

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR BIODIESEL NO  
PROCESSO DE COMBUSTÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**

**EDUARDO SANT'ANA DE MENEZES**

**Orientador: Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA**

**Monografia apresentada a Faculdade de  
Engenharia Mecânica da Unirv –  
Universidade de Rio Verde – Como parte das  
exigências para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.**

**RIO VERDE – GOIÁS**

**2015**

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR BIODIESEL NO  
PROCESSO DE COMBUSTÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**

**EDUARDO SANT'ANA DE MENEZES**

**Orientador: Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA**

**Monografia apresentada a Faculdade de  
Engenharia Mecânica da Unirv –  
Universidade de Rio Verde – Como parte das  
exigências para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.**

**RIO VERDE – GOIÁS**

**2015**

Menezes, Eduardo Sant'ana

Análise Energética da Substituição de Diesel por Biodiesel no  
Processo de Combustão de Motores de Ignição por Compressão / por  
Eduardo Sant'ana de Menezes - Rio Verde, Goiás: 2015.

50 f.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica)  
apresentada à Universidade de Rio Verde – UniRV, Faculdade de  
Engenharia Mecânica, 2015.

Orientador: Paulo Henrique Neves Pimenta

1. Desempenho Energético. 2. Diesel. 3. Biodiesel.



**UNIVERSIDADE DE RIO VERDE**

CRENCIADA PELO DECRETO Nº 5.971 DE 02 DE JULHO DE 2004

Fazenda Fontes do Saber  
Campus Universitário  
Rio Verde - Goiás

Cx. Postal 104 - CEP 75901-970  
CNPJ 01.815.216/0001-78  
I. E. 10.210.819-6 / I.M. 021.407

Fone (64) 3620-220  
e-mail fesurv@fesurv.br  
www.fesurv.br

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** ANÁLISE ENERGÉTICA DA SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR BIODIESEL NO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

**AUTOR:** EDUARDO SANT'ANA DE MENEZES

**ORIENTADOR:** Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA

Esta monografia foi julgada adequada para obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA e aprovada em sua forma final.

Prof. PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA

Prof. RODRIGO FRANCISCO BORGES LOURENÇO

Prof. Me. JOÃO PIRES DE MORAES

Prof. Dr. WARLEY AUGUSTO PEREIRA  
Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica

RIO VERDE – GO

2015

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta monografia a minha mãe, Luiza Sant'ana Cruvinel Menezes, a minha irmã, Edilaine Sant'ana de Menezes, a minha avó, Jeronima Sant'ana Cruvinel de Oliveira, que sempre estiveram comigo, me dando força e confiança para buscar meus sonhos, não me deixando faltar nada, incluindo o mais importante, amor e atenção.

E por fim dedico ao meu pai, Jose Eustáquio de Menezes (In memoriam), que apesar de não estar mais entre nós, nunca será esquecido por sua importância em minha vida e formação pessoal.

Vocês são a minha essência. Estarão sempre em meu coração!

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus, por me conceder a oportunidade de vir a esse mundo e demonstrar minha capacidade.

Ao meu orientador Paulo Henrique Neves Pimenta, pelo seu apoio e contribuição para construção desse trabalho. Agradeço pela atenção e por compartilhar seus conhecimentos para que eu pudesse concluir esta monografia com maior êxito.

A minha namorada, Suzany Gonçalves Silva, que mais do que estar ao meu lado sempre me ofereceu sua amizade, amor e cumplicidade, nunca me deixando desanimar, me tornando cada vez mais forte e confiante para continuar.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Rio Verde, que dividiram seus conhecimentos durante estes cinco anos, dispondo de seu tempo e atenção.

Agradeço também aos meus colegas e gestores de estágio, pela experiência dividida, onde eu pude crescer bastante tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

Aos meus grandes amigos, que fazem valer o significado da palavra Amizade estando comigo em todos os momentos fossem eles bons ou ruins.

A todos que, direta ou indiretamente, me apoiaram nesse período de formação acadêmica. Obrigado.

## RESUMO

MENEZES, E. S. **ANÁLISE ENERGÉTICA DA SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR BIODIESEL NO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO**. 2015. 50f. Monografia<sup>1</sup> (Graduação em Engenharia Mecânica) – UniRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2015.

