécia, os autores pontuam que locais com maior irradiação solar podem acarretar em maiores reduções de emissões por maior participação da energia solar.

Elfasakhany et al. (2020) estudam através de métodos e modelos matemáticos a utilização em motores a combustão interna de pó de biomassa, pois, de acordo com os autores, queima como um gás. As partículas de pó de biomassa possuem um comprimento de 75 a 5800  $\mu\text{m}$  e diâmetro entre 30 e 1380  $\mu\text{m}$ . Os autores desenvolveram três modelos de gaseificação/desvolatilização da biomassa e em comparação com testes experimentais desempenharam de forma satisfatória, mas o modelo em que os autores definem que a partícula se quebra em um produto

intermediário e em seguida ocorre a divisão em carvão e alcatrão apresentou maior simplicidade e economia na simulação computacional.

Ramegouda e Joseph (2021) avaliam através de um motor de ignição por faísca de um cilindro a utilização da mistura n-butanol/gasolina com as proporções de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 35% comparando-as entre si e com o funcionamento do motor alimentado com gasolina pura. A partir dos experimentos realizados os autores verificaram que o uso do n-butanol pode resultar em melhorias de desempenho e emissões, sendo uma boa alternativa de aditivo para motores MIF. Com o percentual de 35% de n-butanol foram verificados aumentos de potência e eficiência térmica, somado a reduções de emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos. Contudo, foi observado um aumento das emissões de dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e oxigênio. Os autores finalizam afirmando que uma alternativa para contornar a redução de  $\text{NO}_x$  seria a utilização de um sistema de recirculação de gases.

Utilizando a simulação computacional de um motor de ignição por compressão de quatro tempos alterado para receber um injetor de combustível gasoso no coletor de admissão Ga e Thai (2020) estudaram os efeitos da aplicação da mistura biogás/dimetil éter adicionado ao ar admitido no cilindro e diesel injetado diretamente na câmara de combustão. Os autores avaliaram diferentes quantidades de dimetil éter sendo aplicadas, diferentes composições de biogás (60% de  $\text{CH}_4$  e 40% de  $\text{CO}_2$ ; 70% de  $\text{CH}_4$  e 30% de  $\text{CO}_2$ ; 80% de  $\text{CH}_4$  e 20% de  $\text{CO}_2$  - percentuais em volume), o funcionamento da mistura biogás/dimetil éter em um motor PCCI e a utilização do dimetil éter em substituição do diesel como combustível piloto. Foi verificado que com o aumento do percentual de dimetil éter há redução de CO e fuligem e aumento do trabalho e óxidos de nitrogênio. Considerando constante a condição de operação do motor e a proporção dimetil éter/biogás, as alterações de composição de biogás resultam em variações pequenas nos parâmetros avaliados. O uso da mistura biogás/dimetil éter no motor PCCI seria o ideal, mas o desafio estaria no controle do tempo de ignição e na liberação do calor. Portanto, o uso do dimetil éter como combustível piloto é definida como solução mais bem acertada para melhoria do desempenho e redução das emissões.

### 4.3. Artigos da base *Engineering Village*

Nesta seção estão os dez artigos resultados da pesquisa realizada na base *Engineering Village*, com os dados principais resumidos na Tabela 3 e com maiores detalhes nos parágrafos a seguir.

Testes realizados em um motor de ignição com faísca com um cilindro buscaram avaliar os efeitos da presença de gases inertes ( $N_2$  e  $CO_2$ ) na combustão do gás de síntese, que pode ser definido como uma mistura de gases resultante da combustão incompleta de combustíveis sólidos. Para fins de comparação foi utilizado o metano, principal gás presente no gás natural. O uso do gás de síntese em condições de mistura pobre apresentou desempenho semelhante ao do metano. Foram verificados baixos valores de eficiência atribuídos às características do motor utilizado e que justificam a presença de CO e  $CH_4$  no escape ao se utilizar o gás de síntese e o metano respectivamente. Os testes com o gás de síntese puro apresentaram melhores resultados que os realizados com o gás de síntese real em função da menor diluição do combustível.

Martins e Brito (2020) realizaram um estudo buscando diferentes tipos de combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis. No estudo os autores abordam as composições, principais características e composição dos seguintes combustíveis: hidrogênio, álcoois, éteres, ésteres (biodiesel), óleos vegetais, combustíveis sintéticos, dimetilfurano, nitrometano, acetileno, amônia, terebintina, glicerol e éster formal de glicerol de ácido graxo.

