

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA**

**FONSECA – CEFET/RJ**

**DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR**

**BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**THACIO MAGALHÃES FRANÇA**

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DE MOTORES  
DE IGNIÇÃO A COMPRESSÃO OPERANDO EM MODO DUAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RIO DE JANEIRO**

**2021**

**THACIO MAGALHÃES FRANÇA**

**SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DE MOTORES DE  
IGNIÇÃO A COMPRESSÃO OPERANDO EM MODO DUAL**

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Ronney Arismel  
Mancebo Boloy

Coorientador: Prof. Gisele Maria  
Ribeiro Vieira

**RIO DE JANEIRO**

**2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F815 França, Thacio Magalhães  
Simulação fluidodinâmica computacional de motores de ignição a  
compressão operando em modo dual / Thacio Magalhães França. —  
2021.  
46f. + anexo : il.(algumas color). ; enc.  
  
Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2021.  
Bibliografia : f. 44-46  
Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy  
Coorientadora: Gisele Maria Ribeiro Vieira  
  
1. Engenharia mecânica. 2. Biocombustíveis. 3. Poluentes. 4.  
ANSYS (Programa de computador). 6. Motores de combustão  
interna. I. Boloy, Ronney Arismel Mancebo. (Orient.). II. Vieira,  
Gisele Maria Ribeiro (Coorient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

## AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de manifestar a profunda gratidão que tenho por todos que estão e passaram pela minha vida durante a minha caminhada no curso de Engenharia Mecânica do CEFET/RJ. Em especial, cito os principais responsáveis por ter conseguido chegar até aqui:

- Aos meus pais, Hildéa e Edson por todo o esforço feito para me dar a educação e os meios para alcançar esse momento e todo apoio para não me fazer desistir;
- Aos meus irmãos Thadeu e Thiago, por terem acompanhado a jornada e auxiliado em diversas situações e dificuldades;
- Aos meus irmãos Álvaro, Victor e João Lucas, por sempre terem acreditado que poderia alcançar meus objetivos e torcerem por mim;
- A minha namorada Sharleny, pelo tremendo carinho, apoio e amor que me deram forças para chegar aonde cheguei.

Fica também o agradecimento aos meus professores orientadores pela confiança e ajuda.

## RESUMO

FRANÇA, Thacio Magalhães. **Simulação Fluidodinâmica Computacional de Motores de Ignição a Compressão Operando em Modo Dual.** 2021. Número total de folhas: 65. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

O uso de combustíveis fósseis tem aumentado gradualmente todo ano no planeta. Seu consumo, apesar de conveniente e barato, traz problemas no quesito ambiental. Embora existam soluções tecnológicas aplicadas aos motores de combustão interna (MCI), procurando a redução das emissões de gases poluentes no meio ambiente, a implementação de tecnologias *dual fuel* nos MCI é muito limitada. Este trabalho de conclusão de curso, apresenta um estudo dos parâmetros de desempenho e combustão dos motores de ignição a compressão alimentados com biocombustíveis operando em modo *dual fuel* e as justificativas para a substituição do diesel mineral serão discutidas. Com o método *PRISMA* de revisão sistemática, pôde-se perceber que o estudo do tema abordado ainda tem espaço para desenvolver, em especial no Brasil que possui regulamentação e produção referentes aos biocombustíveis. Muitos dos estudos em referência ao motor *dual fuel* não agregam mais de um biocombustível ou então existe dificuldade de simular tais combustíveis dado a complexidade dos materiais envolvidos, ocorrendo a necessidade de modelamentos matemáticos mais acurados e que demonstrem não só o comportamento termodinâmico deles, mas também os possíveis benefícios na questão das emissões de poluentes. Com isso, o MCI operando em modo *dual fuel* foi simulado considerando os parâmetros padrões utilizados no tutorial de motor *dual* do módulo FORTE do software Ansys. Os resultados demonstram que um motor *dual* movido a biocombustíveis tende a ser levemente menos potente que um motor dual movido a combustíveis fósseis. Porém, ao observar-se os níveis de emissões dos biocombustíveis simulados, pode-se justificar uma possível mudança de fonte de energia utilizada, apesar de um aumento considerável de NOx que deve ser avaliado com mais cuidado. Sugere-se que para uma maior disseminação da tecnologia *dual fuel* nos MCI, estudos mais aprofundados utilizando software de elementos finitos como o Ansys sejam desenvolvidos e aplicação experimental para consolidar e validar os resultados obtidos por esse estudo.

Palavras-chave: Biocombustíveis, emissões veiculares, simulações computacionais fluidodinâmicas, ANSYS, motores de combustão interna, *dual fuel*, revisão sistemática

## ABSTRACT

FRANÇA, Thacio Magalhães. **Computational Fluid Dynamic Simulation of Compression Ignition Engines Operating in Dual Mode**. 2021. Total pages: 65. Final Project – Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2021.

The use of fossil fuels has gradually increased every year on the planet. Its consumption, despite being convenient and cheap, causes problems in terms of the environment. Although there are technological solutions applied to internal combustion engines (ICM), seeking to reduce emissions of polluting gases into the environment, the implementation of dual fuel technologies in ICM is very limited. This course conclusion work presents a study of the performance and combustion parameters of compression ignition engines fed with biofuels operating in dual fuel mode and the justifications for the replacement of mineral diesel will be discussed. With the PRISMA method of systematic review, it could be seen that the study of the topic addressed still has room to develop, especially in Brazil, which has regulations and production related to biofuels. Many of the studies referring to the dual fuel engine do not add more than one biofuel or else there is difficulty in simulating such fuels given the complexity of the materials involved, resulting in the need for more accurate mathematical models that demonstrate not only the thermodynamic behavior of them, but also the possible benefits in terms of pollutant emissions. Thus, the MCI operating in dual fuel mode was simulated considering the standard parameters used in the dual engine tutorial of the FORTE module of the Ansys software. The results demonstrate that a dual engine running on biofuels tends to be slightly less powerful than a dual engine running on fossil fuels. However, when observing the simulated biofuel emission levels, a possible change in the energy source used can be justified, despite a considerable increase in NO<sub>x</sub> that must be evaluated more carefully. It is suggested that for a greater dissemination of dual fuel technology in MCI, further studies using finite element software such as Ansys be developed and experimental application to consolidate and validate the results obtained by this study.

Keywords: Biofuels, vehicle emissions, fluid dynamics computer simulations, Ansys, internal combustion engines, dual fuel, systematic review

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Componentes de motor de combustão interna. Fonte: FOGAÇA, 2021	11
Figura 2: Definições de medidas e características do motor. ÇENGEL, 2013	12
Figura 3: Etapas dos ciclos real e ideal dos motores de ignição por centelha e seus diagramas P-V. ÇENGEL, 2013	13
Figura 4: Funcionamento de motor Diesel em 4 tempos. Fonte: DEBEIR, 1993	14
Figura 5: Diagrama P-V do ciclo Diesel ideal. ÇENGEL, 2013	14
Figura 6: Etapas de funcionamento de um motor dual com biocombustíveis. Fonte: SOUZA, 2013	15
Figura 7: Gráfico P-V do ciclo Dual ideal. ÇENGEL, 2013	15
Figura 8: Fluxo “Squish” (esquerda) e “Swirl” (direita) dentro da câmara de combustão. Fonte: KAPLAN, 2019	17
Figura 9: Exemplo de modelo de setor de cilindro em simulação no software ANSYS. Fonte: Elaborado pelo autor.	23
Figura 10: Frações das espécies utilizadas na admissão. Fonte: Elaborado pelo autor	25
Figura 11: Fluxograma PRISMA de revisão sistemática. Fonte: Elaborado pelo autor	28
Figura 12: Gráfico Publicações de Artigos x Ano. Fonte: Web of Science	33
Figura 13: Gráfico Publicações x País. Fonte: Web of Science	34
Figura 14: Gráfico Publicações x Área de Interesse. Fonte: Web of Science	34
Figura 15: Pressão interna do cilindro gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor	35
Figura 16: Pressão interna do cilindro biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor	36
Figura 17: Calor produzido dentro do cilindro gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor	36
Figura 18: Calor produzido dentro do cilindro biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor	37
Figura 19: Temperatura máxima alcançada no cilindro gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor	38
Figura 20: Temperatura máxima alcançada no cilindro biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor	38
Figura 21: NOx produzido pela combustão gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor	39
Figura 22: NOx produzido pela combustão biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor	40
Figura 23: CO produzido pela combustão gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor	41
Figura 24: CO produzido pela combustão biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor	41
Figura 25: Hidrocarbonetos não queimados na combustão gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor	42
Figura 26 - Hidrocarbonetos não queimados na combustão biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Efeitos de vários fatores no atraso da ignição. GUPTA, 2009 Adaptado	18
Tabela 2: Limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de ciclo Diesel e os movidos a GNV. Fonte: PROCONVE, adaptado	22
Tabela 3 - Composição média de um biogás. Fonte: Tippayawon et al 2007	24
Tabela 4 - Parâmetros do motor. Fonte: Puduppakkam et al 2011	25
Tabela 5 - Condições iniciais. Fonte: Puduppakkam et al 2011	26
Tabela 6 – Principais características dos artigos selecionados. Fonte: Web of Science	29



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas e siglas:

°C	Graus Celsius
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<i>CFD</i>	<i>Computational fluid dynamics</i>
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos
<i>IRENA</i>	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MCE	Motor de combustão externa
MCI	Motor de combustão interna
MCIIC	Motor de Combustão Interna de Ignição a Compressão
MP	Material particulado
NO <sub>x</sub>	Oxido de Nitrogênio
P	Pressão
PME	Potencia media eficaz
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
<i>PRISMA</i>	<i>Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
Q <sub>e</sub>	Calor total fornecido
r <sub>c</sub>	Taxa de compressão
SO <sub>x</sub>	Oxido de enxofre
V	Volume
V <sub>m</sub>	Volume morto
V <sub>T</sub>	Volume total
W <sub>líquido</sub>	Trabalho líquido do motor
η	Eficiência térmica

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1.	JUSTIFICATIVA.....	8
1.2.	OBJETIVOS.....	8
1.2.1.	OBJETIVO GERAL.....	8
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.3.	MOTIVAÇÃO.....	9
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	10
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	10
2.1.	MÁQUINAS TERMICAS.....	10
2.2.	MOTORES DE COMBUSTAO INTERNA.....	11
2.2.1.	CICLO OTTO.....	13
2.2.2.	CICLO DIESEL.....	14
2.2.3.	CICLO DUAL.....	15
2.3.	COMBUSTÃO.....	16
2.3.1.	INFLUENCIADORES NO PROCESSO DE COMBUSTÃO.....	16
2.3.1.1.	MISTURA DE COMBUSTÍVEL.....	16
2.3.1.2.	ATRASO DE IGNIÇÃO.....	17
2.3.1.3.	<i>KNOCK</i> .....	18
2.4.	COMBUSTIVEIS.....	19
2.4.1.	DIESEL.....	19
2.4.2.	GÁS NATURAL.....	19
2.4.3.	BIODIESEL.....	20
2.4.4.	BIOGÁS/BIOMETANO.....	20
2.5.	EMISSÕES VEÍCULARES.....	21
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	22
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	27
4.1.	RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA.....	27

<b>4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES</b> .....	34
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	43
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	44
<b>ANEXO I</b> .....	47
<b>ANEXO II</b> .....	52
<b>ANEXO III</b> .....	56
<b>ANEXO IV</b> .....	60

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

Os estudos sobre os parâmetros de desempenho (eficiência térmica, temperatura dos gases de exaustão, consumo específico de energia), combustão (pressão no cilindro, taxa de liberação de calor, atraso da ignição) e emissões (CO, CO<sub>2</sub>, HC, MP, NO<sub>x</sub>) dos motores de ignição a compressão alimentados com biocombustíveis tem sido um problema em aberto nas últimas décadas, quando diversos autores tem direcionado suas pesquisas para o estudo dos parâmetros mencionados, buscando substituir o diesel mineral pelos biocombustíveis, a saber: biodiesel, biogás/biometano, hidrogênio.

A proposta deste projeto de final de curso é utilizar uma ferramenta computacional (ANSYS) na qual, através do modulo de fluidodinâmica computacional, espera-se simular o processo de combustão de biocombustíveis alimentando um motor de ignição a compressão operando em modo *dual fuel* de forma a entender a influência destes combustíveis nos parâmetros anteriormente mencionados. Com os resultados alcançados, decisões podem ser tomadas pelos agentes públicos, promovendo a disseminação da tecnologia *dual fuel* em motores de combustão interna de ignição a compressão, buscando alcançar maior sustentabilidade no setor de transporte em todos seus modais.

### **1.2. OBJETIVOS**

#### **1.2.1. OBJETIVO GERAL**

Neste projeto de pesquisa, um estudo detalhado dos parâmetros de desempenho e combustão dos motores de ignição a compressão alimentados com biocombustíveis operando em modo *dual fuel* serão investigados e as justificativas para a substituição do diesel mineral serão discutidas.

### 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Neste projeto, temos como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão sistemática da literatura pelo método *PRISMA*, identificando possíveis lacunas e/ou oportunidades científicas referentes ao uso de biocombustíveis em motores em modo *dual* e seus possíveis benefícios contra combustíveis fósseis;
- Realizar uma simulação computacional através do módulo FORTE do software ANSYS da queima de combustíveis num motor em modo *dual* a fim de realizar uma análise comparativa dos resultados

### 1.3. MOTIVAÇÃO

O aquecimento global e a redução da camada de ozônio têm sido discutidos cada vez mais no dia a dia e percebe-se uma crescente na necessidade de encontrar meios de proteger o ambiente, o que pode ser observado nas medidas a serem adotadas para manter o aumento médio da temperatura global inferior 1,5°C até 2050, pela mudança energética baseando-se em fontes e tecnologias renováveis, onde teremos o aumento da eficiência e a conservação do ambiente, buscando zero emissões líquidas de dióxido de carbono, através da participação ativa tanto de governos como da iniciativa privada. Tem-se através do caminho para os 1,5°C da *IRENA*, que cita a necessidade de limitar investimentos no óleo e gás, reduzir gradualmente subsídios para carvão e combustíveis fósseis, adaptar estruturas de mercado para a nova era energética, entre outros. Com o avanço tecnológico, tem-se aumento no consumo de energia e hoje a principal matriz energética mundial vem de produtos fósseis, principal causa dos problemas mencionados. No caso do Brasil, percebe-se uma matriz energética e elétrica renovável, 48,4% e 84,8% respectivamente, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2021 realizado pelo EPE como não sendo ainda suficiente. Com isso, vê-se necessidade de encontrar novos métodos de consumo energético com utilização de fontes de energia renováveis e que não impactem o meio ambiente. Por isso, esse estudo se voltará à utilização de biocombustíveis como fonte de energia, visando seu uso final em motores de combustão interna de ignição a compressão operando em modo *dual fuel*, visando a possível redução de emissão de poluentes.

## **1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

Primeiramente, será realizada uma revisão sistemática da literatura com base no método *PRISMA* sobre os motores de ignição a compressão operando em modo dual e alimentados com biocombustíveis, procurando estudar os avanços científicos em torno dos parâmetros mencionados. Em uma etapa posterior, uma simulação computacional do processo de combustão das misturas biogás/biodiesel utilizando *CFD* será conduzida considerando altas temperaturas e pressões em ambiente controlado. Os resultados obtidos serão validados com a literatura para futuramente serem testadas experimentalmente no MCIIC. A simulação computacional das misturas biogás/biodiesel pulverizadas serão realizadas considerando um cilindro assimétrico. Após isso, realiza-se o processo de malha da geometria, procurando-se avaliar o número de elementos mais adequado, de forma que sejam garantidos bons resultados da simulação. O processo químico de combustão será definido a partir de equações empíricas usando o software Chemkin, utilizando-se várias espécies e reações. O modelo empírico instável Flamelet pode ser uma excelente abordagem numérica para estudar com precisão as chamas produzidas no processo de combustão das misturas, considerando uma ampla gama de condições de operação (Pickett et al, 2010).

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. MÁQUINAS TERMICAS**

A conversão de calor em trabalho é uma das manifestações físicas onde tem-se transformação de uma forma de energia em outra. Para capturar esse trabalho, utilizou-se máquinas térmicas, responsáveis por receber o calor de uma fonte, converter uma parte no trabalho mecânico e rejeitar a outra para outra fonte a uma temperatura menor. Pode-se dividi-las em duas categorias: motores de combustão interna e motores de combustão externa.

Nos MCI, a admissão e queima do fluido de trabalho, que é a mistura de combustível e comburente, em geral ar, é feita dentro do motor. Já nos MCE, o fluido não passa pela combustão. O combustível é utilizado para aquecer o fluido motor, que ao ser vaporizado leva a propulsão do aparelho que transformará a energia térmica em mecânica.

Esses dois motores ainda podem ser divididos em 2 categorias: volumétricos e dinâmicos, onde a primeira é caracterizada pelo fluido de trabalho evoluindo de forma pulsante em uma cavidade de volumes variáveis e a segunda tem o seu fluxo contínuo. Além disso, também

temos subdivisões chamadas alternativas, com movimentos cíclicos gerados por um conjunto biela-manivela impulsionando o fluido motor, e as rotativas, onde o fluido motor é deslocado em um volume variável entre um conjunto rotor-carcaça.

Este trabalho focará em motor de combustão interna, focado no ciclo Dual.

## 2.2. MOTORES DE COMBUSTAO INTERNA



Figura 1: Componentes de motor de combustão interna. Fonte: FOGAÇA, 2021

O princípio de funcionamento de um motor de combustão interna se passa da seguinte maneira: após o acionamento da partida e inicial movimentação do conjunto virabrequim e biela por um motor elétrico, a válvula de admissão será acionada, permitindo a entrada de ar ou mistura de ar com combustível no cilindro, dependendo do ciclo de combustão representado, Otto ou Diesel. A mistura de ar com combustível será inflamada por uma fagulha produzida pela vela de ignição, no caso de ciclo Otto, ou pela injeção de combustível no ciclo Diesel. Com a queima da mistura, o pistão será impulsionado para baixo no cilindro, movimentando biela e virabrequim, acabando com a necessidade do motor elétrico de partida. Com isso, os gases produzidos pela queima são expulsos do cilindro através do acionamento e abertura da válvula de escape com o subsequente movimento de subida do pistão, finalizando um ciclo e imediatamente iniciando um novo.