A crise mundial de petróleo e a crescente preocupação com o meio ambiente vêm aumentando o interesse mundial em fontes de combustíveis renováveis. Dentre as fontes renováveis, destaca-se o Biodiesel, o qual pode ser obtido através de diversas matérias-primas e que ocupa posição de destaque nas discussões energéticas e ambientais atuais. No entanto, a utilização desse tipo de combustível em motores diesel, sem muitas alterações nas características do mesmo tem sido o grande impasse na utilização do Biodiesel em substituição do diesel. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho energético do processo de combustão utilizando-se biodiesel de soja puro ao invés de diesel em um motor diesel por meio de simulação, mostrando um modelo comparativo das vantagens e desvantagens da utilização desses dois combustíveis. Comparando o desempenho energético dos dois combustíveis em um motor com processo de ignição por compressão variando porcentagem de excesso de ar na combustão e temperatura de entrada dos combustíveis através de simulação, verificou-se um desempenho médio 22% maior do que o diesel em relação ao biodiesel. Notou-se que com o aumento de excesso de ar na combustão essa diferença fica menor, e quanto maior a temperatura de entrada do combustível, maior a diferença entre o calor liberado pelo diesel e pelo biodiesel. Conclui-se que o motor é mais eficiente quando abastecido com diesel e conseqüentemente produz maior potência, sendo economicamente mais viável.

## PALAVRAS-CHAVE

Desempenho energético, biodiesel, diesel.

---

<sup>1</sup> **Orientador:** Prof. Paulo Henrique Neves Pimenta; Prof. João Pires de Moraes; Prof. Rodrigo Francisco Borges Lourenço.

## ABSTRACT

MENEZES, E. S. **ENERGY ANALYSIS OF THE DIESEL REPLACEMENT FOR BIODIESEL IN THE PROCESS ENGINES IGNITION COMBUSTION FOR COMPRESSION.** 2015. 541f. Monograph<sup>2</sup> (Degree in Mechanical Engineering) – UniRV – Rio Verde College, Rio Verde, 2015.

The world oil crisis and the growing concern over the environment have increased worldwide interest in renewable fuel sources. Among the renewable sources, it highlights the Biodiesel, which can be obtained from various raw materials and occupies a prominent position in today's energy and environmental discussions. However, the use of this type of fuel in Diesel engines, without many changes in the same characteristics has been the extensive use of biodiesel in the standoff instead of diesel. Therefore, this study aims to evaluate the energy performance of the combustion process using pure soy's biodiesel instead of diesel in a diesel engine by simulation, showing a comparative model of the advantages and disadvantages of using these two fuels. Comparing the energy performance of the two fuels in an engine with compression ignition process of varying percentage of excess air and combustion fuel inlet temperature through simulation, there is an average performance 22% higher than diesel in relation to biodiesel. It was noted that the increase of air's excess in the combustion this difference is smaller, and the higher fuel inlet temperature, the greater the difference between the heat released by diesel and biodiesel. It follows that the engine is more efficient to supply diesel and consequently produces higher power, being economically more feasible.

## KEY-WORDS

Energy performance, biodiesel, diesel

---

<sup>2</sup> **Orientador:** Prof. Paulo Henrique Neves Pimenta; Prof. João Pires de Moraes; Prof. Rodrigo Francisco Borges Lourenço.



**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1	Desempenho de potência de um motor com óleo diesel e óleo bruto de girassol	18
FIGURA 2	Desempenho de consumo específico de um motor com óleo diesel e bruto de girassol	18
FIGURA 3	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão estequiométrico	34
FIGURA 4	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 10 % de excesso de ar.	34
FIGURA 5	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 20 % de excesso de ar.	35
FIGURA 6	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 30 % de excesso de ar.	35
FIGURA 7	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 40 % de excesso de ar.	36
FIGURA 8	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 50 % de excesso de ar.	36
FIGURA 9	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 60 % de excesso de ar.	37
FIGURA 10	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 70 % de excesso de ar.	37
FIGURA 11	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 80 % de excesso de ar.	38
FIGURA 12	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 90 % de excesso de ar.	38
FIGURA 13	Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 100 % de excesso de ar.	39

FIGURA 14 Comparação do Trabalho Específico para um Motor Operando a 41 Diesel e a Biodiesel com o Mesmo Rendimento.