Shaghghi et al. (2020) se basearam em simulações computacionais de um motor de ignição por compressão para avaliar as emissões de misturas de diesel com biodiesel com variações de proporções de forma contínua de 0 a 100% de biodiesel empregado. Os autores verificaram que a menor taxa de emissões de hidrocarbonetos ocorreu com a utilização do biodiesel puro, contudo o aumento da taxa de biodiesel resultou também em um aumento das emissões de  $NO_x$ . A fumaça do escape do motor apresentou o menor nível de opacidade quando o motor estava operando em 20% de sua carga e com biodiesel puro. Os menores valores de HC,  $NO_x$  e taxa de opacidade da fumaça foi obtido quando se utilizou a mistura de 32,4% de diesel e 67,6% de biodiesel operando com 41,36% da carga do motor.

Tabela 3: Artigos selecionados da base *Engineering Village*

Artigo	Motor utilizado	Combustível estudado	Principais Resultados
MARTINEZ-BOGGIO et al. (2019)	MIF e um cilindro	Metano ou gás de síntese	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gás de síntese em mistura pobre apresentou desempenho semelhante ao do metano</li> </ul>
MARTINS e BRITO (2020)	Revisão sobre diferentes tipos de combustíveis renováveis		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrogênio, álcoois, éteres, ésteres (biodiesel), óleos vegetais, combustíveis sintéticos, dimetilfurano, nitrometano, acetileno, amônia, terebintina, glicerol e éster formal de glicerol de ácido graxo.</li> </ul>
SHAGHAGHI et al. (2020)	Simulações de um MIE	Biodiesel/diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de HC e aumento de NO<sub>x</sub></li> </ul>
GROENDYK e ROTHAMER (2019)	MIE	Biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodiesel apresentou maior penetração do líquido e menor comprimento de chama e retardo de ignição</li> </ul>
SAZALI et al. (2020)	Revisão sobre evoluções no projeto e fabricação de células de combustível		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de otimização baseada em modelagem computacional apresenta vantagens consideráveis</li> </ul>
CAI et al. (2020)	Análise do modelo de simulação computacional da queima do carvão pulverizado		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cada modelo apresenta prós e contras</li> <li>• Escolha com base no propósito da pesquisa a ser realizada</li> </ul>
BWAPWA et al. (2019)	Combustível de jato/combustível derivado de microalga		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ponto de ignição, viscosidade cinemática, condutividade e ponto de congelamento atenderam os padrões exigidos</li> <li>• Densidade e acidez total fora do exigido</li> </ul>
KÖNIG et al. (2020)	Avaliação do processo de desenvolvimento e produção de combustíveis renováveis		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evolução de combustíveis de uma molécula para multiespécies</li> <li>• Metodologias de otimização aplicadas no desenvolvimento e produção</li> </ul>
GAO et al. (2019)	Avaliação dos principais desafios do uso de e apresentação de modelos matemáticos de células de combustível em veículos		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade do tamanho da célula de combustível e do sistema de armazenamento de energia compacto</li> <li>• Capacidade de operar em condições de temperatura e umidade adversas</li> </ul>
RITZBERGER et al. (2020)	Desenvolvimento de modelo de simulação de células de combustível em veículos		<ul style="list-style-type: none"> <li>• O estudo alcançou a mensuração de estados internos que não são possíveis de se obter de outras maneiras</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria do autor a partir dos dados da pesquisa na base *Engineering Village*

Groendyk e Rithamer (2019) realizaram testes em um motor acessível opticamente para avaliar as características de um biodiesel produzido a partir de uma planta transgênica. O estudo foi realizado a partir de imagens para a medição e avaliação do desenvolvimento do jato, da penetração do líquido, da localização da ignição e do comprimento da chama. Foram realizados testes além do biodiesel com também diesel e com o óleo puro da mesma planta sem ser transformado em biodiesel. Apesar da viscosidade do biodiesel ser consideravelmente menor que a do óleo puro, não se verificou diferenças relevantes entre os dois em todas as quantidades estudadas. Mas ao se comparar o diesel com o biodiesel, notou-se que o segundo teve maior penetração do líquido e menor comprimento de chama e retardo de ignição.

De acordo com Sazali et al. (2020) células de combustível são uma alternativa renovável para armazenamento e conversão de energia pois funciona a partir de uma reação química acumulada diretamente em corrente contínua. Os tipos mais conhecidos são as de membrana de eletrólito polimérico, de óxido sólido e de metanol direto. No entanto, as aplicações de células de combustível ainda são restritas devido ao elevado custo para comercialização. Assim, os autores buscam elencar e analisar os recentes trabalhos de pesquisa que apresentem tecnologias de células de combustível. Os autores concluem que a utilização de otimização baseada em modelagem computacional se mostra de grande utilidade, pois resulta em redução dos custos e do tempo de desenvolvimento do projeto somados às melhorias em operação.