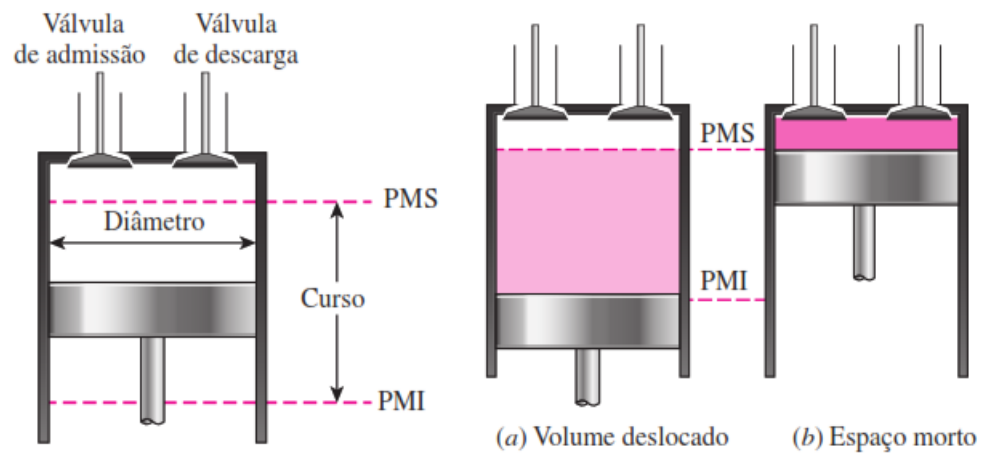


Figura 2: Definições de medidas e características do motor. Fonte: ÇENGEL, 2013

Algumas medidas e características do motor são importantes para entender o funcionamento dos ciclos a serem discutidos a frente. Baseado na Figura 2, tem-se o curso do pistão ( $c$ ), definido pela distância entre o ponto máximo de afastamento da cabeça do pistão do virabrequim, chamado de Ponto Morto Superior (PMS), e o ponto mínimo de afastamento da cabeça do pistão do mesmo virabrequim, chamado de Ponto Morto Inferior (PMI). Tem-se também a cilindrada unitária, que nada mais é que o volume deslocado pelo pistão.

Quando presente no PMS, o pistão está comprimindo a mistura de ar/combustível na região correspondente ao espaço ou volume morto, onde ocorrerá o início da combustão. A soma do volume deslocado com o volume morto equivale então ao volume total do cilindro. Com essas medidas, pode-se calcular medidas que impactam no estudo dos motores a serem discutidas, Çengel, 2013. Entre elas, temos:

- Taxa de compressão ( $r_c$ ): Razão entre o volume total e volume morto;

$$r_c = V_T / V_m \quad (2.1)$$

- Eficiência térmica ( $\eta$ ): Razão entre o trabalho líquido do motor e o calor total fornecido;

$$\eta = W_{\text{líquido}} / Q_e \quad (2.2)$$

- Potência média eficaz (PME): Pressão fictícia que, se agisse sobre o pistão durante todo o curso (ou tempo) motor, produziria a mesma quantidade de trabalho líquido que a produzida durante o ciclo real.

$$\text{PME} = \frac{W_{\text{líquido}}}{V_T - V_m} \quad (2.3)$$



### 2.2.1. CICLO OTTO

O engenheiro alemão Nikolaus August Otto desenvolveu, em 1876, o primeiro motor a quatro tempos. Com isso, batizou-se de ciclo Otto a sequência de transformações termodinâmicas que se faziam presentes em sua invenção. Na Figura 3 abaixo, pode-se ver o funcionamento do motor de combustão interna de ignição por centelha a quatro tempo, ou seja, em ciclo Otto, em suas versões real e ideal.

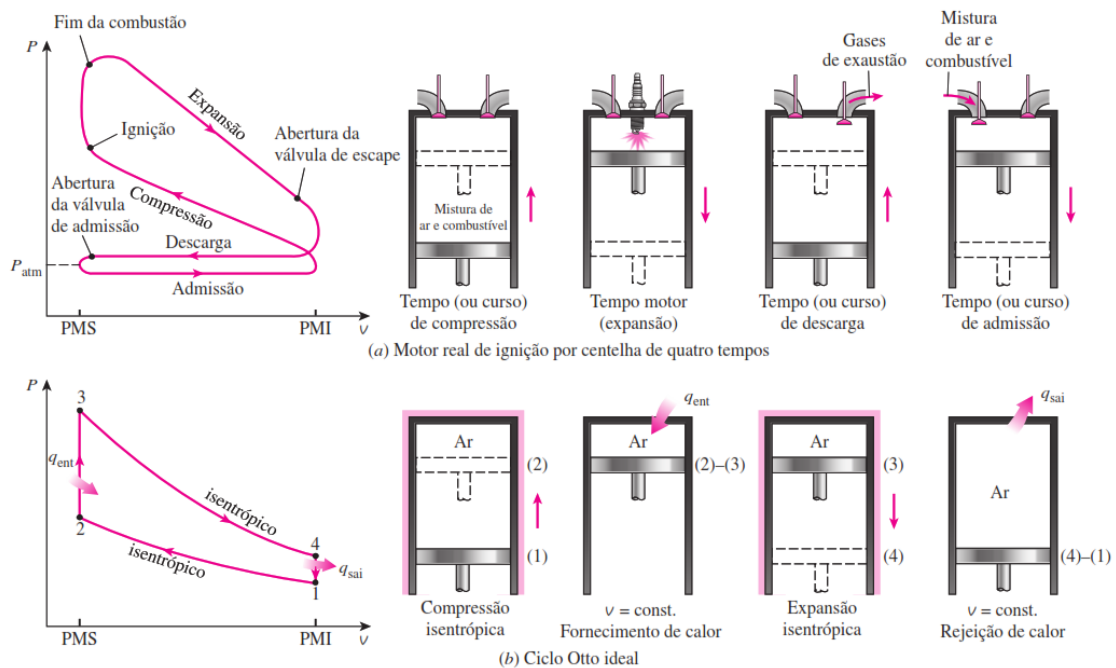


Figura 3: Etapas dos ciclos real e ideal dos motores de ignição por centelha e seus diagramas P-V. Fonte: ÇENGEL, 2013

Percebe-se que cada etapa do ciclo corresponde ao que chamamos de tempo. De maneira, simplificada temos: o tempo de admissão, onde o pistão se move do PMS ao PMI permitindo a entrada da mistura ar-combustível pela válvula de admissão; o tempo de compressão, quando as válvulas de admissão e descarga se encontram fechadas e o pistão vai do PMI ao PMS, comprimindo a mistura; o tempo de expansão, onde a vela de ignição gera a centelha que inflama a mistura ar-combustível que com o aumento de pressão e temperatura empurram o pistão do PMS para o PMI, girando o virabrequim e produzindo trabalho; e por fim, o tempo de exaustão, onde o pistão no PMI move-se para cima expulsando os gases da queima da mistura ar/combustível através da válvula de descarga que se encontra aberta, como visto em Çengel, 2013.

### 2.2.2 CICLO DIESEL

Em homenagem ao engenheiro alemão Rudolf Diesel, deu-se o seu nome aos motores de ignição por compressão baseados ao seu modelo construído em 1893. Diferente dos motores a ciclo Otto, que necessitam de um dispositivo que produz uma faísca para iniciar a combustão, o ciclo Diesel utiliza-se do próprio combustível utilizado para início da queima. O princípio de funcionamento é basicamente a utilização da compressão, feita pelo pistão, do ar admitido no cilindro que ao alcançar alta temperatura e pressão, e entrar em contato com o combustível injetado gerando a mistura ar-combustível dentro do cilindro, ultrapassa a temperatura de autoignição do próprio combustível, gerando a queima da mistura. Com isso, o pistão é empurrado, movimentando-se e gerando trabalho. A Figura 4 demonstra o funcionamento do motor Diesel e, a Figura 5, o diagrama P-V do ciclo Diesel ideal.

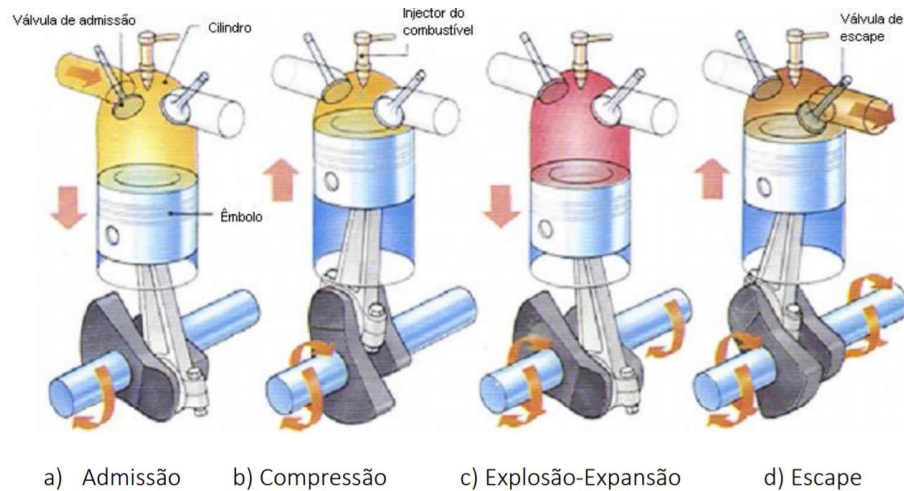


Figura 4: Funcionamento de motor Diesel em 4 tempos. Fonte: DEBEIR, 1993

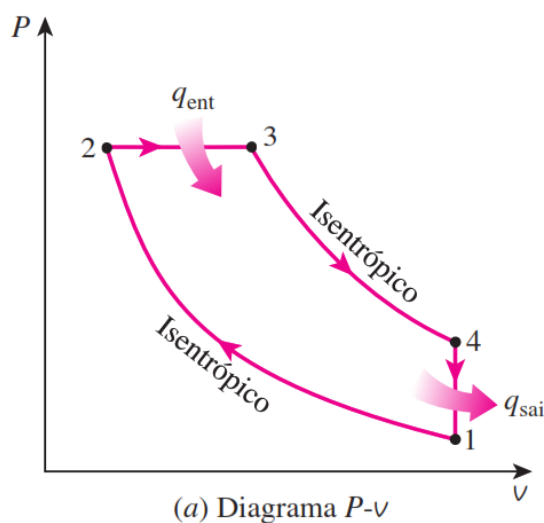


Figura 5: Diagrama P-V do ciclo Diesel ideal. ÇENGEL, 2013

### 2.2.3 CICLO DUAL

Com a evolução dos projetos de motores Diesel, criou-se o conceito de ciclo Dual, onde temos uma combinação dos ciclos Otto e Diesel. A partir de um motor de ignição por compressão, utiliza-se a ideia de admissão de mistura ar-combustível do motor Otto, com a compressão e ignição feita por outro combustível, injetado e vaporizado no cilindro, do motor Diesel. Com a mistura ar-combustível da admissão em alta pressão e temperatura, alcança-se a temperatura de autoignição do combustível de ignição injetado que gera a combustão da mistura completa. Em geral, o combustível utilizado na mistura de admissão é um gás, comumente o gás natural, enquanto o combustível de ignição é o diesel. Esse método traz vantagens como o potencial de reduzir os poluentes produzidos pela queima dos combustíveis. Nas Figuras 6 e 7, pode-se ver as etapas do funcionamento do motor dual.

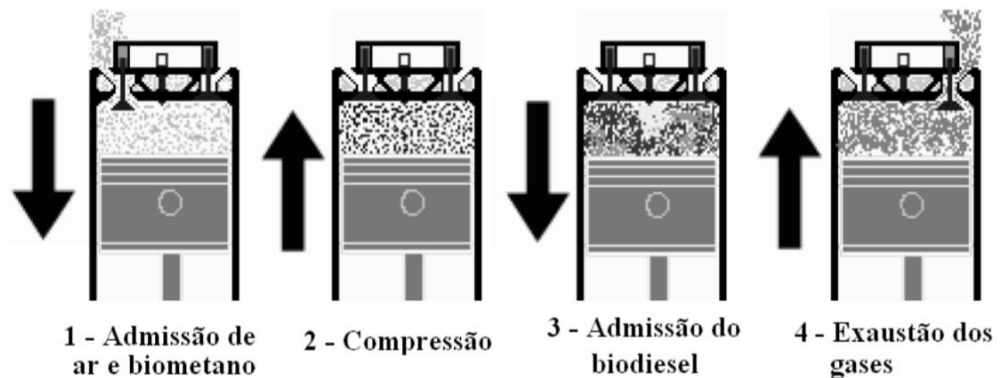


Figura 6: Etapas de funcionamento de um motor dual com biocombustíveis. Fonte: SOUZA, 2013

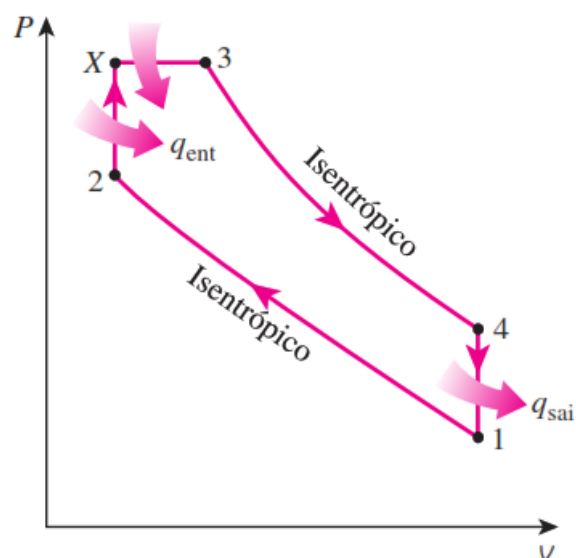


Figura 7: Gráfico P-V do ciclo Dual ideal. ÇENGEL, 2013.

## **2.3. COMBUSTÃO**

O objetivo principal no design de motores é maximizar cada fator de eficiência, a fim de extrair o máximo de potência com o mínimo de combustível. Por isso, é necessário fazer um estudo aprofundado de todos os fatores que influenciam na combustão para chegar no ponto mínimo de consumo. Por ser uma reação química de oxidação do combustível com o comburente, em geral o oxigênio do ar, produz diversos produtos que são poluentes e esse é mais um fator a influenciar no estudo da combustão e seus elementos para minimizar ao máximo os seus impactos ambientais.

O controle da combustão é importante para os motores, pois é através dele que se alcança uma maior vida útil, um bom funcionamento da máquina e maiores rendimentos, fora a já mencionada diminuição na emissão de produtos poluentes.

### **2.3.1. INFLUENCIADORES NO PROCESSO DE COMBUSTÃO**

#### **2.3.1.1. MISTURA DE COMBUSTÍVEL**

A preparação do combustível antes de entrar na câmara de combustão é um dos pontos importantes quando visto a eficiência da queima. A quebra do jato e evaporação do combustível injetado, formação de gotículas e mistura delas com o ar/ar-combustível da admissão são os passos da preparação. Levando em consideração um motor Diesel ou Dual, o processo de combustão é heterogêneo, pois os meios são de estados diferentes. O meio admitido estará no estado gasoso, seja ele apenas ar ou uma mistura de ar com gás natural/biogás e o meio injetado estará no estado líquido, sendo o diesel/biodiesel. Com isso, criam-se áreas com concentrações diferentes de combustível, onde próximo do injetor, terá uma concentração maior e perto das paredes do cilindro, será menor. Dito isso, para alcançar uma maior homogeneidade na câmara de combustão, precisa-se de movimentação dos meios e uma geometria da câmara e injetores que proporcionem essa turbulência. Os fluxos impostos na câmara são descritos de duas formas: o fluxo rotacional chamado “*swirl*” e o fluxo radial chamado “*squish*”. São eles que promovem a mistura mais homogênea do(s) combustível(is) com o comburente. A Figura 8 abaixo descreve os dois movimentos na câmara de combustão.

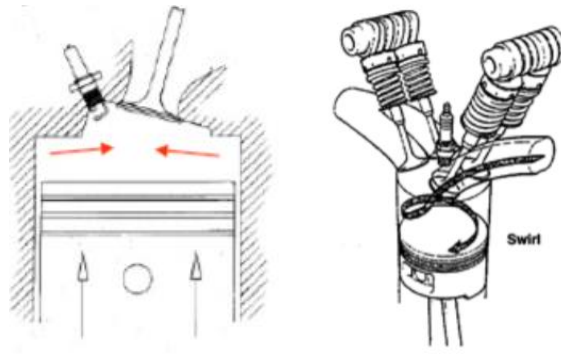


Figura 8: Fluxo “Squish” (esquerda) e “Swirl” (direita) dentro da câmara de combustão. Fonte: KAPLAN, 2019

### 2.3.1.2. ATRASO DE IGNIÇÃO

A ignição na câmara de combustão não acontece imediatamente após a injeção de combustível na fase de compressão. Esse tempo entre o início da injeção e o início da combustão é chamada de atraso de ignição. Cadeia de hidrocarbonetos, quantidade de cetanos, características do ar/gás de admissão e sua qualidade, além da qualidade do combustível de injeção, geometria da câmara de combustão, taxa de *swirl*, taxa de compressão do motor e outros fatores influenciam nesse atraso de ignição.

GUPTA, 2009 criou uma tabela demonstrando os efeitos que variados fatores causam no atraso de ignição. Podemos encontrar algumas delas na Tabela 1 abaixo:

Aumento na variável	Efeito no atraso de ignição	Razão
Qualidade do combustível de ignição: (i) Temperatura de autoignição (ii) Número de cetanos	Aumenta  Diminui	Dificuldade de queimar;  Reduz a temperatura de autoignição.
Tempo de ignição: (i) Avançando (ii) Retardando	Aumenta  Aumenta	No ponto de ignição, a pressão e temperatura do ar são menores;  Perda térmica aumenta.
Razão de compressão	Diminui	Aumenta a temperatura e pressão do ar. Reduz a temperatura de autoignição
Razão de <i>Swirl</i>	Diminui	Aumenta evaporação e mistura, reduz transferência de calor, aumenta a temperatura da ignição
Temperatura: (i) Admissão (ii) Combustível	Diminui  Diminui	Aumenta a temperatura do ar;  Melhor vaporização, aumenta a reação.