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 1	Propriedades Físicas Químicas dos Elementos de Combustão	30
----------	--	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

<i>B0</i>	Combustível com 100% de óleo diesel
<i>B2</i>	Combustível com 2% de biodiesel e 98% de diesel
<i>B5</i>	Combustível com 5% de biodiesel e 95% de diesel
<i>B10</i>	Combustível com 10% de biodiesel e 90% de diesel
<i>B20</i>	Combustível com 20% de biodiesel e 80% de diesel
<i>B30</i>	Combustível com 30% de biodiesel e 70% de diesel
<i>B50</i>	Combustível com 50% de biodiesel e 50% de diesel
<i>B60</i>	Combustível com 60% de biodiesel e 40% de diesel
<i>B80</i>	Combustível com 80% de biodiesel e 20% de diesel
<i>B100</i>	Combustível com 100% de biodiesel
<i>OD</i>	Óleo diesel
<i>OBG</i>	Óleo bruto de girassol
<i>GEE</i>	Gases de efeito estufa
<i>OGR</i>	Óleo e gordura residual
<i>RPM</i>	Rotação por minuto
<i>BTEX</i>	Grupo de compostos formados por: benzeno, tolueno, etil-benzeno e os xilenos
$AC_{mássica}$	Relação ar-combustível na base mássica $\left[ \frac{Kg_{ar}}{Kg_{comb}} \right]$
$AC_{molar}$	Relação ar-combustível na base molar $\left[ \frac{Kmol_{ar}}{Kmol_{comb}} \right]$
$CA_{mássica}$	Relação combustível-ar na base mássica $\left[ \frac{Kg_{ar}}{Kg_{comb}} \right]$
$CA_{molar}$	Relação combustível-ar na base molar $\left[ \frac{Kmol_{ar}}{Kmol_{comb}} \right]$
<i>h</i>	Entalpia específica na base mássica $\left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$
$\bar{h}$	Entalpia específica na base molar $\left[ \frac{KJ}{Kmol} \right]$
$\bar{h}_f^0$	Entalpia específica de formação na base molar $\left[ \frac{KJ}{Kmol} \right]$
<i>H</i>	Entalpia [KJ]

$m$	Massa [Kg]
$M$	Peso molecular $\left[\frac{KJ}{Kmol}\right]$
$n$	numero de mols
$\phi$	Relação de equivalência
$Q_{v.c}$	Calor $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$
$\Delta$	Varição
$u$	Energia interna específica na base molar $\left[\frac{J}{Kg}\right]$
$\bar{u}$	Energia interna de combustão $\left[\frac{J}{Kg}\right]$
$W$	Trabalho [KJ]
$T$	Temperatura [K]
$V$	Volume [ $m^3$ ]

### Subscritos

V.C	Volume de controle
P	Produto
R	Reagente
e	Entrada
s	Saída
i	Inicial
comb	Combustível
ar	Ar

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Objetivo .....	15
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1.Estudos e ensaios em motores de combustão por compressão utilizando biodiesel.....	16
3.MATERIAS E MÉTODOS .....	22
3.1 Metodologia.....	22
3.2.Entalpia de formação .....	25
3.3.Primeira lei aplicada em sistemas reagentes.....	26
3.4.Energia interna de combustão e calor de reação.....	27
3.5.Potência de um motor a combustão .....	28
4.RESULTADOS .....	30
4.1.Modelo de aplicação .....	30
4.2.Análise da combustão diesel x biodiesel .....	33
5.CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43
ANEXO .....	45

## 1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis são potentes poluentes do meio ambiente. Dentre as fontes de energia utilizadas em todo mundo como energia nuclear, energias renováveis. A mais utilizada é a energia gerada a base de combustíveis fósseis, somando 85% de toda a energia do mundo (CARDOSO et al., 2006).

Por esses dados já podemos imaginar o quanto a queima de combustíveis fósseis é excessiva nos dias de hoje, causando 80% das emissões dos gases de efeito estufa. O que representa 9 bilhões de toneladas de carbono sendo jogados na atmosfera anualmente (CARDOSO et al., 2006).

Sendo assim o biodiesel torna-se uma importante alternativa de fonte de energia. O mesmo é considerado mais limpo, diminuindo significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a dependência do combustível fóssil (ABREU; OLIVEIRA; GUERRA, 2010).

O biodiesel possui atributos de vantagem sobre os combustíveis convencionais, como não ter presença de enxofre e aromáticos em sua composição, emite em menor quantidade partículas de HC, CO e  $CO_2$ , número elevado de cetano (hidrocarboneto parafínico), maior ponto de fulgor, além de sua fabricação ser feita de forma renovável. Outra característica importante é que o biodiesel estabelece um ciclo fechado de carbono, onde, quando a planta cresce e absorve o  $CO_2$ , e o mesmo é liberado quando a planta é queimada pela combustão (BARBOSA et al., 2008).