Apesar do crescente interesse em energias renováveis, Cai et al. (2020) analisam a combustão do carvão pulverizado através de fluidodinâmica computacional e simulação numérica direta. Os autores justificam a realização deste trabalho pelo fato de usinas de eletricidade a carvão ainda possuírem papel de grande importância no futuro da geração de energia e a abundância de carvão no mundo. Os autores concluem que cada um dos modelos de abordagem de simulação apresenta prós e contras, sendo necessário avaliar a decisão de qual método a ser utilizado com base no propósito da pesquisa a ser realizada.

Combustíveis gerados a partir de microalgas são opções consideradas viáveis do ponto de vista de produção sustentável. No entanto, os custos de produção das microalgas e dos combustíveis derivados das mesmas ainda são elevados quando comparados aos dos combustíveis convencionais. Portanto, enquanto estes pontos ainda

não são contornáveis, uma opção é a utilização da mistura deste combustível renovável com o convencional. Bwapwa et al. (2019) estudaram as características físico-químicas de uma mistura de 50% de combustível de microalga e 50% de combustível de jato convencional em momentos distintos: 30, 60, 90 e 120 dias após a produção, comparando com os valores padrões da American Society for Testing and Materials (ASTM). Como resultados do estudo os autores verificaram que a maioria dos parâmetros, como ponto de ignição, viscosidade cinemática, condutividade e ponto de congelamento, se enquadrava nos padrões exigidos pela norma. Porém, os parâmetros de densidade e acidez total não estavam dentro do estipulado pela ASTM, sendo ainda necessário, conforme apresentado pelos autores, evoluir no processo de purificação do combustível de microalgas.

König et al. (2020) realizam um estudo avaliando as evoluções no processo de desenvolvimento e produção de combustíveis renováveis. Os autores identificaram que houve uma alteração significativa na avaliação do combustível passando de produtos de uma única molécula para combustíveis multiespécies. Também se verificou que agora são aplicadas metodologias que funcionam de forma integrada realizando a otimização do desenvolvimento e da produção. Os próximos passos estão na aplicação de modelagem neste processo dos combustíveis renováveis.

Células de combustível são estudadas também por Gao et al. (2019), mas avaliando os desafios relacionados ao uso deste tipo de fonte de energia em veículos automotores. Diferentemente dos híbridos, onde há ainda um motor de combustão interna para gerar energia elétrica, nos veículos com células de combustível a energia é gerada através de reações químicas e é direcionada para o motor ou para o armazenamento. Alguns pontos são desafios para aplicações deste tipo de fonte em veículos: o tamanho da célula de combustível precisa ser limitado, sistema de armazenamento de energia compacto e capacidade de operar em condições de temperatura e umidade adversas. O trabalho busca apresentar modelos de reação eletromecânica, abastecimento de ar/hidrogênio, térmico e de umidade.

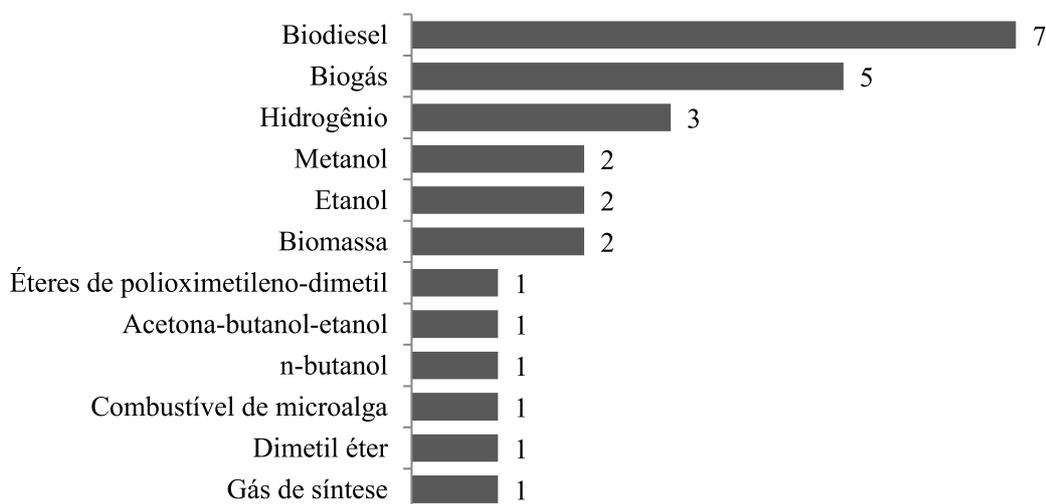
Ritzberger et al. (2020) analisam também a aplicação de células de combustível em veículos para substituição de motores de combustão interna. O trabalho apresenta uma simulação de um modelo de pilha e valida o mesmo a partir de dados coletados de um veículo experimental equipado com célula de combustível. O estudo alcançou a

mensuração de estados internos que não são possíveis de se obter de outra maneira, contribuindo para a evolução do entendimento do funcionamento das células de combustível.