Tabela 1: Efeitos de vários fatores no atraso da ignição. GUPTA, 2009 Adaptado

### 2.3.1.3. *KNOCK*

Um dos grandes problemas da combustão num motor de combustão interna e diretamente relacionada ao atraso de ignição é o *knock*, também conhecido como detonação. Em um atraso de ignição elevado, durante a fase de compressão, a injeção de combustível vai se acumulando, o que causa uma combustão espontânea em outra área que a esperada, gerando uma rápida elevação de pressão e liberação de energia na câmara de combustão. Com isso, um reflexo das ondas propagadas pela combustão anormal com as paredes do cilindro e o pistão gera um ruído. Esse fenômeno pode causar graves problemas no motor, diminuindo sua vida útil, através de possíveis quebras de canaletas, erosão acentuada das áreas em contato com a detonação, elevação da temperatura no cilindro, além da redução na eficiência térmica do motor. A injeção de combustível deve ser controlada, para evitar o *knock*, através de mecanismos de injeção eletrônica ou pré-injeção, que injeta pequenas quantidades de combustível na câmara antes da injeção principal.

## **2.4. COMBUSTIVEIS**

### **2.4.1. DIESEL**

Combustível mais utilizado no motor de mesmo nome, o óleo diesel é um combustível líquido derivado do petróleo, composto majoritariamente por hidrocarbonetos de cadeias de 8 a 16 carbonos, havendo a possibilidade de conter, em baixas concentrações, enxofre, nitrogênio e oxigênio. É produzido através diversas etapas de processamento do petróleo bruto. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, também conhecida como ANP, apresenta uma divisão do óleo diesel em três categorias: S1800, com alto teor de enxofre, sendo assim de uso não rodoviário, aplicado em mineração a céu aberto e geração elétrica; S10 e S500, com um teor de enxofre mais baixo, já sendo aplicado no uso rodoviário; diesel marítimo, usado em embarcações. Ainda temos as divisões baseadas na adição de biodiesel. Nos casos em que não se adiciona o biocombustível, temos o diesel tipo A, enquanto os que recebem a adição do biodiesel são classificados de óleo diesel tipo B. Com o intuito de trazer a pesquisa para o cenário nacional, apresenta-se no Anexo I, tabela de especificação do óleo diesel utilizado no Brasil, BX a B30.

### **2.4.2. GÁS NATURAL**

Segundo a ANP, o gás natural é todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gasíferos, incluindo gases úmidos, secos residuais e gases raros. Comumente encontrado associado ao petróleo, o gás natural deve ser processado antes da sua comercialização, para que atenda todas os padrões exigidos pelos órgãos regulatórios. Predominantemente constituído de metano ( $\text{CH}_4$ ), é um gás menos denso que o ar, característica que diminui os riscos de explosões e incêndios em caso de vazamento. No Anexo II, encontra-se as especificações do gás natural veicular (GNV) de acordo com a Resolução nº 16/2008. Como o gás natural possui um ponto de ignição mais alto que o diesel, ele pode ser usado numa mistura com o ar na admissão, sendo queimado pela injeção de diesel em motores dual. Além disso, por ser um combustível mais barato, gera uma economia bastante considerável ao ser utilizado no lugar de outros combustíveis de matriz fóssil, como a gasolina e o próprio diesel, fora que, por ser mais limpo e seco, não se mistura nem contamina o óleo lubrificante, fazendo a vida útil do motor ser maior. Por ser mais limpo, o GNV acaba sendo também um combustível que, ao ser utilizado

adequadamente, reduz emissões de poluentes, logo sendo uma boa substituição em relação aos outros combustíveis fosseis.

### **2.4.3. BIODIESEL**

De acordo com a ANP, o biodiesel é um combustível renovável obtido a partir de um processo químico denominado transesterificação. Por meio desse processo, os triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool primário, metanol ou etanol, gerando dois produtos: o éster e a glicerina. O primeiro apenas pode ser comercializado como biodiesel, após passar por processos de purificação para adequação à especificação da qualidade, sendo destinado principalmente à aplicação em motores de ignição por compressão (ciclo Diesel).

No Brasil, a partir de 2004, foi feita a implementação comercial do biodiesel gradualmente através da mistura do mesmo com o diesel fóssil, primeiro de forma voluntária com teor de 2% e, a partir da Lei nº 11097/2005, passa a ser obrigatório a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Em 2008, entra em vigor a também obrigatória mistura de 2% de biodiesel no diesel fóssil, o chamado B2. Com o passar dos anos, esse percentual foi aumentando até chegar no valor de 13% a 15% em 2021.

Por ser um produto em constante estudo e desenvolvimento, as características do biodiesel variam de experimento para experimento, seja em especificações, teores de mistura, entre outros. Mas, neste projeto, com o intuito de informar sobre o cenário nacional, as especificações dadas pela ANP na Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014, estão presentes em tabela do Anexo III.

### **2.4.4. BIOGÁS/BIOMETANO**

De acordo com a ANP, biometano é um biocombustível gasoso obtido a partir do processamento do biogás. Por sua vez, o biogás é originário da digestão anaeróbica de material orgânico (decomposição por ação das bactérias), composto principalmente de metano e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O biometano obtido de resíduos essencialmente orgânicos é aquele proveniente das atividades agrossilvopastoris ou de certas atividades comerciais (por exemplo, alimentos descartados por bares e restaurantes), excluídos daí o gás de aterro sanitário e o proveniente de estações de tratamento de esgoto, uma vez que estes podem conter outros resíduos não orgânicos.



Após as etapas de purificação do biogás, resulta no biometano com elevado teor de metano em sua composição, reunindo características que o torna intercambiável com o gás natural em todas as suas aplicações ou passível de ser transportado na forma de gás comprimido por meio de caminhão-feixe (gasoduto virtual) ou na forma de gás liquefeito, denominado biometano liquefeito - Bio-GNL.

Assim como os demais combustíveis, as especificações da ANP estão presentes em tabela o Anexo IV, retirada da Resolução ANP n° 8/2015.

## **2.5. EMISSÕES VEÍCULARES**

Outro ponto importante no design de motores é o de atingir os requerimentos de emissões que são especificados pelas reguladoras. Esses poluentes são formados por uma variedade de interações dos processos mecânicos e químicos produzidos dentro do motor e que estão atrelados a dinâmica dos fluidos dentro dos cilindros. De acordo com a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) os poluentes derivados da combustão são os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrocarbonetos não queimados (HC) e hidrocarbonetos poliaromáticos, comumente reconhecidos como “*soot*” ou fuligem. Sendo um dos pontos focais desse trabalho, é visto que a necessidade da diminuição da emissão desses gases é de extrema importância. O funcionamento do motor e como a combustão é executada influenciam bastante em como essas emissões vão ser produzidas.

Combustíveis de matriz fóssil, como o diesel, tendem a ser bastante poluentes ao serem consumidos. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), estabelecendo diretrizes, prazos e padrões legais de emissões veiculares admissíveis, tanto para veículos nacionais como importados. Antes dos programas, a emissão média, por exemplo, de monóxido de carbono (CO) de um veículo leve era de 54g/km. Na atualidade essa emissão está por volta de 0,4 g/km. Na Tabela 2, encontramos os limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de ciclo Diesel e os movidos a GNV. No site do IBAMA, pode-se encontrar os limites para os diversos outros tipos de veículos. Observando os limites para esses combustíveis, pretende-se então alcançar valores inferiores para os biocombustíveis a serem estudados.

POLUENTES	LIMITES - Diesel	LIMITES - GNV
	Fase P-7	Fase P-7
	Desde 1º/1º/2012	Desde 1º/1º/2012
monóxido de carbono (CO em g/kW.h)	4,00	4,00
hidrocarbonetos não metano (NMHC - g/kW.h)	0,55	0,55
metano (CH <sub>4</sub> em g/kW.h)	Não Exigível	1,10
óxidos de nitrogênio (NOx em g/kW.h)	2,00	2,00
material particulado (MP em g/kW.h)	0,03	Não Exigível

Tabela 2: Limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de ciclo Diesel e os movidos a GNV.  
Fonte: PROCONVE, adaptado

### 3. METODOLOGIA

Utilizando o método *PRISMA* para realizar a revisão sistemática da literatura, definiu-se que para a relevância da análise a ser feita nesse estudo, deveria utilizar-se de publicações científicas, em inglês, produzidas ao longo do período entre os anos 2001 e 2021. Partindo disso, utilizou-se para tal bibliotecas digitais de artigos científicos, mais especificamente o Web of Science.

Com a fonte de dados definida, considerou-se como estratégia de busca o uso da pesquisa avançada com auxílio de palavras-chave e booleanos, resultando na seguinte string de busca: TS=(((biodiesel) OR (biogás) OR (biofuel\*)) AND ((dual fuel) OR (dual-fuel) OR (dual fuelled)) AND ((simulation\*) OR (CFD) OR (ANSYS)) AND (emission\*) AND ((internal combustion engine) OR (ICE) OR (compression engine))). A partir daí, teve-se um lapso temporal de 2012 a 2021 e um total de 45 artigos. Ao refinar a busca para incluir apenas artigos finalizados em inglês o resultado caiu para 43. Com isso, a lista de resultados foi classificada por mais citações, onde os 10 mais citados foram os utilizados para a análise.

Os supracitados periódicos consultados foram pesquisados durante ao final do ano de 2021, tendo sua última pesquisa realizada no dia 30 de dezembro desse mesmo ano. Além disso, a revisão foi desenvolvida por inteira utilizando-se de dados encontrados na internet e sem

consulta a pesquisas físicas, experimentos e indivíduos. Todos esses detalhes podem ser consultados nas referências bibliográficas presentes no final deste relatório.

Um estudo baseado na simulação computacional, utilizando o módulo de fluidodinâmica computacional do software ANSYS, sobre os motores de ignição a compressão operando em modo dual e alimentados com biocombustíveis será desenvolvido, buscando critérios técnicos que permitam a substituição do diesel mineral que alimentam os motores convencionais.

Baseando-se nos modelos de cilindros de um motor de combustão interna com ignição por compressão fornecidos pela própria ANSYS, será utilizado um método de simulação por seção, onde ao invés de utilizar um cilindro por inteiro, usa-se um setor de 1/6 ou 60°, diminuindo assim o trabalho computacional. Com uma área menor a ser estudada, pode-se usar o ganho computacional em uma malha mais fina que resultará em detalhes menos grosseiros da simulação quando comparada a um exercício experimental. Os modelos presentes nas bibliotecas dos diversos módulos do software ANSYS são demasiadamente utilizados em estudos e pesquisas e podem ser classificados como confiáveis, levando-se em consideração a quantidade de material de suporte da própria companhia corroborados pelos estudos desenvolvidos com seus modelos. Dessa maneira, a Figura 9 representa o modelo a ser utilizado.

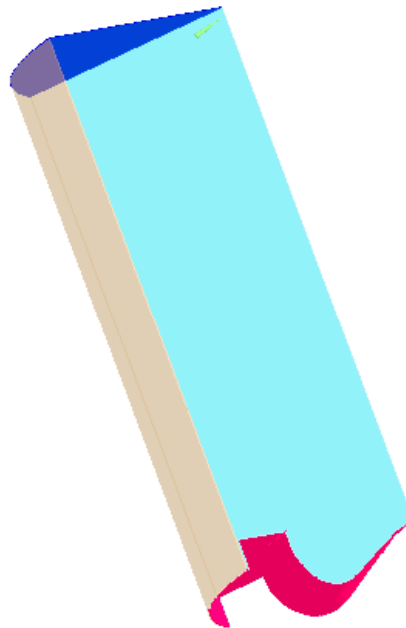


Figura 9: Exemplo de modelo de setor de cilindro em simulação no software ANSYS. Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do módulo FORTE do software ANSYS, versão 2021 R2, pretende-se então simular a queima de combustíveis num modelo de ciclo fechado de um cilindro de motor de combustão interna com ignição por compressão. Por ser um modelo de motor dual, em um ciclo fechado, supõe-se que o combustível de admissão já comporá a mistura na câmara do cilindro antes de começar injeção do combustível para evitar gasto computacional com a simulação de admissão e exaustão. Será simulado um ciclo de combustão, da expansão da câmara, passando pela compressão do combustível de admissão, injeção e combustão. Os combustíveis a serem usados são: biogás como combustível de admissão misturado ao ar e biodiesel puro com combustível de injeção. Esses combustíveis serão representados por modelos presentes na biblioteca de modelos de combustíveis disponibilizada pela própria ANSYS. Pela complexidade e diversidade de materiais que podem ser utilizados para produção de biocombustíveis, é difícil definir um modelo que melhor represente o combustível a ser estudado. No caso do biodiesel, um modelo mais detalhado pode ser encontrado na biblioteca do simulador, porém os biogases e biometano ainda não possuem algo bem estruturado pelas ferramentas disponibilizadas. Com isso e seguindo o exemplo de diversos estudos como Herbinet et al. 2010 e Costa et al. 2017, o uso de combustíveis ou misturas similares às características do que se pretende estudar são usadas, seja pelo tamanho da cadeia de carbono, posição de ligações duplas, quantidade de átomos de oxigênio, entre outros. No caso do biodiesel, será utilizado o metil-decanoato e o biogás foi definido num modelo reduzido de gás sintético proveniente de lascas de madeira (Costa et al 2015) com a composição do biogás sendo definida por Tippayawon et al 2007, como visto abaixo na Tabela 3.

Componente	% v/v
Metano (CH <sub>4</sub> )	65,6
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	26,4
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	6,0
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	2,0
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,0

Tabela 3 – Composição média de um biogás. Fonte: Tippayawon et al 2007

Na figura 10, observa-se as frações das espécies utilizadas na admissão do processo de combustão do motor, definidas a partir das espécies presentes no gráfico: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>.

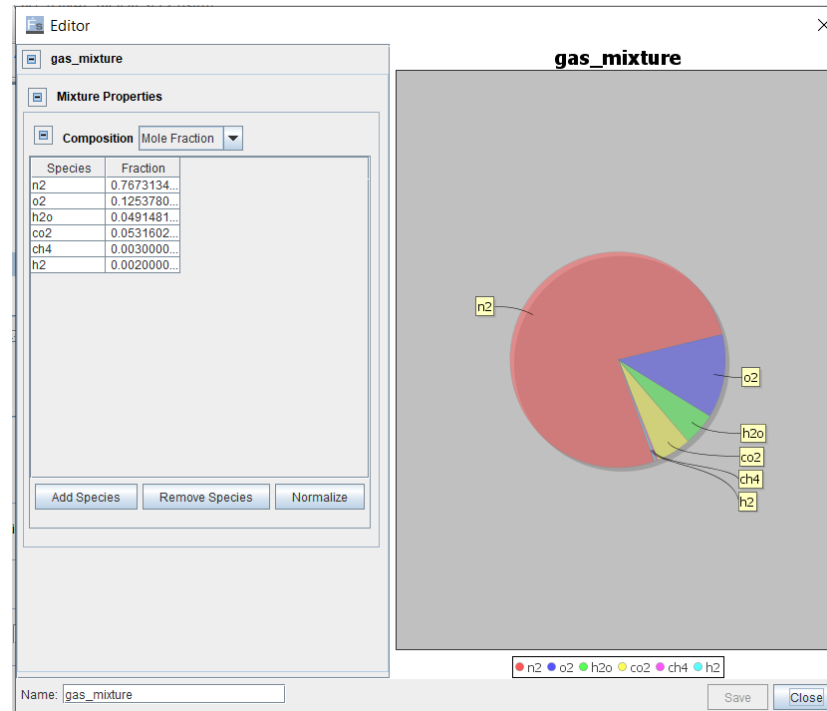


Figura 10: Frações das espécies utilizadas na admissão. Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os combustíveis definidos, partimos para a definição dos parâmetros de injeção e motor. Fica definido um motor a 1300 rpm, simulando rotação comum de um veículo ligado e parado. Todos os parâmetros usados, esses presentes nas tabelas 4 e 5, serão os definidos no material introdutório do ANSYS que é baseado no estudo de Puduppakkam et al 2011, exemplificando um motor *dual fuel* operando com gasolina/diesel, podendo ser vistos nas tabelas a seguir.

Fechamento da válvula de admissão [°]	-95.0
Abertura da válvula de escape [°]	130.0
Diâmetro do cilindro [mm]	137.16
Curso do cilindro [mm]	165.1
Quantidade de cursos	4
Rotação do motor [rpm]	1300.0
Comprimento da biela [mm]	261.6
Começo da primeira injeção [°]	-67.0
Duração da primeira injeção [°]	5.46
Começo da segunda injeção [°]	-32.7
Duração da segunda injeção [°]	2.73
Massa de combustível total [g]	0,022563

Tabela 4 – Parâmetros do motor. Fonte: Puduppakkam et al 2011

Pressão [bar]	-95.0
Temperatura [K]	322.0
Intensidade de Turbulência	0.1
Escala de comprimento de Turbulência [mm]	10.0
Razão inicial de <i>swirl</i> do motor	-0.7
Fator inicial do perfil de <i>swirl</i>	3.11
Temperatura da parede do cilindro [K]	430.0
Temperatura da cabeça do cilindro [K]	500.0
Temperatura da superfície do pistão [K]	500.0
Temperatura da mistura ar/combustível [K]	391.0

Tabela 5 – Condições iniciais. Fonte: Puduppakkam et al 2011

Os demais parâmetros como o posicionamento do injetor de combustível, quantidade de partículas injetadas, entre outros estão iguais ao modelo fornecido pela ANSYS. Os resultados adquiridos da queima de biogás/biodiesel serão comparados a esse modelo pré-existente do programa no intuito de avaliar o desempenho e emissões de um motor movido a biocombustíveis, quando em mesmas condições de um motor preparado para uso de combustíveis fósseis dando argumento para uma possível substituição dos combustíveis fósseis e incentivo para produção dos biocombustíveis numa futura mudança da matriz energética no modal de transportes do país.

As simulações têm tempo estimado de 1 hora e 30 minutos cada em um computador com processador Intel Xeon E5-2690 de 2.90 GHz e 8 núcleos. O computador a ser usado no estudo apresenta um processador Intel i5 sexta geração de 2 núcleos, o que elevará o tempo de gasto computacional devido as suas limitações. Estimou-se 10 horas cada simulação com benchmarks achados na internet. Os resultados em formato de gráficos serão retirados do monitor do módulo FORTE ao final das simulações.