No entanto, a utilização deste tipo de combustível em motores diesel, sem muitas alterações em suas características gera desconfiças sobre seu desempenho e eficiência energética.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho energético do processo de combustão utilizando-se biodiesel de soja puro ao invés de diesel em um motor diesel por meio de simulação em cálculos. Mostrando um modelo comparativo das vantagens e desvantagens da utilização desses dois combustíveis.

Tal análise é feita por meio da comparação do calor de combustão do diesel e do biodiesel de soja puro, para diferentes condições de excesso de ar e temperatura de entrada na câmara de combustão.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é feita a revisão de alguns trabalhos de análise energética onde se é substituído o uso do tradicional diesel fóssil por biodiesel, na íntegra ou de forma parcial em motores de ignição por compressão.

### **2.1. Estudos e ensaios em motores de combustão por compressão utilizando biodiesel**

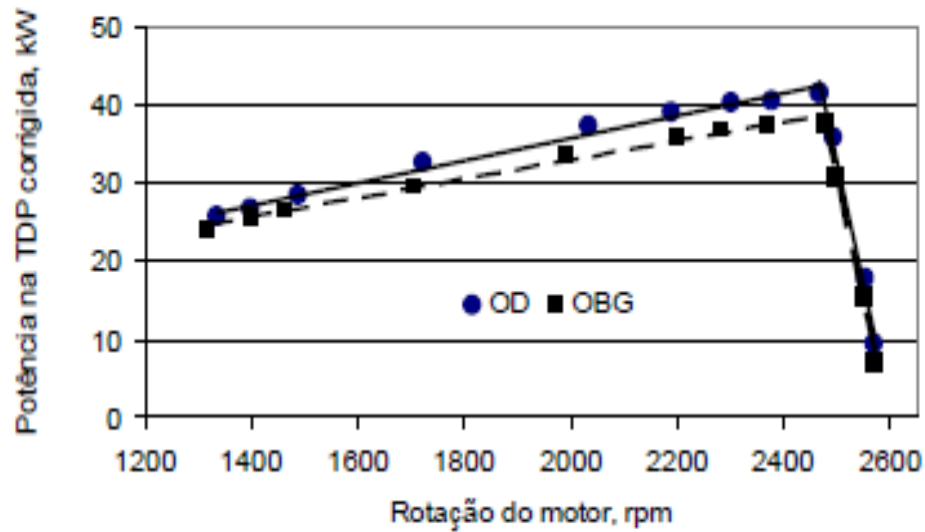
Devido o alto custo da energia em horários de pico, muitas empresas utilizam geradores movidos a diesel para substituir a energia fornecida pelas concessionárias neste horário. Segundo Carlo Castellanelli et al. (2007), através de avaliações de desempenho, comparando torque, potência e consumo específico de motores diesel, utilizando os combustíveis B0 (100% óleo diesel convencional), B20 (20% de Biodiesel de soja e 80% de diesel convencional) e B100 (100% de Biodiesel de soja) a geração própria de energia em horários de ponta é viável tanto utilizando o diesel convencional quanto o diesel B20, tendo assim uma redução nos impactos ambientais com relação a utilização do diesel convencional. A utilização do B100, apesar de economicamente não ser viável, é interessante considerá-la, visando uma menor emissão de poluentes gerada pelos motores, com relação à utilização dos combustíveis B0 e B20.

Nos dias de hoje se faz necessário à busca de energias alternativas visando substituir as energias hoje tradicionais, visando manutenção das mesmas e impactos ambientais. De acordo com Santos, Peixoto e Torres (2007), em um comparativo entre biodiesel de soja, biodiesel de óleos e gorduras residuais (OGR), e diesel fóssil realizado em um motor AGRALE-M789 medindo potência, emissão do motor e consumo gravimétrico, realizando análise de gases notou-se um aumento no consumo do biodiesel de OGR de 19,30 % e no biodiesel de soja 13,64 % com relação ao diesel fóssil, devido o biodiesel ter um poder calorífico menor. Nas análises de emissões de  $CO_2$  quase não houve diferenças. O Biodiesel de OGR teve um aumento de 56,24% de viscosidade frente ao diesel fóssil, já o biodiesel de soja

teve uma diminuição de 17,13% frente ao diesel fóssil. As diferenças das emissões de CO podem estar ligadas a viscosidade, no qual, no biodiesel de OGR é maior e no biodiesel de soja é menor com relação ao diesel fóssil. As análises mostram que o uso de biodiesel é viável e estes ganhos podem ser ainda maiores com a melhora químico-físico do biodiesel e até na parte estrutural do motor.