## 5. DISCUSSÕES

Após a leitura e análise dos trinta artigos selecionados com base na metodologia, os combustíveis renováveis utilizados em cada um dos trabalhos foram listados e contabilizados. O resumo de quais foram os combustíveis encontrados nesta pesquisa e o número de vezes que cada um foi estudado está no Gráfico 4. Vale destacar que dentre os 30 artigos selecionados, nem todos realizaram experimentos com combustíveis efetivamente, assim como alguns estudaram mais de um combustível e por isto os números do Gráfico 4 representam o número de vezes que os combustíveis listados foram avaliados.

Gráfico 4: Combustíveis avaliados nos trabalhos analisados



Fonte: Elaboração própria do autor com base nos dados da pesquisa

O combustível mais analisado foi o biodiesel em sete trabalhos. Destes, dois verificaram o aumento de emissões de  $\text{NO}_x$  e um concluiu que houve redução deste gás. Dois estudos concluíram que houve redução de hidrocarbonetos e um observou elevação destas emissões. Com relação ao monóxido de carbono, um trabalho concluiu que o uso do biodiesel resultou em aumento enquanto outro trabalho verificou a redução desta emissão.

O segundo combustível mais estudado foi o biogás em 5 trabalhos. Dois artigos verificaram reduções de emissões de  $\text{NO}_x$  enquanto um checkou aumento desta emissão. Dois trabalhos concluíram que a aplicação do biogás como fonte de energia acarreta na

redução do nível de emissões de monóxido de carbono. A redução de hidrocarbonetos foi confirmada em um trabalho.

A utilização do hidrogênio foi tema de três estudos, sendo que dois verificaram aumento de emissões de óxido de nitrogênio acompanhando de redução de emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono. Um trabalho verificou a redução de emissão de  $\text{NO}_x$ .

Com relação à necessidade de modificações nos motores, verificou-se que alguns trabalhos em que se avaliava o funcionamento de motores com alimentação bicomustível se fez necessário adaptar um segundo injetor de combustível. Isto ocorreu principalmente nos casos dos combustíveis gasosos em que este combustível foi aplicado em conjunto com outro combustível líquido.

Alguns trabalhos reportam aumento de pressão e temperatura ao se utilizar os combustíveis renováveis. Portanto, entende-se ser importante avaliar se a total substituição ou o percentual aplicado em uma mistura não irá acarretar valores de pressão e temperatura que irão ultrapassar os valores limites de projeto dos motores.

Outro ponto de atenção com relação a alterações, mas desta vez não no motor, é com relação ao armazenamento e fornecimento de combustível. Combustíveis gasosos demandam a utilização de tanques de armazenamento que suportem a pressão interna e pode ser que isto gere a necessidade de se aplicar um novo reservatório ao motor. Assim, a utilização de combustíveis renováveis líquidos reduz as chances de adaptações relativas ao armazenamento por poder ser aplicado nos tanques já existentes.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica acerca de combustíveis renováveis buscando avaliar quais são aqueles que estão sendo estudados atualmente. Considerando a metodologia aplicada, foi verificado que o biodiesel é o combustível mais estudado nos artigos analisados seguido do biogás e do hidrogênio.

As pesquisas realizadas em três bases de bancos de dados de artigos científicos evidenciam que o uso de combustíveis renováveis ainda é um objeto de estudo de grande relevância e demonstra um aumento de esforços de pesquisa visto que o número de trabalhos apresenta tendência de crescimento ao longo dos anos. Os combustíveis de fontes renováveis são uma forma de se obter resultados satisfatórios do ponto de vista ambiental com baixo investimento de adaptações e retorno relativamente rápido no curto prazo.

O uso de combustíveis renováveis líquidos, em especial o biodiesel e os álcoois, já está consolidado no Brasil. Mesmo assim, estes ainda são objetos de estudos em diversos países. Além das reduções de emissões, o uso destes combustíveis é vantajoso quando o critério avaliado é a necessidade de alterações no motor e no sistema de armazenamento e alimentação de combustível, pois a grande maioria dos motores já utilizam combustíveis líquidos.