Várias pesquisas já apresentam boas simulações de motores de combustão interna de ciclo Diesel e podem vir a ser utilizadas como referência a esse estudo. Kongre et al. (2010) fizeram um modelo de MCI de ciclo Diesel para avaliar variáveis no processo de compressão e combustão num cilindro através de uma malha 2D e simulações usando Fluent. Houve a conclusão de que a predição da modelagem foi significativa e que o CFD é fundamental para o desenvolvimento e a aprimoramento de MCI, com baixo custo e acessível comparando com métodos experimentais. Rocha (2010), avaliando a influência de adição de biodiesel de óleo de mamona ao diesel comum, numa proporção de B20 (20% de volume de biodiesel), num MCI

de ciclo Diesel, através de simulação pelo método KIVA-3, verificou que o uso do B20 comparado ao B0, teve maior potência e menor consumo específico, porém o diesel B20 apresentou uma maior formação de poluentes NOx em relação ao B0, devido a maior penetração do spray de injeção e maior temperatura de combustão, induzidos por um maior atraso de ignição.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesse capítulo serão apresentados os resultados adquiridos através da revisão sistemática da literatura de acordo com o método PRISMA e os resultados das simulações computacionais feitas no módulo FORTE do software ANSYS.

##### **4.1. RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA**

O fluxograma PRISMA mostrado na figura 11, percebemos que através da busca na base de dados Web of Science pudemos identificar um total de 45 artigos onde, após os critérios de filtragem estabelecidos e mencionados anteriormente, restaram 43 artigos, com 2 sendo excluídos por estarem como acesso antecipado. Após a filtragem, os 10 artigos com mais citações foram selecionados para análise.

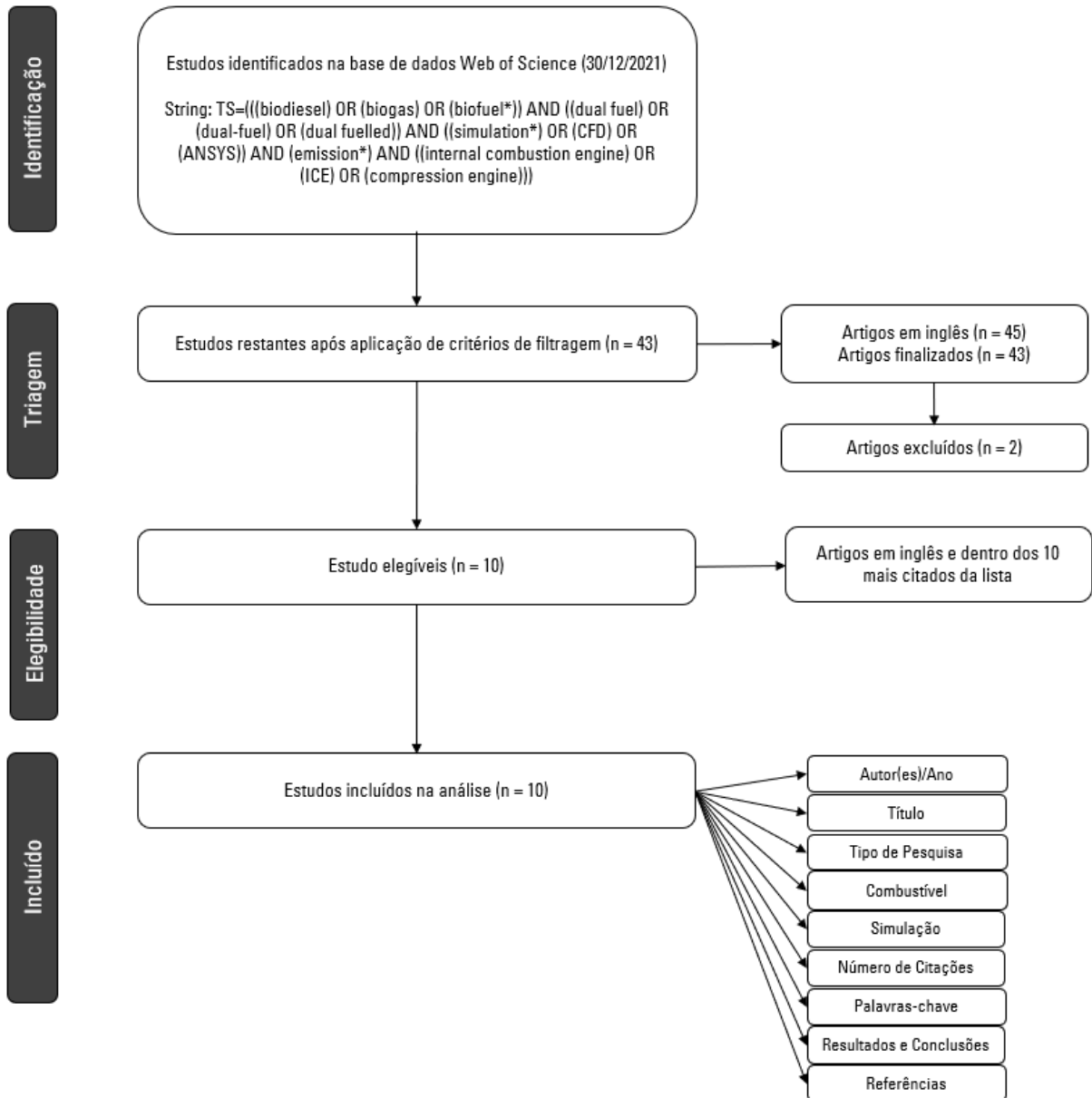


Figura 11: Fluxograma PRISMA de revisão sistemática. Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de organizar os dados dos artigos incluídos na análise qualitativa, foi elaborado a Tabela 6 com base em nove tópicos que são: autores e o ano de publicação, título do artigo, o tipo de pesquisa, combustível(is) estudos, se houve simulação, o número de citações, palavras-chave, resultados e conclusões e referências.



<b>Autor(es)/Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo de Pesquisa</b>	<b>Combustível</b>	<b>Simulação</b>	<b># de Citações</b>	<b>Palavras-chave</b>	<b>Resultados e Conclusão</b>	<b>Referências</b>
Haifeng Liu; Xin Wang; Zuncheng Wang; Jingbo Gu; Hu Wang; Mingfa Yao / 2014	Investigação experimental e de simulação das características de combustão e emissões usando injeção bicombustível n-butanol/biodiesel em um motor diesel	Experimental e Simulação	n-butanol/biodiesel	Sim. KIVA-3vr2. Decanoato de metila foi usado como substituto do biodiesel no modelo cinético reduzido. Fez modelos de NOx e soot.	98	n-Butanol, Biodiesel, Injeção bicombustível, Combustão, Emissões	Tanto para injeção precoce como tardia, a auto-ignição é desencadeada pelo biodiesel. A injeção precoce apresenta emissões de NOx menores que a tardia por causa da baixa temperatura de combustão, enquanto as emissões de soot são comparáveis entre as duas injeções.	LIU, H. et al.
Zhou, D. Z.; Yang, W. M.; An, H.; Li, J.; Shu, C. / 2015	Um estudo numérico sobre o motor RCCI alimentado por biodiesel/metanol	Simulação	biodiesel/metanol	Sim. KIVA4 e CHEMKIN-II. Decanoato de metila e metil-9-decanoato foi usado como substituto do biodiesel no modelo cinético reduzido. Fez modelos de NOx e soot.	63	Biodiesel; Mecanismo químico; Metanol; motor RCCI	O aumento de metanol na mistura de combustíveis reduziu a pressão máxima e a taxa de liberação e calor no cilindro. Emissões de NOx e soot também reduziram com o aumento de metanol na mistura.	ZHOU, D. Z. et al.
Li, Yu; Li, Hailin; Guo, Hongsheng; Li, Yongzhi; Yao, Mingfa / 2017	Uma investigação numérica sobre a combustão e as emissões de metano de um motor bicombustível gás natural-diesel usando o modelo CFD	Simulação	gás natural/diesel	Sim. CONVERGE. Diesel foi representado pelo n-heptano e o gás natural pelo metano. Houve medição de metano não queimado	58	Modelo CFD; Motor bicombustível; Emissões de metano; Oxidação pós-combustão	Pré-mistura de combustíveis fica pobre para propagar a chama iniciada pelo combustível piloto, gerando emissão de metano não queimado. Outro fator preponderante para essa baixa queima se dá pelas limitações geométricas do sistema de injeção de combustível levando a redução da massa de combustível piloto injetado no cilindro.	LI, Y. et al.
Yousefi, Amin; Birouk, Madjid / 2017	Investigação da fração de energia do gás natural e tempo de injeção no desempenho e emissões de um motor bicombustível com câmara de pré-combustão sob baixa carga do motor	Experimental e Simulação	gás natural/diesel	Sim. AVL FIRE e CHEMKIN. Usou modelos para NOx e soot.	48	Modo dual fuel; Fração energética do gás natural; Temporização de injeção de diesel piloto	Introdução de câmara de pré-combustão provocou um alto movimento de swirl quando a fração de energia do gás natural está a 50% que também é o ponto de máxima eficiência térmica. Também ocorre uma drástica redução de NOx quando a fração de gás natural é de 60% quando comparado com a combustão de apenas diesel. Em contra partida, a quantidade de metano não queimado é muito maior que a de uma queima simples de diesel, por causa da combustão em baixa carga.	YOUSEFI, A.; BIROUK, M.

Tabela 6 – Principais características dos artigos selecionados. Fonte: Web of Science

Autor(es)/Ano	Título	Tipo de Pesquisa	Combustível	Simulação	# de Citações	Palavras-chave	Resultados e Conclusão	Referências
Li, Jie; Yang, Fuyuan; Wang, Hewu; Ouyang, Minggao / 2012	Estudo numérico da adição de hidrogênio ao motor RCCI bicombustível DME/CH4	Simulação	hidrogênio/éter dimetilico/metano	Sim. KIVA-3V e CHEMKIN. Usou modelos para NOx	45	Cinética química; Bicomustível; Hidrogênio; RCCI	Com a adição de hidrogênio, o tempo de ignição é avançado e a pressão máxima do cilindro aumenta, além de ter um efeito maior no estágio inicial da combustão do que nos estágios posteriores. A emissão de metano é reduzida com a adição de H <sub>2</sub> , porém, como a chama não se propaga pela câmara, a emissão de CH <sub>4</sub> ainda é alta. A emissão de CO é reduzida e a maioria do CO restante é produzido pela combustão do CH <sub>4</sub> pré-misturado. Com a adição de hidrogênio, a emissão de NO é aumentada. A simulação mostra que as emissões finais de NOx são significativamente determinados pela estratégia de injeção e quantidade de combustível piloto durante condições de operação de combustível duplo.	LIU, J. et al.
An, H.; Yang, W. M.; Maghbouli, A.; Li, J.; Chou, S. K.; Chua, K. J.; Wang, J. X.; Li, L. / 2014	Investigação numérica das características de combustão e emissão de uma combustão de biodiesel assistida por hidrogênio em um motor diesel	Experimental e Simulação	hidrogênio/biodiesel	Sim. KIVA-4 e CHEMKIN-II. Modelos para NOx, CO e soot foram usados.	39	Biodiesel; Motor a diesel; indução de hidrogênio; Modelo de reação química esquelética	Os principais resultados da simulação analisam que, com o aumento da indução de hidrogênio, um aumento na pressão máxima do cilindro e na taxa de liberação de calor pode ser obtido sob condição de carga de 50% e 100%, indicando um melhor desempenho. Mas um desempenho reduzido é observado em carga leve (10% de carga) devido aos maus processos de ignição e combustão. Em termos de emissões, observa-se uma tendência geral de diminuição das emissões de CO e de fuligem em todas as velocidades e cargas do motor, e uma redução mais notável é encontrada em condições de carga do motor de 100%. Além disso, devido ao aumento da combustão, as emissões de NOx aumentam ligeiramente a 50% e 100% das cargas do motor.	AN, H. et al.

Tabela 6 – Principais características dos artigos selecionados. Fonte: Web of Science

Autor(es)/Ano	Título	Tipo de Pesquisa	Combustível	Simulação	# de Citações	Palavras-chave	Resultados e Conclusão	Referências
García, Antonio; Monsalve-Moncalvo; Serrano, Javier; Rückert Roso, R; Viničius, Santos; Martins, Mario Eduardo / 2017	Avaliando as emissões e o desempenho de duas estratégias de combustão RCCI de modo <i>dual</i> sob o <i>World Harmonized Vehicle Cycle</i> (WHVC)	Experimental	diesel B7/E20-95	Não	36	Combustão bicombustível; Conceito de modo duplo; emissões EURO VI; Simulação do ciclo do motor; Ignição por compressão controlada por reatividade	Os resultados sugerem que o conceito dual-mode dual-fuel permite reduzir o consumo específico de combustível por 7% em média versus conceito RCCI/CDC. Além disso, as emissões de NOx são cerca de 87% mais baixas com o modo dual-fuel, atendendo aos requisitos EURO VI sem a necessidade de um sistema de pós-tratamento SCR. Em contrapartida, as emissões de hidrocarbonetos e CO são cerca de 2 e 10 vezes maiores	GARCIA, A. et al.
Mikulski, Maciej; Wierzbicki, Slawomir / 2016	Investigação numérica do impacto da composição do gás na processo de combustão em um motor de ignição por compressão de combustível duplo	Simulação	gás natural/diesel	Sim. Modelo matemático zero dimensional desenvolvido pelos autores	32	GNV; Motor bicombustível; Composição do gás; Cinética de reação; Simulação; Modelo zero-dimensional	Foi demonstrado que uma mudança na composição do gás tem um impacto significativo no processo de combustão e parâmetros de operação de um motor bicombustível. A combustão de aditivos de gás determina em grande parte a combustão tanto do componente principal do combustível gasoso quanto da dose inicial de óleo diesel. O adição de hidrocarbonetos superiores ao metano pode melhorar o desempenho do motor em até 6%. Além disso, foi demonstrado que as mudanças de composição do gás afetam significativamente o atraso de ignição da injeção inicial de diesel.	MIKULSKI, M.; WIERZBICKI, S.

Tabela 6 – Principais características dos artigos selecionados. Fonte: Web of Science

Autor(es)/Ano	Título	Tipo de Pesquisa	Combustível	Simulação	# de Citações	Palavras-chave	Resultados e Conclusão	Referências
Rahman, K. Abdul; Ramesh, A. / 2018	Estudos sobre os efeitos da fração de metano e estratégias de injeção em um motor bicombustível diesel-biogás	Experimental	biogás/diesel	Não	31	Combustíveis alternativos; Composição do biogás; Motores bicombustíveis; Pulso múltiplo em motores bicombustíveis; Injeção piloto; Pós injeção	Concentrações de metano acima do normal apenas elevaram os níveis de NO com pouco impacto na eficiência. No entanto, quando baixas proporções de metano foram usadas, o NO pode ser controlado de forma eficaz. Os estudos de simulação indicaram que esta redução no NO é devido a queda de temperatura no cilindro em vez da concentração reduzida de oxigênio como resultado do aumento de CO <sub>2</sub> . Com injeção piloto houve uma redução na emissão de fumaça por causa da homogeneidade de carga melhorada devido à divisão do processo de injeção. No entanto, a pós-injeção, que geralmente é eficaz em motores a diesel, não foi vantajosa no modo biogás-diesel devido à combustão por difusão que o combustivel pós-injetado sofre.	RAHMAN, K. A.; RAMESH, A. S
Zhao, Fetyang; Yang, Wenming; Zhou, Dezhi; Yu, Wenbin; Li, Jing; Tay, Kun Lin / 2017	Modelagem numérica da formação e oxidação de soot usando abordagem fenomenológica de modelagem de soot em um motor de ignição por compressão bicombustível	Simulação	gasolina/diesel	Sim. KIVA4 e CHEMKIN.	31	Motor bicombustível; Reatividade do combustível; Química precursora de soot; Crescimento da superfície de soot	Os fatores que afetam as partículas de fuligem sob cargas de motor variáveis e condições de combustível foram extensivamente investigadas. Geralmente, o tamanho de partícula de fuligem previsto foi maior para condições de fuligem pesada em comparação com condições de baixa fuligem. Para combustão dominada por gasolina injetada, há menos fuligem sendo descarregada. Isso pode ser atribuído a duas razões: Primeiro, uma mistura mais homogênea é realizada com menos óleo diesel, reduzindo efetivamente a formação de precursores de fuligem. A outra razão é a liberação intensiva de calor que acelera o esgotamento de precursores de fuligem, impedindo assim o crescimento de partículas em termos de tamanho e massa	ZHAO, F. et al.

Tabela 6 – Principais características dos artigos selecionados. Fonte: Web of Science

Conforme pode ser visto na Tabela 6, poucos autores abordaram a inclusão de biodiesel como combustível principal da configuração bicomcombustível, AN, H. et al. (2014), ZHOU, D. Z. et al. (2015) e LIU, H. et al. (2014). O biogás é citado em apenas um artigo, de RAHMAN, K. A.; RAMESH, A. S (2018). Podemos considerar então que o estudo do uso de biocombustível em motores modo dual é uma lacuna na pesquisa científica. Pode-se trazer benefícios na questão das emissões dado que em todos os estudos citados o biocombustível combinado com a configuração de injeção, formato de câmara e proporção da mistura dos combustíveis envolvidos diminui emissão de NOx e *soot*. Outro ponto a se destacar é o fato de que nenhum dos artigos referenciados utiliza o software ANSYS que é referência em simulações computacionais e possui integração com um dos módulos mais mencionados, o CHEMKIN. O programa possui vários módulos específicos de fluidodinâmica e combustão interna. Apesar disso, todos os trabalhos citados demonstram proximidade com os casos experimentais, o que passa confiança no processo sendo desenvolvido atualmente, tanto do lado experimental como numérico.