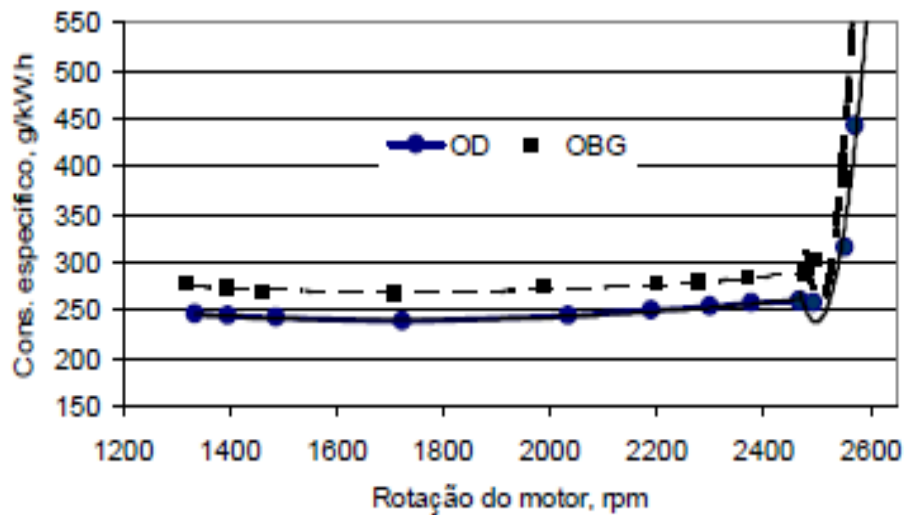
As substâncias contidas nas emissões vindas do diesel podem causar danos à saúde humana como no sistema imunológico, reprodutivo, respiratório, dentre outros. E algumas destas substâncias são os compostos de BTEX. Módulo et al. (2008), analisaram por cromatografia gasosa de BTEX em amostras de gases emitidos por um motor a combustão por compressão alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel com funcionamento de 30 horas, coletados por sacos Tedlar. Em comparativo entre o ensaio diesel e diesel-biodiesel (B10), houve uma redução na emissão de etilbenzeno e benzeno. Para o benzeno houve uma diminuição de até 24,5% da sua emissão, variando o momento de força. Também observou que há um aumento de todas as substâncias quando se aumento o momento de força devido a maior injeção de combustível. O estudo diz que há eficiência na utilização de biodiesel no diesel, diminuindo compostos no ambiente, que são prejudiciais a saúde.

Na busca por energias alternativas como o uso de óleos vegetais Maziero et al. (2007), realizaram ensaios em um motor MWM D229.3, injeção direta, 46 KW a 2450 RPM utilizando dinamômetro e sensores de temperatura para avaliar o desempenho mecânico com óleo diesel (OD) e com óleo bruto de girassol (OBG). Na utilização de OBG comparado ao OD, se pode notar uma redução de 7,8% na tomada de potência e um aumento de 15,5% no consumo de combustível, em média, como mostra as figuras 1 e figura 2. Não havendo surpresa, já que o poder calorífico do OD é maior, e o OBG tem uma viscosidade 12 vezes maior o que afeta a injeção de combustível.



Fonte: MAZIEIRO et al (2007)

FIGURA 1 – Desempenho de potência de um motor com óleo diesel e óleo bruto de girassol.



Fonte: MAZIEIRO et al (2007)

FIGURA 2 – Desempenho de consumo específico de um motor com óleo diesel e óleo bruto de girassol.