O uso de combustíveis gasosos tem gerado aumento de interesse confirmado pelo fato de o biogás ter sido o segundo combustível e o hidrogênio o terceiro mais analisado dentre os trinta artigos da base de avaliação deste trabalho. Contudo, a aplicação de combustíveis gasosos pode demandar a adaptação de novos tanques de armazenamentos e injetores dedicados, fazendo com que seja necessário maior investimento de ajustes que os combustíveis líquidos.

Avaliando as bases de periódicos utilizadas, a *Science Direct* apresentou melhores resultados quando o critério é o número de artigos que efetivamente estavam avaliando, seja de forma prática ou através de simulações matemáticas, combustíveis renováveis. Dentro dos resultados das bases da *Scopus* e *Engineering Village* alguns trabalhos estudavam formas de se substituir o uso de motores a combustão interna, que não fazia parte do escopo deste trabalho.

## 6.1. Conclusões

Após o estudo realizado, entende-se que são diversas as opções de combustíveis renováveis que estão sendo estudados atualmente e podem ser considerados como prováveis substitutos aos combustíveis fósseis convencionais. Adicionalmente, as pesquisas também possibilitaram conhecimento de novas tecnologias de motores que se mostraram promissoras na melhoria da eficiência dos motores a combustão interna e na redução de emissões poluentes.

Avanços nos combustíveis podem ser combinados a tecnologias que já se são utilizadas atualmente, como a sobrealimentação por meio de turbocompressores, em conjunto com novas tecnologias que estão sendo estudadas, como os motores de combustão de baixa temperatura, contribuindo para motores mais eficientes e menos poluentes. Outra possibilidade que se apresenta é a possibilidade de combinação de combustíveis renováveis em veículos híbridos, onde o motor a combustão interna pode ser o responsável por gerar energia elétrica para os motores elétricos ou trabalhar de forma combinada no fornecimento de força para as rodas do automóvel.

Dentre os combustíveis renováveis que foram verificados nas pesquisas deste trabalho, o hidrogênio apresenta uma vantagem por ser aplicável em motores de combustão interna e também ser aplicável em células de combustível para veículos totalmente elétricos.

## 6.2. Sugestões para trabalhos futuros

A partir da realização da pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho, algumas sugestões de trabalhos futuros foram vislumbradas e estão descritas nos seguintes tópicos:

- Estudo de motores a combustão interna sobrealimentados operando com hidrogênio para aplicação em veículos híbridos;
- Estudo de motores RCCI operando com etanol e biodiesel como combustíveis de baixa e alta reatividade, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

ABEDIN, M. J.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; SANJID, A.; ASHRAFUR RAHMAN, S. M.; MASUM, B. M. Energy balance of internal combustion engines using alternative fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 20-33, out/2013

AGARWAL, A. K.; SINGHA, A. P.; MAURYA, R. K. Evolution, challenges and path forward for low temperature combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.61, p. 1-56. 2017

ALMEIDA, J. P. **Biodiesel o “Óleo Filosofal”**: desafios para a educação ambiental no caldeirão do “desenvolvimento sustentável” [online]. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais, 56 p. 2010. ISBN: 978-85-7982-027-4. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>

ALVES, S. M.; MELO, C. F. M.; WISNIEWSKI, A. **Biogás; uma alternativa de energia no meio rural**. Miscelânea 4. Belém. EMBRAPA-CPATU. 1980. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/378021/1/Miscelanea4.pdf>. Acesso em: 13 de março de 2021

ANP. **Etanol**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/etanol>>. Acesso em 07 nov. 2020a

ANP. **Etanol**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/etanol>>. Acesso em 07 nov. 2020b

ANP. **Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em 07 nov. 2020c

ANP. **Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em 07 nov. 2020d

ANP. **Gasolina**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-centrais-de-materias-primas-petroquimicas-cpq/gasolina>>. Acesso em 28 nov. 2020e

ANP. **Óleo Diesel**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>>. Acesso em 07 nov. 2020f

AWAD, O. I.; MA, X.; KAMIL, M; ALI, O. M.; MA, Y.; SHUAI, S. Overview of polyoxymethylene dimethyl ether additive as an eco-friendly fuel for an internal combustion engine: Current application and environmental impacts. **Science of The Total Environment**, v. 715, mai/2020

BAE, C.; KIM, J. Alternative fuels for internal combustion engines. **Proceedings of the Combustion Institute**, 36, p. 3389-3413, 2017

BANDEIRA, R. Coisas do Brasil: estão transformando Gol, Fusca e Uno em elétricos. **Quatro Rodas**. 9 mai. 2020. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/coisas-do-brasil-estao-transformando-gol-fusca-e-uno-em-eletricos/>>. Acesso em 18 nov. 2020