Pelos relatórios disponíveis na base de dados Web of Science, também podemos perceber que o assunto sendo tratado nesse estudo ainda está no início quando comparado a outros meios de se utilizar biocombustíveis, mas possui espaço para crescimento, dado que o número de artigos publicados que fazem parte dos aferidos na busca feita estão mais concentrados nos últimos 5 anos conforme a figura 12:

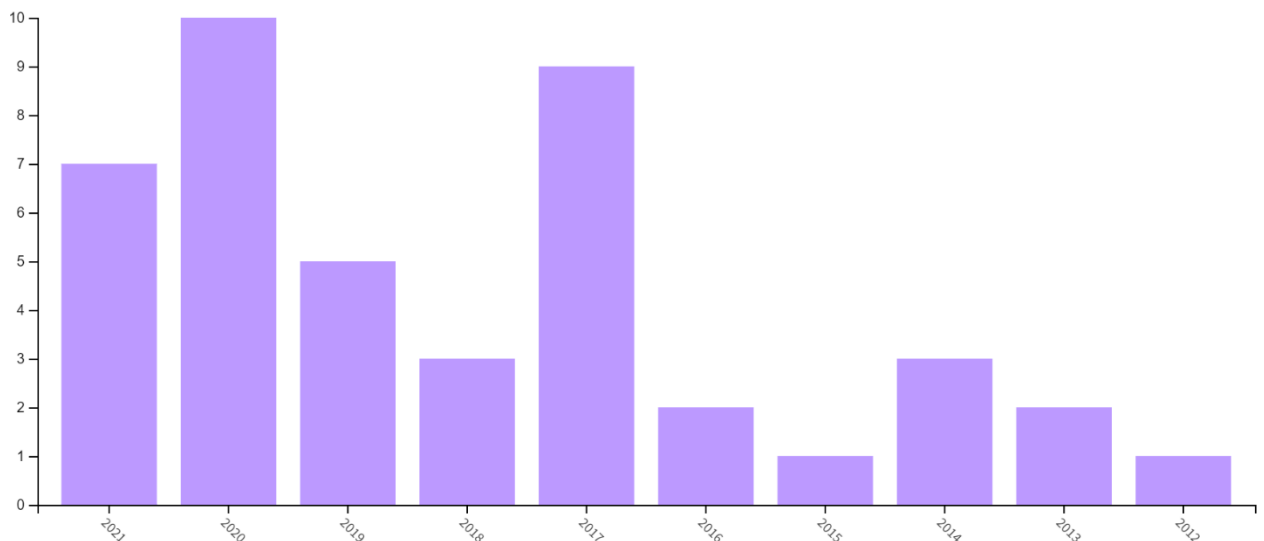


Figura 12: Gráfico Publicações de Artigos x Ano. Fonte: Web of Science

Outro ponto a ser ressaltado é o de quantidade de países que estão trabalhando nesse assunto. De acordo com as figuras 13 e 14, podemos ver que o Brasil está trabalhando nessa

questão, mas que ainda tem espaço para crescer e estar mais próximo da China na quantidade de artigos publicados e que existe um interesse na área de energia e combustíveis, dado que a grande maioria dos artigos publicados foram para essa área.

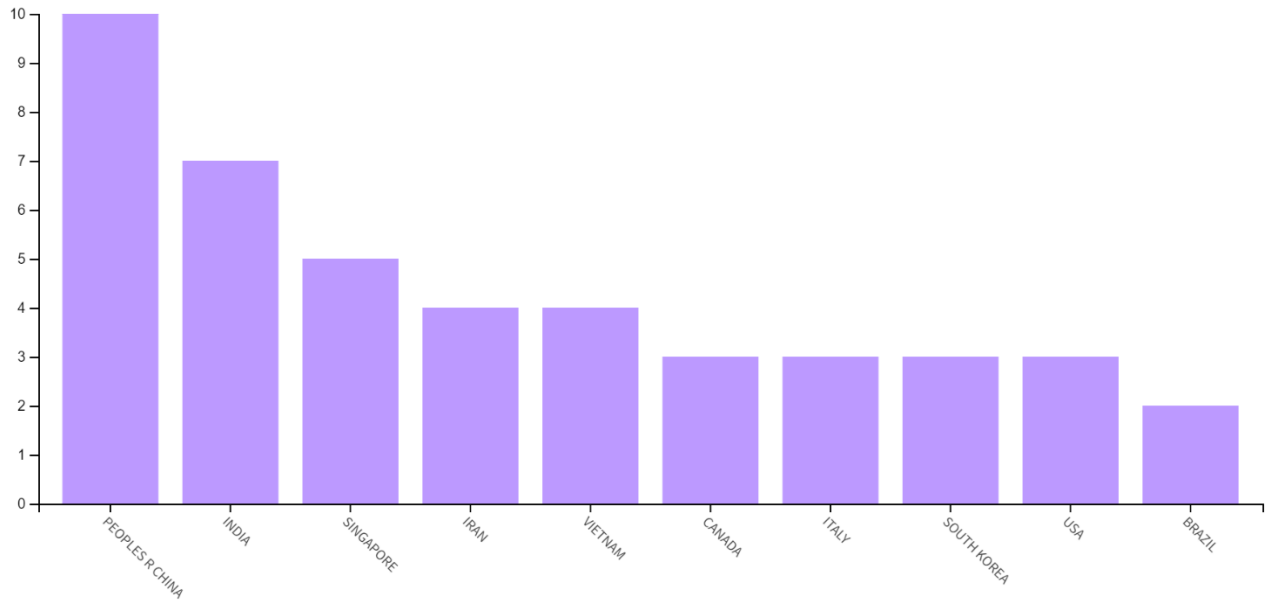


Figura 13: Gráfico Publicações x País. Fonte: Web of Science

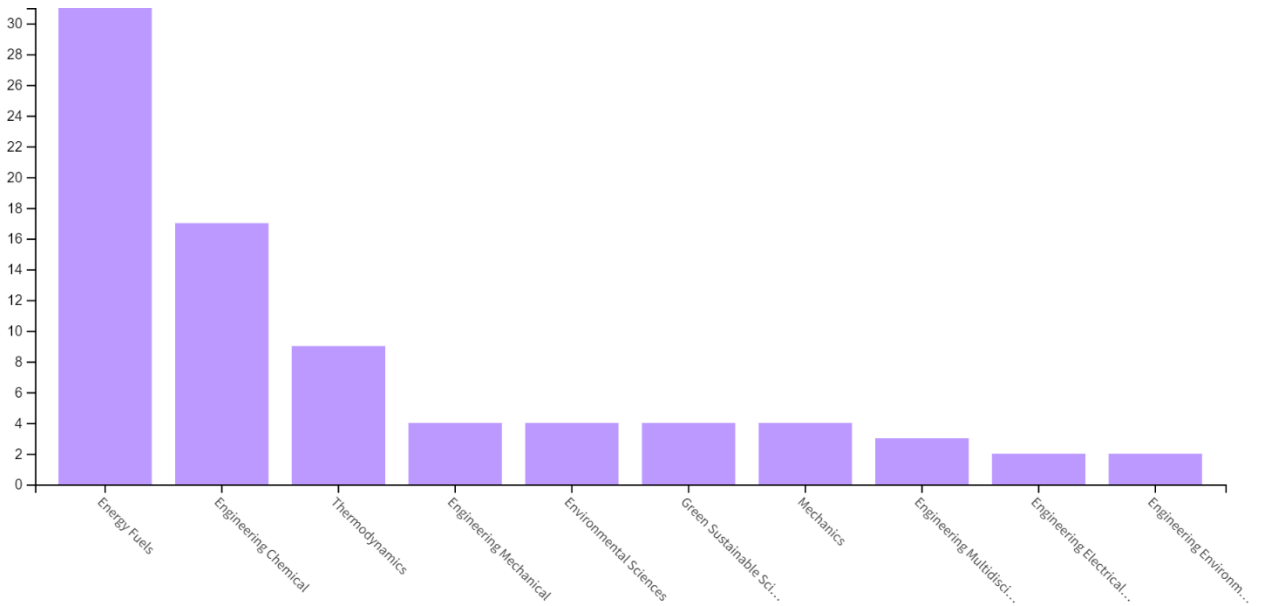


Figura 14: Gráfico Publicações x Área de Interesse. Fonte: Web of Science

## 4.2. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As simulações foram feitas de maneira separada. O tempo decorrido para a simulação exemplo fornecida pelo ANSYS foi de, aproximadamente, 8 horas 40 minutos. Já o tempo



decorrido da simulação biogás/biodiesel foi de aproximadamente 13 horas. A diferença entre ambas se deu pela quantidade maior de espécies dos modelos dos combustíveis usados.

Nas Figuras 15, 16, 17 e 18 nota-se que a pressão alcançada dentro do cilindro durante a combustão e o calor produzido pela simulação dos biocombustíveis demonstra uma perda de potência quando comparada com os combustíveis fósseis. Percebe-se que a diferença de pressão entre os dois casos já demonstra uma possível perda de potência no uso de biocombustíveis, com uma queda de 17% de calor produzido, quando comparados aos combustíveis fósseis. Pelo alto poder calorífico da gasolina, quando comparada ao biogás, já se esperava uma diferença, tendo em vista que estudos demonstram uma leve diferença entre biodiesel e diesel mineral (Zheng et al. 2007). Embora o biodiesel tenha mais oxigênio, não pode produzir mais energia do que o diesel. A taxa de liberação de calor não depende apenas de um fator, conteúdo de oxigênio, mas também depende do valor calorífico, da quantidade de ligações C-H e do calor latente de vaporização. O biodiesel tem, em geral, menos valor calorífico em comparação ao diesel, portanto, a taxa de liberação de calor do diesel é maior do que a do biodiesel, como também pôde ser visto nos combustíveis usados aqui.

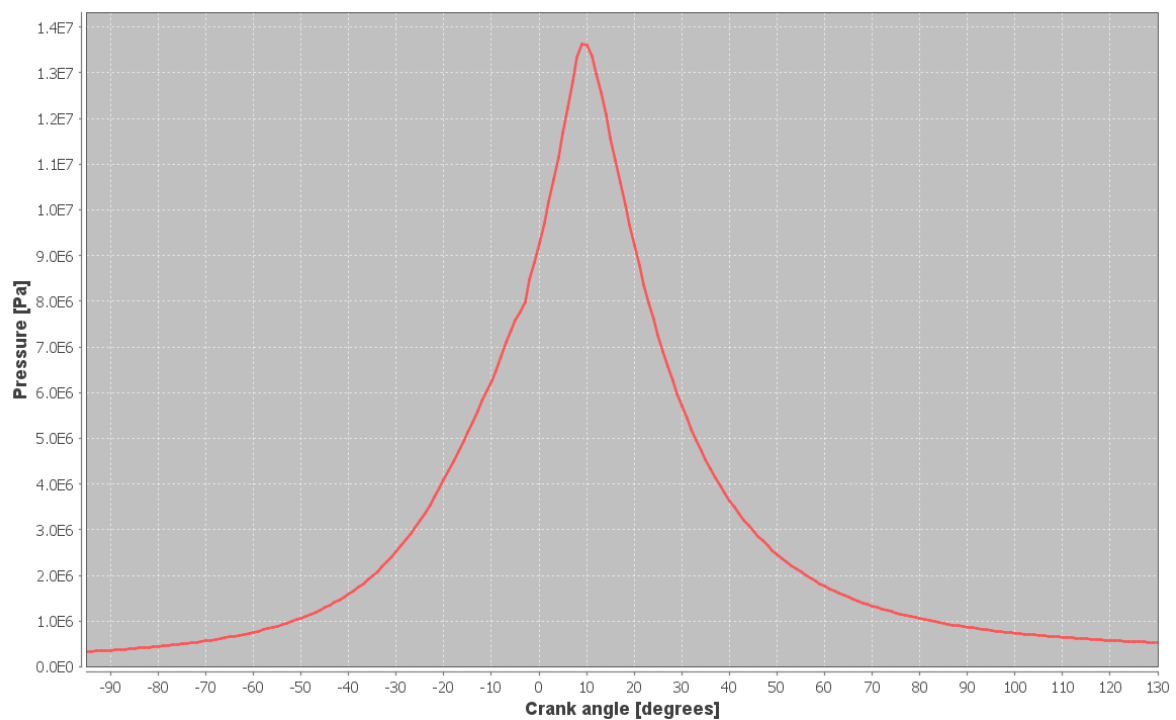


Figura 15: Pressão interna do cilindro gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor

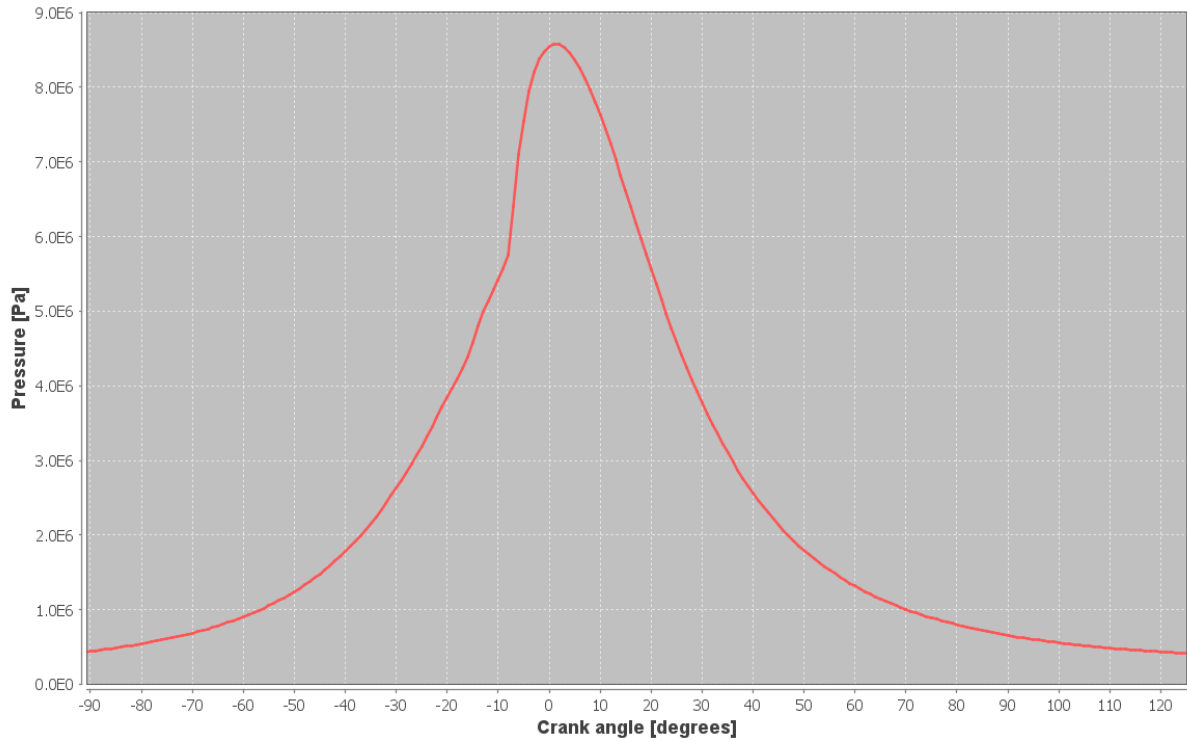


Figura 16 - Pressão interna do cilindro biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor

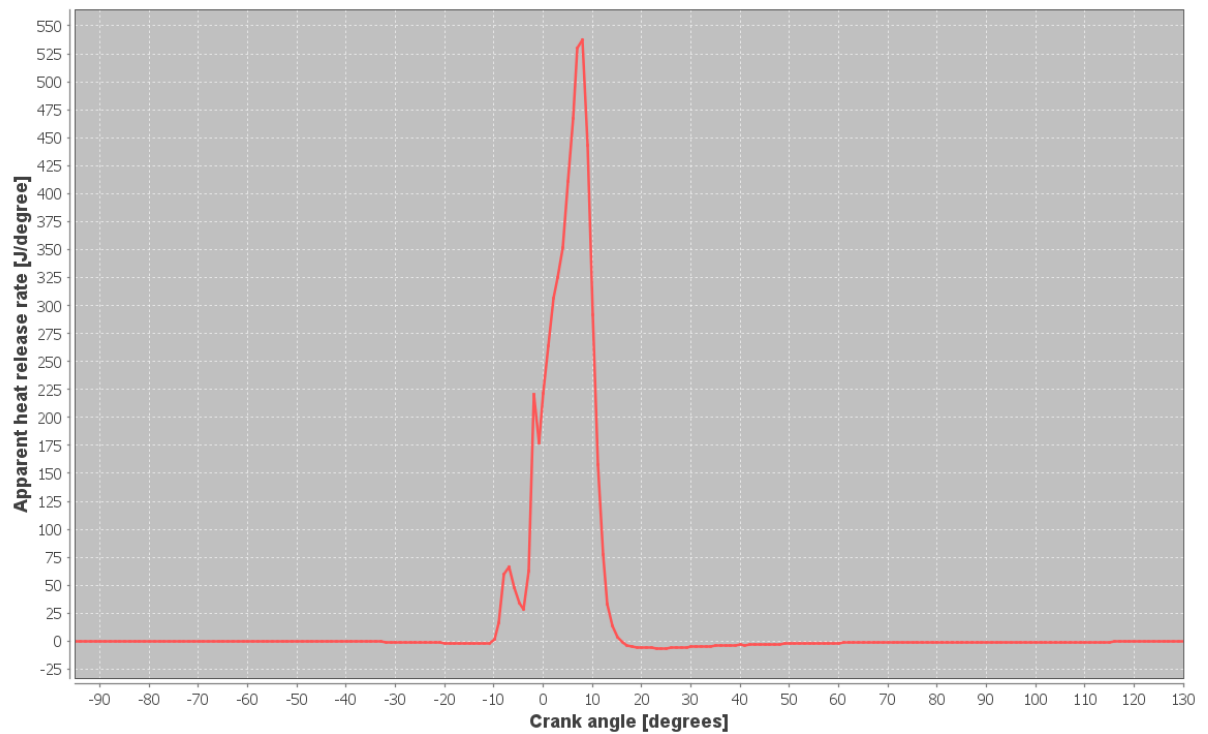


Figura 17: Calor produzido dentro do cilindro gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor



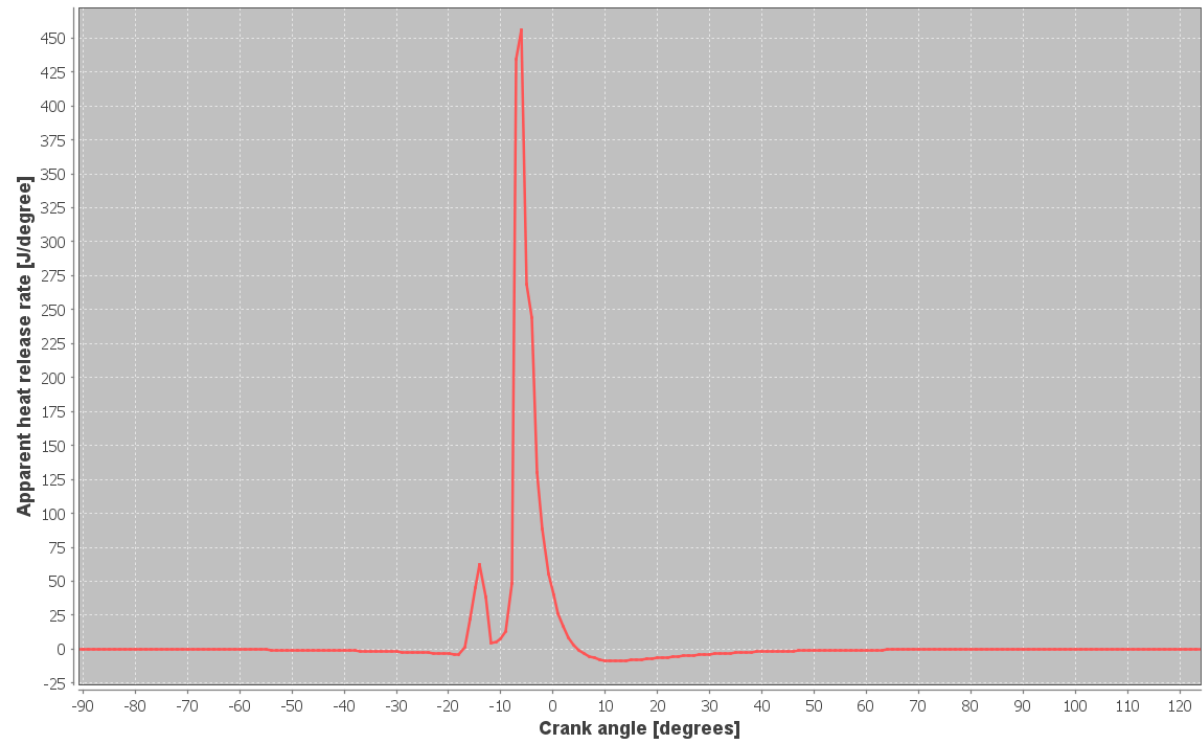


Figura 18: Calor produzido dentro do cilindro biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor

Já nas figuras 19 e 20, onde tem-se a temperatura máxima alcançada dentro do cilindro, a diferença de menos de 100K entre as simulações pode ser considerada como irrelevante.