BARRETO, V. V. **Análise de desempenho e emissões de um motor gerador operando com biogás**. 58 f. TCC (Graduação)- Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016132.pdf>. Acesso em 13 de março de 2021

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 436**, de 26 de dezembro de 2011. - In: Resoluções, 2011. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>> Acesso em: 17 nov. 2020

BRASIL. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP. **Resolução ANP nº 734**, de 28 de julho de 2018. - In: Resoluções, 2018. Disponível em <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2018/junho&item=ranp-734-2018>> Acesso em: 23 nov. 2020

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2012

BWAPWA, J. K.; AKASH, A.; TROIS, C. Jet fuel blend from Algal Jet Fuel and Jet A1 in 50/50 volume ratio. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 14, n. 2, p. 234-240, 2019

CAI, R.; LUO, K.; WATANABE, H.; KUROSE, R.; FAN, J. Recent advances in high-fidelity simulations of pulverized coal combustion. **Advanced Powder Technology**, v. 31, n. 7, p. 3062-3079, jul/2020

CARBOT-ROJAS, D.A.; ESCOBAR-JIMÉNEZ, R.F.; GÓMEZ-AGUILAR, J.F.; TÉLLEZ-ANGUIANO, A.C. A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1070-1085, jun/2017

CHOUDHARY, T. V.; PHILLIPS, C. B. Renewable fuels via catalytic hydrodeoxygenation. **Applied Catalysis A: General**, v. 397, p. 1-12. 2011

DA COSTA, R. B. R.; VALLE, R. M.; HERNÁNDEZ, J. J.; MALAQUIAS, A. C. T.; CORONADO, C. J. R.; PUJATTI, F. J. P. Experimental investigation on the potential of biogas/ethanol dual-fuel spark-ignition engine for power generation:

Combustion, performance and pollutant emission analysis. **Applied Energy**, v. 261, mar/2020

DE CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)- Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. 2011

DECANA, G.; LUCCHINI, T.; D'ERRICO, G.; VERHELST, S. A novel technique for detailed and time-efficient combustion modeling of fumigated dual-fuel internal combustion engines. **Applied Thermal Engineering**, v. 174, jun/2020

DELGADO, F.; COSTA, J. E. G.; FEBRARO, J.; DA SILVA, T. B. Carros elétricos. **Cadernos FGV Energia**, n. 7, mai. 2017

DHAHAD, H. A.; FAYAD, M. A. Role of different antioxidants additions to renewable fuels on NOX emissions reduction and smoke number in direct injection diesel engine. **Fuel**, v. 279, nov/2020

DIMITRIOU, P.; TSUJIMURA, T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. v. 42, p. 24470-24486. 2017

DIMITRIOU, P.; TSUJIMURA, T. A fully renewable and efficient backup power system with a hydrogen-biodiesel-fueled IC engine. **Energy Procedia**, v. 157, jan/2019

EICHMEIER, J. U.; REITZ, R.; RUTLAND, C. Zero-Dimensional Phenomenological Model for RCCI Combustion Using Reaction Kinetics. **SAE International Journal of Engines**, v. 7, n. 1, p. 106-119. mai/2014

ELFASAKHANY, A.; ALSEHLI, M.; SALEH, B.; ALY, A. A.; BASSUONI, M. Renewable pulverized biomass fuel for internal combustion engines. **Processes**, v. 8, 2020

GA, B.V.; THAI, P.Q. Soot emission reduction in a biogas-dme hybrid dual-fuel engine. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, 2020

GAO, J.; LI, M.; HU, Y.; CHEN, H.; MA, Y. Challenges and developments of automotive fuel cell hybrid power system and control. **Science China Information Sciences**, v. 62, n. 5, mai/2019

GHENAI, C.; BETTAYEB, M.; BRDJANIN, B.; HAMID, A. K. Hybrid solar PV/PEM fuel Cell/Diesel Generator power system for cruise ship: A case study in Stockholm, Sweden. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 14, 2019

GROENDYK, M.; ROTHAMER, D.A. Optical investigation of mixing-controlled combustion using a novel transgenic plant oil. **Fuel**, v. 252, p. 675-698, 2019

HEYWOOD, J.B. Automotive engines and fuels: a review of future options. **Progress in Energy and Combustion Science**, 7, p. 155-184, 1981

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill, 1988

KALGHATGI, G. T.; GURUBARAN, R. K.; DAVENPORT, A.; HARRISON, A. J.; HARDALUPAS, Y.; TAYLOR, A. M. K. P. Some advantages and challenges of running a Euro IV, V6 diesel engine on a gasoline fuel. **Fuel**, v. 108, p. 197-207, 2013

KALGHATGI, G. Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? **Applied Energy**, v. 225, p. 965-974, 2018

KARAVALAKIS, G.; STOURNAS, S.; BAKEAS, E. Effects of diesel/biodiesel blends on regulated and unregulated pollutants from a passenger vehicle operated over the European and the Athens driving cycles. **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 1745-1752, 2009

KARWADE, A.; THOMBRE, S.; BHIOGADE, G. Investigations on premixed charge compression ignition type combustion using butanol-diesel blends. **Journal of Thermal Science and Technology**, v. 15, n. 3. 2020

KNOTHE, G. Biodiesel and renewable diesel: A comparison. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, p. 364-373, 2010

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010

KOKJOHN, S. L.; HANSON, R. M.; SPLITTER, D. A.; REITZ, R. D. Experiments and Modeling of Dual-Fuel HCCI and PCCI Combustion Using In-Cylinder Fuel Blending. **SAE International Journal of Engines**, v. 2, n. 2, p. 24-39. 2010

KÖNIG, A.; MARQUARDT, W.; MITSOS, A.; VIELL, J.; DAHMEN, M. Integrated design of renewable fuels and their production processes: recent advances and challenges. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 27, p. 45-50, mar/2020

KOÇ, M.; SEKMEN, Y.; TOPGÜL, T.; YÜCESU, H. S. The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. **Renewable Energy**, 34, p. 2101-2106, 2009

KUKKONEN, C. A. Hydrogen as an alternative automotive fuel. **SAE Transactions**, v. 90, p. 1425-1461. 1981. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/44632713>>. Acesso em 16 de março de 2021

LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos estudos CEBRAP**, n. 78, São Paulo. jul/2007

LI, J.; YANG, W.; ZHOU, D. Review on the management of RCCI engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 65-79. 2017

MAHMOODI, R. et al. Effect of reformed biogas as a low reactivity fuel on performance and emissions of a RCCI engine with reformed biogas/diesel dual-fuel combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, out/2020

MALAQUIAS, A. C. T. et al. The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the Brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 567, 2019

MALAQUIAS, A. C. T.; NETTO, N. A. D.; RODRIGUES FILHO, F. A.; DA COSTA, R. B. R.; LANGEANI, M.; BAËTA, J. G. C. An evaluation of combustion aspects with different compression ratios, fuel types and injection systems in a single-cylinder research engine. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, n. 10, 2020

MARKIEWICZ, M.; MUŚLEWSKI, Ł. The impact of powering an engine with fuels from renewable energy sources including its software modification on a drive unit performance parameters. **Sustainability (Switzerland)**, v.11, n. 23, nov/2019

MARTINEZ-BOGGIO, S. D.; MEROLA, S. S.; LACAVA, P. T.; IRIMESCU, A.; CURTO-RISSO, P. L. Effect of fuel and air dilution on syngas combustion in an optical SI engine. **Energies**, v. 12, n. 8, 2019

MARTINS, J.; BRITO, F. P. Alternative fuels for internal combustion engines. **Energies**, v.13, ago/2020

MASUM; B. M.; MASJUKI, H.H.; KALAM, M.A.; FATTAH, I. M. R.; PALASH, S. M.; ABEDIN, M. J. Effect of ethanol-gasoline blend on NOx emission in SI engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 209-222, 2013

MATTEI, L. F. Programa Nacional para Produção e Uso do Biodiesel no Brasil (PNPB): Trajetória, Situação Atual e Desafios. **Documentos Técnico-Científicos**, v. 41, n. 4, p. 731-740, out/dez 2010

MAZIERO, J. V. G.; CORRÊA, I. L.; TRIELLI, M. A.; BERNARDI, J. A.; D'AGOSTIN, M. F. Avaliação de emissões poluentes de um motor diesel utilizando biodiesel de girassol como combustível. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 14, n. 4, p. 287-292, out./dez. 2006

MEHER, L. C.; SAGAR, D. V.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, p. 248–268. 2006

MIKESKA, M.; NAJSER, J.; PEER, V.; FRANTÍK, J.; KIELA, J. Quality assessment of gas produced from different types of biomass pellets in gasification process. **Energy Exploration and Exploitation**, v. 38, n. 2, p. 406-416, 2020

MORETTI, R. R. **Mistura Diesel, Biodiesel e Etanol Anidro: uma Possibilidade para Reduzir o Custo da Cadeia de Produção da Cana-de-Açúcar**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 2013