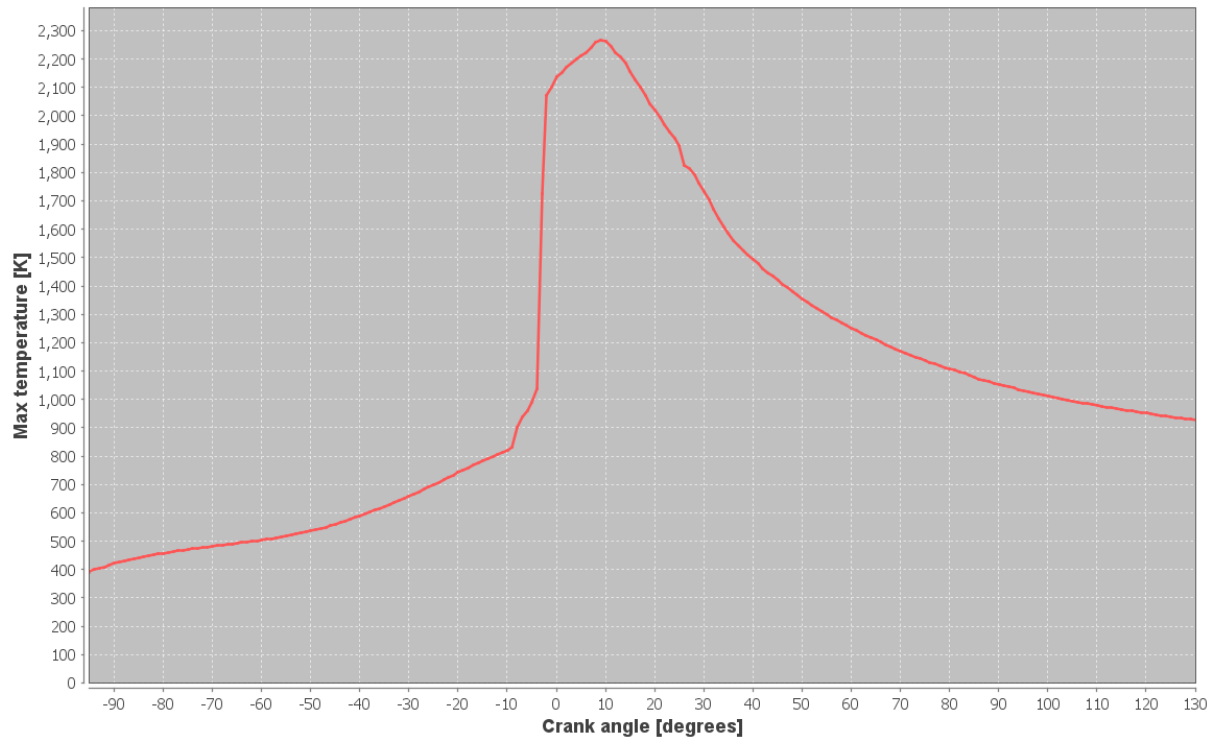


Figura 19: Temperatura máxima alcançada no cilindro gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor

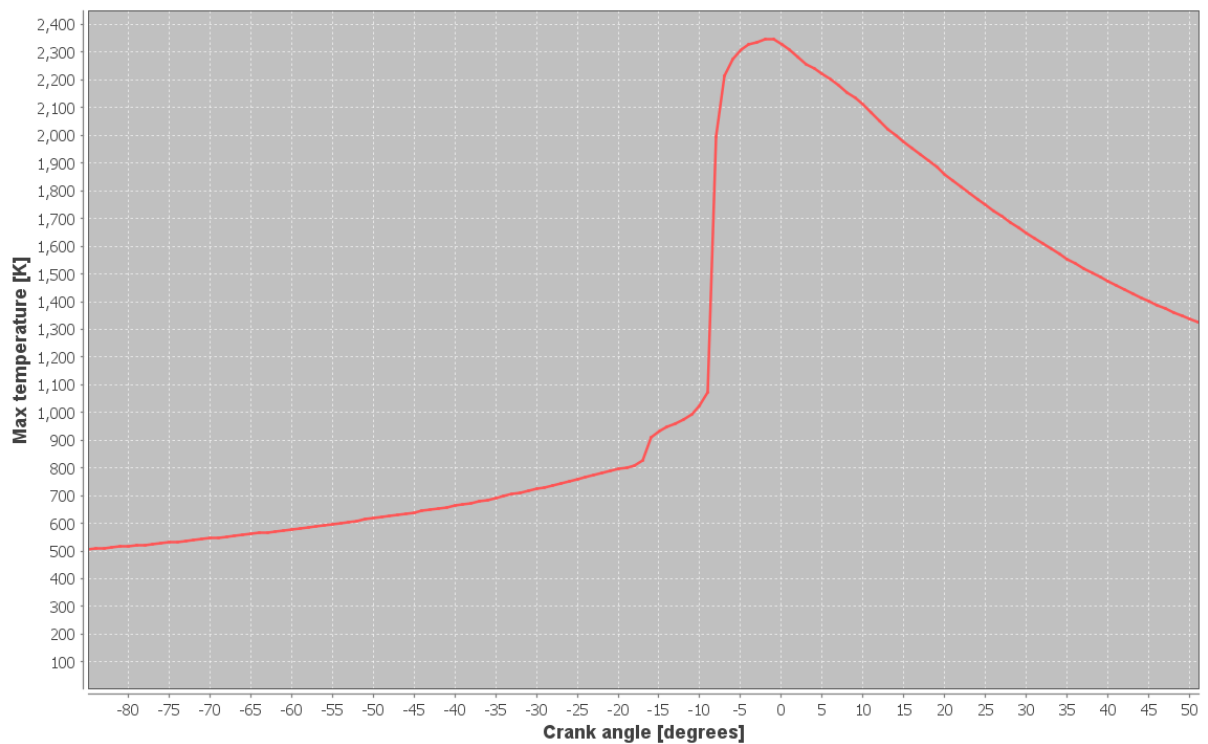


Figura 20: Temperatura máxima alcançada no cilindro biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor

No que se refere às emissões produzidas, observa-se nas figuras 21 e 22 a produção de NOx. Pelo resultado das simulações, pode-se perceber que o aumento na ordem de dez vezes de NOx

é preocupante, tendo em vista que de acordo com Zheng et al 2007 e Westbrook 2013, em uma comparação apenas entre diesel e biodiesel em um ciclo diesel comum, a diferença não é discrepante. Leva-se a entender que a mistura de biogás com biodiesel eleva consideravelmente o potencial de emissão desse poluente.

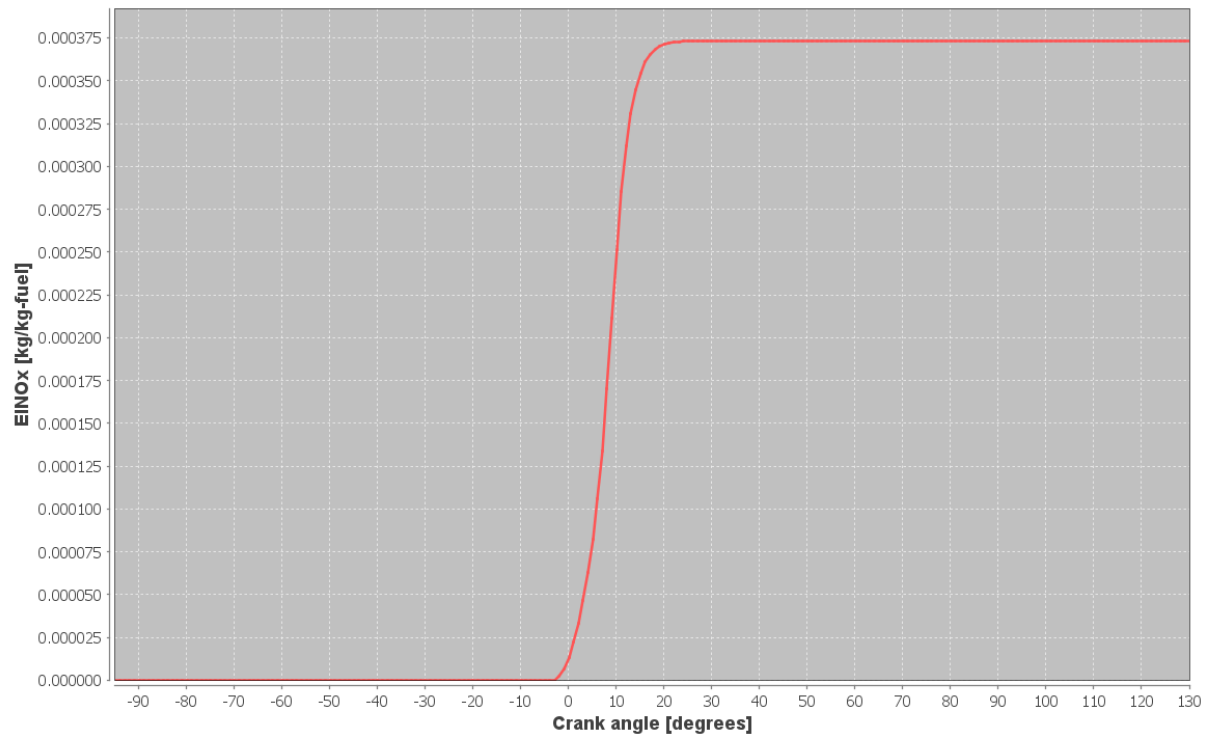


Figura 21: NOx produzido pela combustão gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor

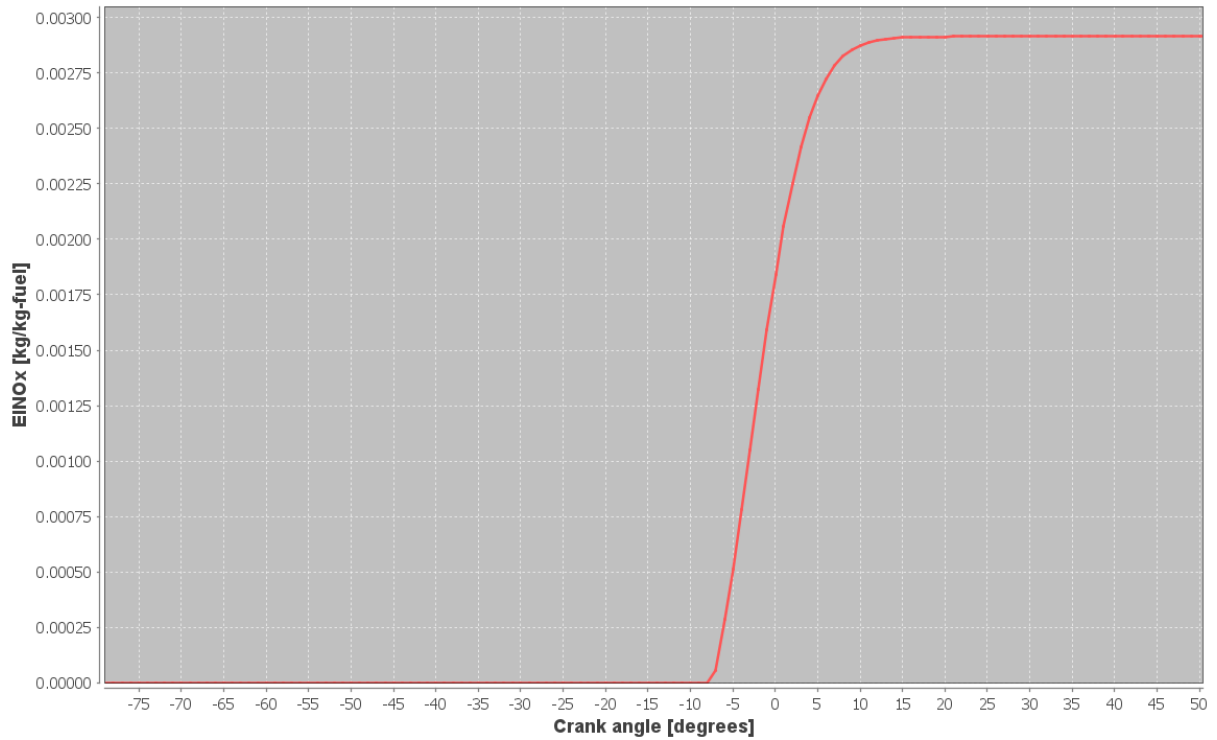


Figura 22: NOx produzido pela combustão biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor

Ao observarmos as figuras 23 e 24, podemos verificar que, apesar do aumento substancial de NOx no caso anterior, tivemos em contrapartida uma diminuição da produção de CO para a mistura dos biocombustíveis.

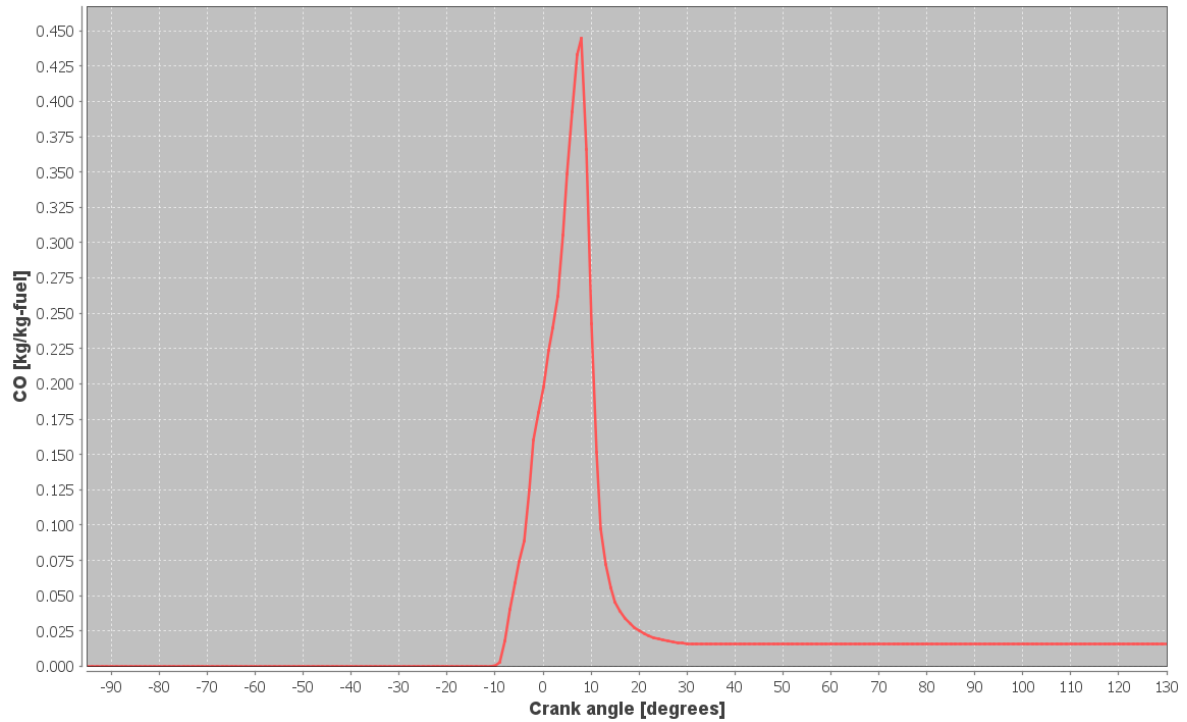


Figura 23: CO produzido pela combustão gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor

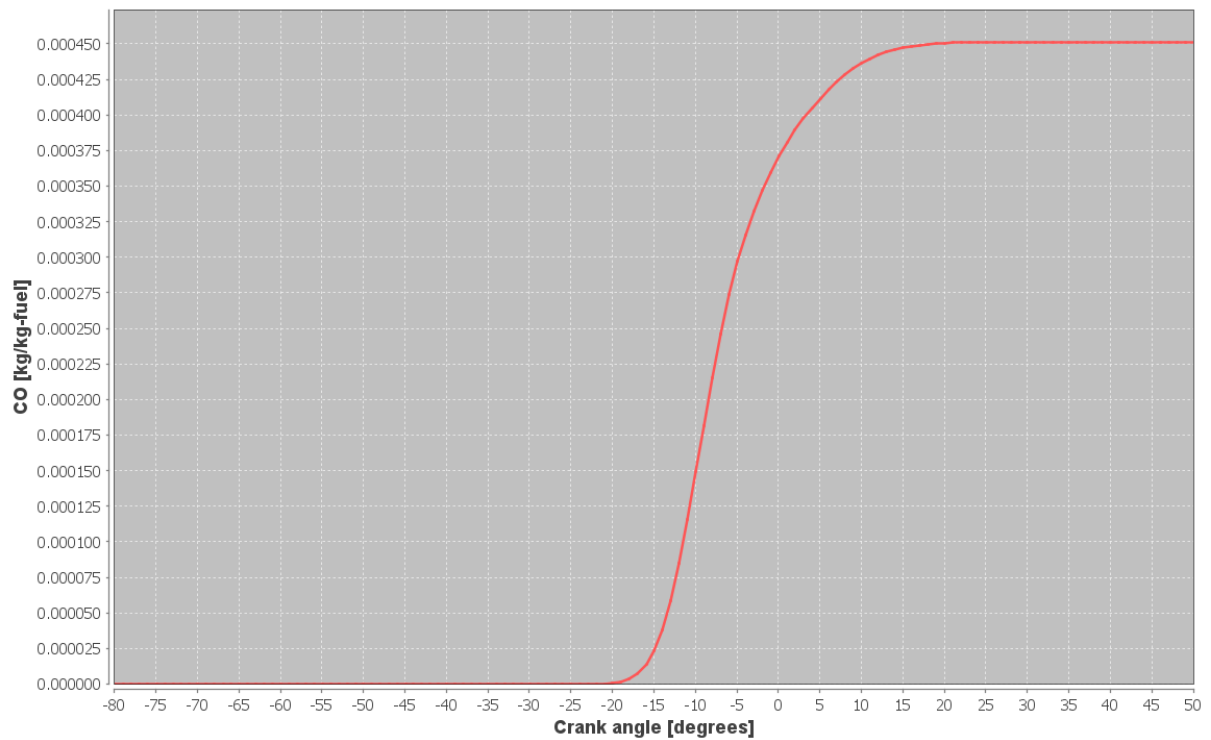


Figura 24: CO produzido pela combustão biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, finalmente nas figuras 25 e 26, nota-se o desenvolvimento e as características dos hidrocarbonetos não queimados mediante à combustão de gasolina/diesel e biogás/biodiesel. Temos aqui, portanto, um comportamento similar às emissões de CO vistas anteriormente com

uma queda na produção do poluente para mistura de biocombustíveis quando comparado com a simulação do caso envolvendo combustíveis fósseis.

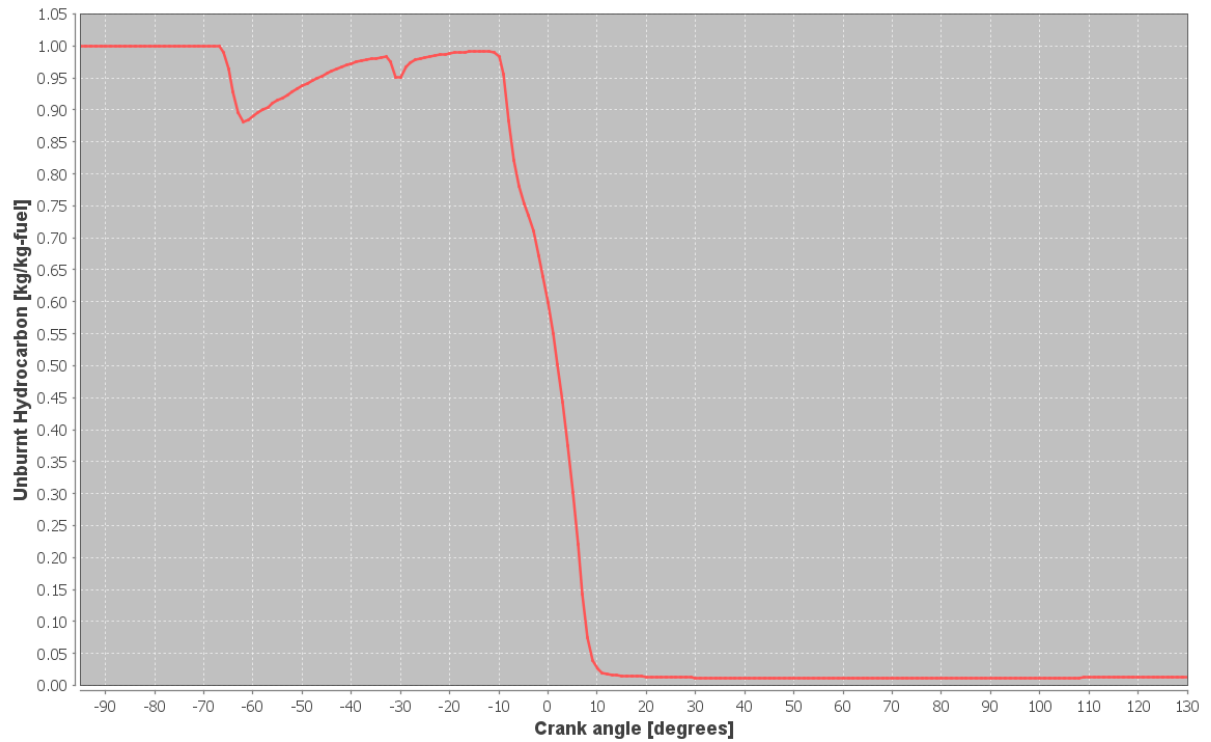


Figura 25: Hidrocarbonetos não queimados na combustão gasolina/diesel. Fonte: Elaborado pelo autor

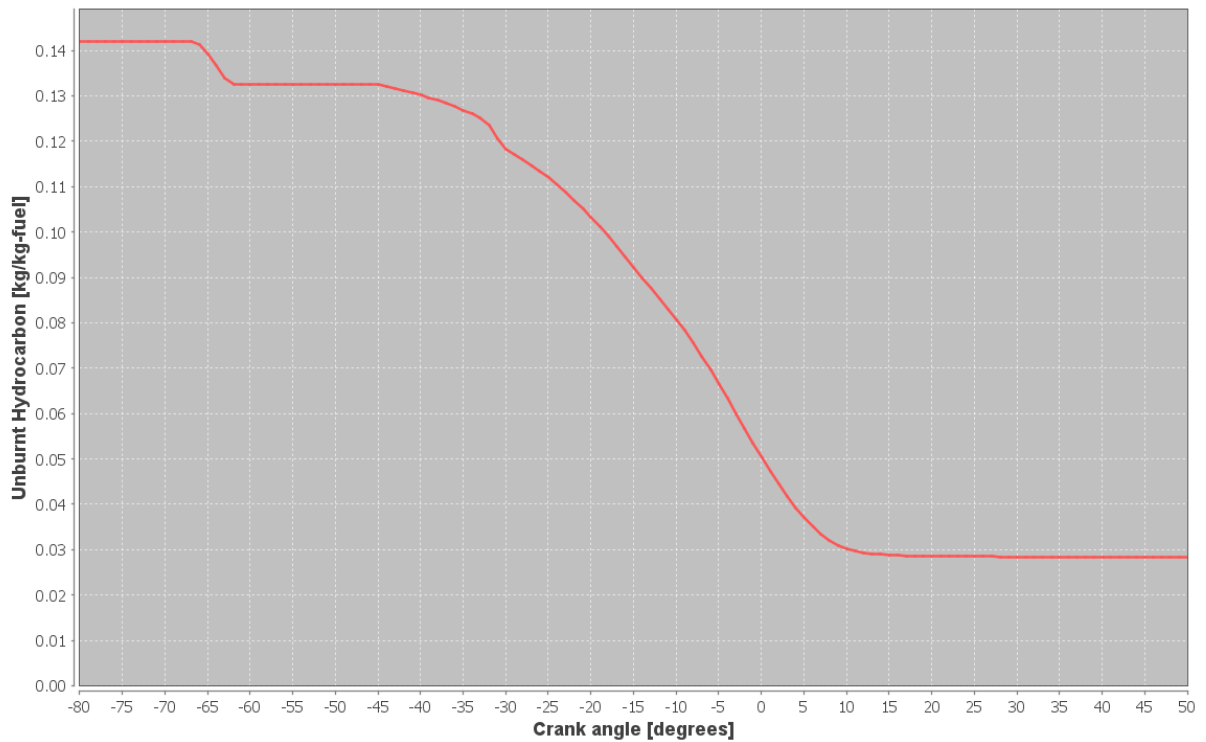


Figura 26 - Hidrocarbonetos não queimados na combustão biogás/biodiesel. Fonte: Elaborado pelo autor

## 5. CONCLUSÃO

O uso de ferramentas computacionais como CFD ajuda a dar uma perspectiva interessante sobre estudos que podem ser muito complexos quando desenvolvidos experimentalmente, já que podem demandar equipamentos e tecnologias majoritariamente caros e sem muita facilidade de acesso. A revisão sistemática através do método *PRISMA* mostrou que o interesse da comunidade científica no assunto estudado aqui vem crescendo e percebe-se uma evolução do tratamento dos dados, simulações feitas, ferramentas utilizadas e combustíveis estudados. O Brasil faz parte dessa comunidade, com legislação evoluindo no sentido do uso dos biocombustíveis, tratamento de sua qualidade e produção de artigos científicos que possam gerar valor na questão ambiental. Através das simulações numéricas e os módulos do software ANSYS, podemos alcançar resultados ideais para tais estudos complexos, onde o seu desenvolvimento e aprimoramentos aproximam-se cada vez mais de experimentos reais em laboratório, mesmo que ainda demandem muito poder computacional, logo, exigindo muito tempo a depender do equipamento disponível. Percebe-se que o estudo da utilização de biocombustíveis tem sido cada vez mais evidente pela sua importância no cenário mundial de enfrentamento ao aquecimento global. O que foi apresentado aqui demonstra a necessidade de um aprofundamento na parte experimental para corroborar com os resultados apresentados. Apesar das simulações serem cada vez mais seguras no sentido de precisão de dados, ainda é necessário validar os resultados na prática.

Avaliou-se que um motor dual movido a biocombustíveis tende a ser levemente menos potente que um motor dual movido a combustíveis fosseis. Porém, ao observar-se os níveis de emissões dos biocombustíveis simulados, pode-se justificar uma possível mudança de fonte de energia utilizada, como proposto anteriormente nesse mesmo estudo. No entanto, ainda seria necessário avaliar o impacto do aumento considerável de NO<sub>x</sub>, como verificado nos resultados da simulação, emitido no longo prazo em caso da sugerida mudança, balanceando com o ganho da diminuição de CO e hidrocarbonetos não queimados.

Sugere-se, portanto, para trabalhos futuros, um estudo mais aprofundado da combustão em motores em modo dual, com a utilização de simulações em CFD com modelos mais refinados, através de mais reações e espécies disponíveis, diferentes rotações do motor para avaliar a combustão em um veículo em movimento, modelagem para o cenário nacional e modelos experimentais para posterior validação dos resultados numéricos.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Resolução ANP No 8/2015
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Resolução ANP No 16/2008
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Resolução ANP No 45/2015
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Resolução ANP No 50/2013
- Poluentes. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em 22/06/2021
- Óleo diesel: informações técnicas. Petrobras. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/diesel-manual.pdf>. Acesso em: 13/05/2021
- Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2021. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 03/11/2021
- World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway – IRENA - <https://irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>. Acesso em: 03/11/2021
- ABREU, F.V., Avelino, M, 2012, Análise energética de eficiência do motor de combustão interna utilizando como combustível o biogás
- AN, H. et al. Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of a hydrogen assisted biodiesel combustion in a diesel engine. Fuel, v. 120, p. 186–194, 2014
- AZEVEDO, P.C., 2016, Estudo do atraso de ignição em motores utilizando biodiesel
- ÇENGEL, Y.A. Termodinâmica, 7 ed., 2013
- COSTA, R.B.R.D., 2017, Estudo experimental da tecnologia dual-fuel em motor de combustão interna utilizando biogás, gnv e etanol
- DEBEIR, J. C., DELÉAGE, J. P.; HÉMERY, D. Uma história da energia. Editora da Universidade de Brasília, 1993
- FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. Funcionamento do motor de combustão interna. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm> Acesso em: 17/05/2021
- GARCÍA, A. et al. Evaluating the emissions and performance of two dual-mode RCCI combustion strategies under the World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC). Energy Conversion and Management, v. 149, p. 263–274, 2017
- GHAZAL, Osama H. Reducing Diesel Engine Emission using Reactivity Controlled Approach. Journal of Ecological Engineering, [s. l.], 1 Jan. 2018. DOI <https://doi.org/10.12911/22998993/79415>. Disponível em: <http://www.jeeng.net/Reducing-Diesel-Engine-Emission-Using-Reactivity-Controlled-Approach,79415,0,2.html>. Acesso em: 2 ago. 2021.



GUERRA, Pedro H. L. Como funciona o motor 4 tempos. Educação Automotiva. 06/07/2017. Disponível em: <https://educacaoautomotiva.com/2017/07/06/motor-4-tempos-como-funciona/> Acesso em: 17/05/2021

GUPTA, T.; KHAN, M. E. Variation in ignition delay with changing the environment inside the combustion chamber for different sprays. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, v. 8, n. 10, p. 3346–3353, 2019.

HERBINET, Olivier et al. Detailed chemical kinetic mechanism for the oxidation of biodiesel fuels blend surrogate. *Combustion and Flame*, [s. l.], 22 out. 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.10.013>.

KAPLAN, Mahmut. “Influence of swirl, tumble and squish flows on combustion characteristics and emissions in internal combustion engine-review.” *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 2019

KONGRE, U. V.; Sunnapwar, V. K. CFD modeling and experimental validation of combustion in direct ignition engine fueled with Diesel. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2010

LEITE NETO, A.V., 2016, Análise numérica da combustão de biocombustíveis em motor alternativo de ciclo diesel

LI, Y. et al. A numerical investigation on methane combustion and emissions from a natural gas-diesel dual fuel engine using CFD model. *Applied Energy*, v. 205, n. July, p. 153–162, 2017

LIU, H. et al. Experimental and simulation investigation of the combustion characteristics and emissions using n-butanol/biodiesel dual-fuel injection on a diesel engine. *Energy*, v. 74, n. C, p. 741–752, 2014

LIU, J. et al. Numerical study of hydrogen addition to DME/CH<sub>4</sub> dual fuel RCCI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 10, p. 8688–8697, 2012

MIKULSKI, M.; WIERZBICKI, S. Numerical investigation of the impact of gas composition on the combustion process in a dual-fuel compression-ignition engine. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 31, p. 525–537, 2016

PICKETT, L. M. et al. Comparison of diesel spray combustion in different high-temperature, high-pressure facilities. **SAE Technical Papers**, p. 156–181, 2010.

PUDUPPAKKAM, Karthik V. et al. Use of Detailed Kinetics and Advanced Chemistry-Solution Techniques in CFD to Investigate Dual-Fuel Engine Concepts, *SAE International Journal of Engines*, Vol. 4, No. 1, pp. 1127-1149, 2011.

RAHMAN, K. A.; RAMESH, A. Studies on the effects of methane fraction and injection strategies in a biogas diesel common rail dual fuel engine. *Fuel*, v. 236, n. March 2018, p. 147–165, 2019.

ROCHA, D.S. Análise do desempenho de um motor diesel turboalimentado operando com mistura diesel-biodiesel. *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. 2010

SOUZA, José, Lima, Heleno, Schaeffer, Lirio, 2013, Desenvolvimento de tecnologia para utilização de biogás e biodiesel em motor de ciclo diesel

SOUZA JUNIOR, 2009, Simulação termodinâmica de motores diesel utilizando óleo diesel e biodiesel para verificação dos parâmetros de desempenho e emissões.

TAMILSELVAN, P. et al. A comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 nov. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.176>.

TIPPAYAWONG, N. et al. Long-term operation of a small biogas/diesel dual-fuel engine for on-farm electricity generation. *BIOSYSTEMS ENGINEERING*, [s. l.], 17 ago. 2007. DOI <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2007.06.013>. Disponível em: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110). Acesso em: 31 ago. 2021.

WESTBROOK, Charles K. "Biofuels combustion\*". United States. 4 abril 2013. DOI <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040412-110009>.

YOUSEFI, A.; BIROUK, M. Investigation of natural gas energy fraction and injection timing on the performance and emissions of a dual-fuel engine with pre-combustion chamber under low engine load. *Applied Energy*, v. 189, n. x, p. 492–505, 2017.

ZHAO, F. et al. Numerical modelling of soot formation and oxidation using phenomenological soot modelling approach in a dual-fueled compression ignition engine. *Fuel*, v. 188, p. 382–389, 2017.

ZHENG, Ming et al. Biodiesel engine performance and emissions in low temperature combustion. *ScienceDirect*, Windsor, Canadá, 18 maio 2007. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.039>.

ZHOU, D. Z. et al. A numerical study on RCCI engine fueled by biodiesel/methanol. *Energy Conversion and Management*, v. 89, p. 798–807, 2015.

**ANEXO I**  
**TABELA DE ESPECIFICAÇÕES DO ÓLEO DIESEL DE USO RODOVIÁRIO PELA**  
**RESOLUÇÃO ANP Nº 50/2013**

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDAD E	LIMITE		MÉTODO	
		TIPO A e B		ABNT NBR	ASTM/EN
		S10	S500		
Aspecto (2) (22) (23)		Límpido e isento de impurezas		14954	D4176
Cor		(3)	Vermelho (4)		
Cor ASTM, máx. (5)		3,0		14483	D1500 D6045
Teor de biodiesel (6)	% volume	(7)		15568	EN 14078
Enxofre total, máx. (21)	mg/kg	10,0 (8)			D2622D5453D7039D7212 (9)D7220
			500	14533 (9)	D2622D4294 (9)D5453D7039D7220
Destilação					
10% vol, recuperados, mín.	°C	180,0	Anotar	9619	D86
50% vol, recuperados		245,0 a 295,0	245,0 a 310,0		
85% vol, recuperados, máx.			360,0		
90% vol, recuperados			Anotar		
95% vol, recuperados, máx		370,0			

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDAD E	LIMITE		MÉTODO	
		TIPO A e B		ABNT NBR	ASTM/EN
		S10	S500		
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	815,0 a 850,0 (10)	815,0 a 865,0	714814 065	D1298D4052
Ponto de fulgor, mín.	°C	38,0		797414 598	D56D93D3828D7094
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0 a 4,5	2,0 a 5,0	10441	D445
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(11)		14747	D6371
Número de cetano, mín. ou Número de cetano derivado (NCD), mín.		48	42 (12)		D613D6890D7170
Resíduo de carbono Ramsbot-tom no resíduo dos 10% finais da destilação, máx.	% massa	0,25		14318	D524
Cinzas, máx.	% massa	0,010		9842	D482
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx		1		14359	D130
Teor de Água (13), máx.	mg/kg	200	500		D6304EN ISO 12937
Contaminação total (14), máx.	mg/kg	24			EN 12662
Água e sedimentos, máx. (14)	% volume		0,05		D2709

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO	
		TIPO A e B		ABNT NBR	ASTM/EN
		S10	S500		
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (9) (15), máx.	% massa	11			D5186D6591EN 12916
Estabilidade à oxidação (15), máx.	mg/100mL	2,5			D2274 (17)D5304 (17)
Índice de Acidez (24)	mg KOH/g	Anotar		14248	D664D974
Lubricidade, máx.	µm	(18)			ISO 12156D6079
Condutividade elétrica, mín. (19)	pS/m	25	25 (20)		D2624D4308

Observações:

- (1) Poderão ser incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para óleo diesel obtido de processo diverso de refino e processamento de gás natural ou a partir de matéria prima distinta do petróleo.
- (2) Deverá ser aplicado o procedimento 1 para cada método.
- (3) Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.
- (4) O corante vermelho, especificado conforme a Tabela III, deverá ser adicionado no teor de 20 mg/L de acordo com o artigo 12.
- (5) Limite requerido antes da adição do corante.
- (6) Aplicável apenas para o óleo diesel B.
- (7) No percentual estabelecido pela legislação vigente. Será admitida variação de  $\pm 0,5$  % volume. A norma EN 14078 é de referência em caso de disputa para a determinação do teor de biodiesel no óleo diesel B.

- (8) Para efeito de fiscalização nas autuações por não conformidade, será admitida variação de +5 mg/kg no limite da característica teor de enxofre do óleo diesel B S10, nos segmentos de distribuição e revenda de combustíveis.
- (9) Aplicável apenas para óleo diesel A.
- (10) Será admitida a faixa de 815 a 853 kg/m<sup>3</sup> para o óleo diesel B.
- (11) Limites conforme Tabela II.
- (12) Para o óleo diesel A, alternativamente, fica permitida a determinação do índice de cetano calculado pelo método ASTM D4737, quando o produto não contiver aditivo melhorador de cetano, com limite mínimo de 45. No caso de o resultado ser inferior a 45, o ensaio de número de cetano deverá ser realizado. Quando for utilizado aditivo melhorador de cetano, esta informação deverá constar no Certificado da Qualidade. (Redação dada pela Resolução ANP nº 69/2014)
- (13) Aplicável na produção e na importação do óleo diesel A S10 e A S500 e a ambos os óleos diesel B na distribuição. (Redação dada pela Resolução ANP nº 69/2014)
- (14) Aplicável na importação, antes da liberação do produto para comercialização.
- (15) Os resultados da estabilidade à oxidação e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos poderão ser encaminhados ao distribuidor até 48 h após a comercialização do produto de modo a garantir o fluxo adequado do abastecimento. A partir de 1º de janeiro de 2015, o resultado do teor hidrocarbonetos policíclicos aromáticos deverão constar no Certificado da Qualidade no ato da comercialização do produto.
- (16) (Excluída pela Portaria ANP nº 69/2014)
- (17) Os métodos ASTM D2274 e D5304 aplicam-se apenas ao óleo diesel A.
- (18) Poderá ser determinada pelos métodos ISO 12156 ou ASTM D6079, sendo aplicáveis os limites de 460 µm e 520 µm, respectivamente. A medição da lubricidade deverá ser realizada em amostra com biodiesel, no teor estabelecido pela legislação vigente, em conformidade com o § 9º do Art. 9º
- (19) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo produtor, importador e distribuidor. Para o óleo diesel A S500 deverá ser informado no Certificado da Qualidade a concentração de aditivo antiestático adicionada.

(20) A condutividade elétrica será determinada em amostra composta constituída da mistura de aditivo antiestático mais corante com o produto a ser comercializado. O teor de corante nesta amostra deverá estar conforme o indicado na Tabela III.

(21) Em caso de disputa, a norma ASTM D5453 deverá ser utilizada. (Redação dada pela Resolução ANP nº 69/2014)

(22) Em caso de disputa, o produto será considerado como não especificado na característica Aspecto, caso ao menos um entre os parâmetros teor de água e água e sedimentos, para o óleo diesel S500, e um entre os parâmetros teor de água e contaminação total, para o óleo diesel S10, esteja não conforme. (Redação dada pela Resolução ANP nº 13/2015)

(23) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e água e sedimentos, para o óleo diesel S500, ou teor de água e contaminação total, para o óleo diesel S10. O produto será reprovado caso ao menos um desses parâmetros esteja fora de especificação. (Redação dada pela Resolução ANP nº 13/2015)

(24) Em caso de disputa, a norma ASTM D974 deverá ser utilizada. (Redação dada pela Resolução ANP nº 69/2014)

**ANEXO II**  
**TABELA DE ESPECIFICAÇÕES DO GÁS NATURAL VEÍCULAR PELA**  
**RESOLUÇÃO Nº 16/2008**

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE (2) (3)			MÉTODO		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO
Poder calorífico superior (4)	kJ/ m <sup>3</sup>	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976
	kWh/m <sup>3</sup>	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94				
Índice de Wobbe (5)	kJ/m <sup>3</sup>	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500		15213	-	6976
Número de metano, mín. (6)		anotar (3)	65				15403
Metano, min.	% mol.	68,0	85,0		14903	1945	6974
Etano, máx.	% mol.	12,0	12,0		14903	1945	6974
Propano, máx.	% mol.	3,0	6,0		14903	1945	6974
Butanos e mais pesados, máx.	% mol.	1,5	3,0		14903	1945	6974
Oxigênio, máx. (7)	% mol.	0,8	0,5		14903	1945	6974
Inertes (N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> ), máx.	% mol.	18,0	8,0	6,0	14903	1945	6974
CO <sub>2</sub> , máx.	% mol.	3,0			14903	1945	6974
Enxofre Total, máx. (8)	mg/m <sup>3</sup>	70			-	5504	6326-3
							6326-5
							19739



CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE (2) (3)			MÉTODO		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO
<b>Gás Sulfídrico (H<sub>2</sub>S), máx.</b>	mg/m <sup>3</sup>	10	13	10	-	5504	6326-3
						6228	
<b>Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (9)</b>	°C	- 39	- 39	- 45	-	5454	6327
							10101-2
							10101-3
							11541
<b>Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 4,5 MPa, máx. (10)</b>	°C	15	15	0	-	-	6570
<b>Merúrio, máx. (11)</b>	µg/m <sup>3</sup>	anotar			-	-	6978-1
							6978-2

Observações:

- (1) O gás natural não deve conter traços visíveis de partículas sólidas ou líquidas.
- (2) Os limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água.
- (3) A aplicação veicular do gás natural de Urucu se destina exclusivamente a veículos dotados de motores ou sistemas de conversão de gás natural veicular que atendam à legislação ambiental específica. O revendedor deverá afixar em local visível de seu estabelecimento comercial o seguinte aviso: "GÁS NATURAL VEICULAR DE URUCU - EXCLUSIVO PARA VEÍCULOS ADAPTADOS AO SEU USO". (Redação dada pela Resolução ANP nº 7/2010)

(4) O poder calorífico de referência de substância pura empregado neste Regulamento Técnico encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.

(5) O índice de Wobbe é calculado empregando o poder calorífico superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do poder calorífico superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado de acordo com a seguinte fórmula:

$$IW = Pcs / \sqrt{d}$$

onde: IW - índice de Wobbe

PCS - poder calorífico superior

d - Densidade relativa

(6) O número de metano deverá ser calculado de acordo com a última versão da norma ISO 15403-1. Na versão ISO 15403-1:2006(E), considera-se o método GRI do Anexo D. Calcula-se inicialmente o Número de Octano Motor - MON a partir da equação linear empírica, função da composição dos componentes discriminados. Em seguida com o valor determinado para o MON calcula-se o número de metano ou NM a partir da correlação linear entre NM e MON. Tais equações vêm descritas abaixo:

$$MON = (137,78 x_{me \tan o}) + (29,948 x_{e \tan o}) + (-18,193 x_{propano}) + (-167,062 x_{bu \tan o}) + (181,233 x_{CO_2}) + (26,994 x_{N_2})$$

onde x é a fração molar dos componentes metano, etano, propano, butano, CO2 e N2.

$$NM = 1,445 x (MON) - 103,42$$

(7) Caso seja usado o método da norma ISO 6974, parte 5, o resultado da característica teor de oxigênio deverá ser preenchido com um traço (-).

(8) É o somatório dos compostos de enxofre presentes no gás natural. Admite-se o limite máximo de 150 mg/m<sup>3</sup> para o gás a ser introduzido no início da operação de redes novas ou então a trechos que em razão de manutenção venham a apresentar rápido decaimento no teor de odorante no início da retomada da operação.

(9) Caso a determinação seja em teor de água, a mesma deve ser convertida para (°C) conforme correlação da ISO 18453. Quando os pontos de recepção e de entrega estiverem em regiões distintas, observar o valor mais crítico dessa característica na especificação.

(10) Pode-se dispensar a determinação do ponto de orvalho de hidrocarbonetos - POH quando os teores de propano e de butanos e mais pesados forem ambos inferiores a 3 e 1,5 por cento molares respectivamente de acordo com o método NBR 14903 ou equivalente. Anotar nesse caso `passa` no referido campo. Se um dos limites for superado, analisar o gás natural por cromatografia estendida para calcular o ponto de temperatura cricondentherm - PTC (definida como a máxima temperatura do envelope de fases) por meio de equações de estado conforme o método ISO 23874. Caso o PTC seja inferior ao POH especificado em mais que 5°C, reportar o POH como sendo esse valor. Quando o PTC não atender a esse requisito, determinar o POH pelo método ISO 6570. O POH corresponde à acumulação de condensado de 10 miligramas por metro cúbico de gás admitido ao ensaio. Quando os pontos de recepção e entrega estiverem em regiões distintas, observar o valor mais crítico dessa característica na especificação.

(11) Aplicável ao gás natural importado exceto o gás natural liquefeito, determinado semestralmente. O carregador deverá disponibilizar o resultado para o distribuidor sempre que solicitado.

**ANEXO III**  
**TABELA DE ESPECIFICAÇÕES DO BIODIESEL PELA RESOLUÇÃO ANP Nº**  
**45/2015**

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
<b>Aspecto</b>	-	LII (1) (2)	-	-	-
<b>Massa específica a 20° C</b>	kg/m <sup>3</sup>	850 a 900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISO 12185
<b>Viscosidade Cinemática a 40°C</b>	mm <sup>2</sup> /s	3,0 a 6,0	10441	445	EN ISO 3104
<b>Teor de água, máx.</b>	mg/kg	200,0 (3)	-	6304	EN ISO 12937
<b>Contaminação Total, máx. (13)</b>	mg/kg	24	15995		EN12662 (5)
<b>Ponto de fulgor, mín. (4)</b>	°C	100,0	14598	93	EN ISO 3679
<b>Teor de éster, mín</b>	% massa	96,5	15764	-	EN 14103 (5)
<b>Cinzas sulfatadas, máx. (6)</b>	% massa	0,020	6294	874	EN ISO 3987
<b>Enxofre total, máx.</b>	mg/kg	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
<b>Sódio + Potássio, máx.</b>	mg/kg	5	15554 15555 15553 15556	-	EN 14108 (5) EN 14109 (5) EN 14538 (5)
<b>Cálcio + Magnésio, máx.</b>	mg/kg	5	15553 15556	-	EN 14538 (5)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
<b>Fósforo, máx. (7)</b>	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107 (5) EN 16294 (5)
<b>Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx. (6)</b>	-	1	14359	130	EN ISO 2160
<b>Número Cetano (6)</b>	-	Anotar	-	613 6890 (8)	EN ISO 5165
<b>Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.</b>	°C	(9)	14747	6371	EN 116
<b>Índice de acidez, máx.</b>	mg KOH/g	0,50	14448 -	664 -	EN 14104 (5)
<b>Glicerol livre, máx.</b>	% massa	0,02	15771 15908 (5) -	6584 (5) -	EN 14105 (5) EN 14106 (5)
<b>Glicerol total, máx. (10)</b>	% massa	0,25	15344 15908 (5)	6584 (5) -	EN 14105 (5)
<b>Monoacilglicerol, máx.</b>	% massa	0,7	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
<b>Diacilglicerol, máx.</b>	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
<b>Triacilglicerol, máx.</b>	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
<b>Metanol e/ou Etanol, máx.</b>	% massa	0,20	15343	-	EN 14110 (5)
<b>Índice de Iodo</b>	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111 (5)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
<b>Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (11)</b>	h	12	-	-	EN 14112 (5) EN 15751 (5)

Nota:

- (1) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio. Em caso de disputa, o produto só poderá ser considerado como não especificado no Aspecto, caso os parâmetros teor de água e/ou contaminação total estejam não conformes.
- (2) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e contaminação total. O produto será reprovado caso pelo menos um desses dois últimos parâmetros esteja fora de especificação.
- (3) Para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade, será admitida variação de +50 mg/kg no limite do teor de água no biodiesel para o produtor e de +150 mg/kg para o distribuidor.
- (4) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.
- (5) Os métodos referenciados demandam validação para os materiais graxos não previstos no método e rota de produção etílica.
- (6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da Tabela de Especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados à ANP pelo Produtor de biodiesel, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de material graxo, o Produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de materiais graxos utilizados.
- (7) Em caso de disputa, deve ser utilizado o método EN 14107 como referência.
- (8) O método ASTM D6890 poderá ser utilizado como método alternativo para determinação do número de cetano.

- (9) Limites conforme Tabela II. Para os estados não contemplados na tabela o ponto de entupimento a frio permanecerá 19°C.
- (10) Poderá ser determinado pelos métodos ABNT NBR 15908, ABNT NBR 15344, ASTM D6584 ou EN14105, sendo aplicável o limite de 0,25% em massa. Para biodiesel oriundo de material graxo predominantemente láurico, deve ser utilizado método ABNT NBR 15908 ou ABNT NBR 15344, sendo aplicável o limite de 0,30% em massa.
- (11) O limite estabelecido deverá ser atendido em toda a cadeia de abastecimento do combustível.
- (12) A estabilidade à oxidação a 110°C terá seu limite mínimo de 8 horas, a partir de 1º de novembro de 2014. (Revogado pela Resolução ANP nº 798/2019)
- (13) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008) (Redação acrescida pela Resolução ANP nº 51/2015)

**ANEXO IV**  
**TABELA DE ESPECIFICAÇÕES DO BIOMETANO PELA RESOLUÇÃO ANP Nº**  
**8/2015**

Característica	Unidade	Limite (2)			Método		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO
<b>Poder Calorífico Superior</b>	kJ/m <sup>3</sup>	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976
	kWh/m <sup>3</sup>	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94				
<b>Índice de Wobbe</b>	kJ/m <sup>3</sup>	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500		15213		6976
<b>Metano, mín.</b>	% mol.	90,0	90,0		14903	1945	6974
<b>Etano (3)</b>	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974
<b>Propano (3)</b>	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974
<b>Butanos e mais pesados (3)</b>	% mol.	anotar	anotar		14903	1945	6974
<b>Oxigênio, máx.</b>	% mol.	0,8	0,8		14903	1945	6974
<b>CO<sub>2</sub>, máx.</b>	% mol.	3,0	3,0		14903	1945	6974



Característica	Unidade	Limite (2)			Método		
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO
<b>CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>, máx.</b>	% mol.	10			14903	1945	6974
<b>Enxofre Total, máx.(4,5)</b>	mg/m <sup>3</sup>	70			15631	5504	6326-3 6326-5 19739
<b>Gás Sulfídrico (H<sub>2</sub>S), máx.</b>	mg/m <sup>3</sup>	10			15631	4084 ? 07 4468 5504 6228	6326-3 19739
<b>Ponto de orvalho de água a 1atm, máx. (6)</b>	°C	- 39	- 39	- 45	15765	5454	6327 10101-2 10101-3 11541
<b>Ponto de orvalho de hidrocarbonetos (7, 8)</b>	°C	15	15	0	16338		23874

Observações:

- (1) O produtor deve instalar um filtro de 1,0  $\mu\text{m}$  para assegurar a remoção dos micro-organismos.
- (2) Os limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água.
- (3) A determinação somente deve ser realizada quando houver a adição de gás natural, GLP ou propano.
- (4) A odoração do Biometano quando necessária deverá atender a norma ABNT NBR 15616 e NBR 15614.
- (5) É o somatório dos compostos de enxofre presentes no Biometano.
- (6) Caso a determinação seja em teor de água, a mesma deve ser convertida para ponto de orvalho em (°C), conforme correlação da ISO 18453. Quando os pontos de recebimento e de entrega estiverem em regiões distintas, observar o valor mais crítico dessa característica na especificação.
- (7) O ponto de orvalho de hidrocarbonetos só precisa ser analisado quando houver adição de propano ou GLP, devendo a medição para fins do certificado de qualidade ser feita em linha após o enriquecimento do gás. O ponto cricondentherm da mistura deve ser calculado por meio de equação de estado com base nas composições obtidas nas cromatografias convencional e estendida, reportando o valor encontrado como ponto de orvalho de hidrocarbonetos. Caso a presença de hexanos e mais pesados não tenha sido detectada na cromatografia convencional, fica dispensada a necessidade de se realizar a cromatografia estendida.
- (8) Fica dispensada a análise do ponto de orvalho de hidrocarbonetos para o caso do enriquecimento com gás natural. (Redação dada pela Resolução ANP nº 685/2017)