MURUGESAN, A.; UMARANI, C.; SUBRAMANIAN, R.; NEDUNCHEZHIAN, N. Bio-diesel as an alternative fuel for diesel engines-A review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 653-662, 2009

OLIVEIRA, A. Reassessing the Brazilian alcohol programme. **Energy Policy**, v. 19, n. 1, p. 47-55, jan/fev 1991

OTERA, J. Transesterification. **Chemical Reviews**. v. 93, n. 4, p. 1449-1470. 1993

OTHMAN, M. F.; ADAM; A.; NAJAFI, G.; MAMATA, R. Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 694-709, dez/2017

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. Pearson, 1997

RAMEGOUDA, R.; JOSEPH, A. A. Effect of compression ratio on performance and emission characteristics of dual spark plug ignition engine fueled with n-butanol as additive fuel. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 10, n.1, p. 37-45, 2021

REITZ, R. D.; DURAISAMY, G. Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines, **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 46, p. 12-71. 2015

RIBEIRO, C. B.; SCHIRMER, W. N. Panorama dos combustíveis e biocombustíveis no Brasil e as emissões gasosas decorrentes do uso da gasolina/etanol. **Biofix**, v. 2, n.2, 2017

RITZBERGER, D.; HAMETNER, C.; JAKUBEK, S. A Real-Time Dynamic Fuel Cell System Simulation for Model-Based Diagnostics and Control: Validation on Real Driving Data. **Energies**, v. 13, n. 12, jun/2020

SANTOS, F. A. C. M.; SANTOS, F. M. S. M. Células de combustível. **Revista Millenium**. v. 29. 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.19/589>>. Acesso em 16 de março de 2021

SANTOS, R. F. E. **Análise experimental do desempenho e da combustão de um motor de ignição por compressão alimentado por uma mistura ternária de combustíveis - diesel, biodiesel e etanol.** 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2005

SAZALI, N.; SALLEH, W. N. W.; JAMALUDIN, A. S.; RAZALI, M. N. M. New perspectives on fuel cell technology: A brief review. **Membranes**, v. 10, n. 5, mai/2020

SHAGHAGHI, S.; GHAHDERIJANI, M.; DEHROUYEH, M. H. Optimization of indicators pollutant emission following blending diesel fuel with waste oil-derived biodiesel. **Journal of Oleo Science**, v. 69, p. 337-346, 2020

SHARMA, S.; MARÉCHAL, F. Carbon Dioxide Capture From Internal Combustion Engine Exhaust Using Temperature Swing Adsorption. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, dez/2019

SZABADOS, G.; BERECZKY, Á. Economic evaluation of renewable fuels through pollutants derived from internal combustion engine. **Periodica Polytechnica Mechanical Engineering**, v. 63, n. 1, p. 33-38, 2019

TEMIZER, İ; CIHAN, Ö.; ESKICI, B. Numerical and experimental investigation of the effect of biodiesel/diesel fuel on combustion characteristics in CI engine. **Fuel**, v. 270, jun/2020

VAN NGUYEN, H; CAO, D. T.; DO, T. H. Research and calculation of the biogas fuel supply system for a small marine diesel engine. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v. 42, n.1, p. 64-70, 2019

VELMURUGAN, K.; ARUNPRASAD, J.; THIRUGNANASAMBANTHAM, R. Agricultural tractor engine combustion in dual-fuel mode: Optimization of pilot fuel injection. **Materials Today: Proceedings**, jun/2020

WEE, B. V.; BANISTER, D. How to Write a Literature Review Paper?, **Transport Reviews**, v. 36, n. 2, p. 278-288, 2016 DOI: 10.1080/01441647.2015.1065456

YAO, M.; ZHENG, Z.; LIU, H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 35, p. 398-437. 2009

YU, X.; LI, D.; YANG, S.; SUN, P.; GUO, Z.; YANG, H.; LI, Y.; WANG, T. Effects of hydrogen direct injection on combustion and emission characteristics of a hydrogen/Acetone-Butanol-Ethanol dual-fuel spark ignition engine under lean-burn conditions. **International Journal of Hydrogen Energy**, out/2020

YUSRI, I. M.; MAMAT, R.; NAJAFI, G.; RAZMAN, A.; AWAD, O. I.; AZMI, W. H.; ISHAK, W. F. W.; SHAIFUL, A. I. M. Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: A review on engine performance and exhaust emissions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 169-181, set/2017

ZHEN, X.; WANG, Y. An overview of methanol as an internal combustion engine fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 52, p. 477-493, 2015

ZHU, H.; ZHANG, Y.; LIU, F.; WEI, W. Effect of excess hydrogen on hydrogen fueled internal combustion engine under full load. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 39, p. 20419-20425, ago/2020