Pode se verificar que com a utilização de OBG, algumas anomalias como a contaminação do óleo lubrificante e incrustações no interior do motor notado pelo acumulo de carvão, encontrado no bico injetor e na cabeça dos pistões e formação de depósitos tipo verniz no porta válvulas, no parafuso da bomba alimentadora e no parafuso de entrada da bomba injetora. (SILVA et al., 2005)

Silva et al. (2005), avaliaram o desempenho de um motor de um trator Valmet, MWM 4TVA 78 CV 2300 RPM, utilizando como combustíveis, óleo diesel, biodiesel de óleo

residual (B100) e a mistura 50% diesel e 50% Biodiesel (B50). Para medir o consumo foi utilizado um medidor volumétrico descrito por Gamero et al. (1986), um dinamômetro utilizado para os ensaios de potência e torque medidos através da tomada de potência do trator. Notou-se que o motor teve sua potência e torque reduzido para 91,3% e 93,8% respectivamente utilizado o biodiesel quando comparado a utilização de diesel. E uma redução de potencia e torque menor de 97% e 97,1% respectivamente utilizando B50 com relação ao diesel. O Consumo de combustível do motor praticamente não alterou quando utilizado diesel e biodiesel, no entanto, com o uso do B50 houve uma aumento no consumo de 7.6%.

Barbosa et al. (2008), por meio de ensaios em um motor de ignição por compressão de um trator VALMET 85id modelo MWM – D225 – 4TVA com potência nominal do fabricante de 78cv e 2300 RPM. Utilizando um medidor volumétrico descrito por Gamero et al. (1986) e um dinamômetro, avaliaram o desempenho do motor utilizando diesel e biodiesel de soja em proporções B2, B5, B20 e B100. Chegou se a conclusão que o biodiesel B100 teve potência pouco inferior ao diesel fóssil. Já o B5 e o B20 tiveram potência média 1,31% mais baixa, mas em alguns regimes de rotação obtiveram potencias iguais ou superiores ao diesel. Teve-se torque em média 7% maior utilizando diesel em relação ao B100. Quando utilizado B100 houve maior eficiência térmica, 4% em média comparado ao diesel convencional.

Castellanelli et al. (2008) utilizaram um motor CUMMINS 4BTA 3.9, com a turbina removida, para realizar testes comparando o diesel fóssil (B0) e misturas diesel/biodiesel com teor de 2% de biodiesel (B2) até a utilização de 100% biodiesel (B100). Alguns dados como temperatura de entrada e retorno do combustível, volume consumido de combustível, tempo de consumo de combustível, torque, rotação, pressão atmosférica local, temperatura local e umidade relativa local foram registrados para cada ensaio feito. Foi realizado ensaio em dinamômetro de absorção hidráulica e utilizado um fluxômetro, para medir o consumo de combustível e notado que o B20 teve um melhor desempenho atingindo potência máxima de 47,3 kW a 2.333 rpm sendo que a do diesel fóssil foi de 45,8 kW a 2.333 rpm, além disso o consumo específico da mistura B20 foi menor e o torque praticamente igual ao do diesel convencional. O pior desempenho notado foi o do biodiesel puro (B100), e o B2, B5 e B10 tiveram desempenhos parecidos com o do diesel.

Venturi et al.(2002), realizaram ensaio num motor/gerador “Toyama”, trabalhando com rotação e carga constante, para avaliar a relação ar/combustível e consumo específico. Os

combustíveis utilizados foram diesel convencional, mistura diesel com biodiesel nas proporções de 10% (B10), 20% (B20), 30% (B30) e biodiesel na íntegra (B100). Notou-se que a relação ar/combustível efetiva aumenta quando adicionado biodiesel, devido o biodiesel já conter oxigênio em sua estrutura molecular, isso, influencia juntamente com sua menor entalpia (energia interna mais a energia de escoamento) de combustão no seu consumo específico, elevando o mesmo com relação ao diesel fóssil.

Analisando o desempenho de um motor Perkins A4-4.1 75 CV, quatro tempos de um trator Massey Ferguson abastecido com óleo diesel (B0) convencional e biodiesel de soja (B100) variando sua rotação, Volpato et al. (2009), avaliaram torque, potência (efetiva e reduzida), consumo (específico e energético) de combustível, eficiência termodinâmica e volumétrica. Observou-se se uma redução de 5 % de potência efetiva e 6,1% na reduzida utilizando B100 comparado ao B0. Também houve uma perda de 10,7% na comparação biodiesel e diesel. Na avaliação de consumo energético e específico o B100 teve um consumo 14,66% menor do que o diesel na rotação de 540 rpm.

Santos e Matai (2008), apresentaram aspectos ambientais da utilização de biodiesel em motores de combustão. Apontando o biodiesel como um facilitador para que os veículos possam atender as metas do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) de emissão de poluentes, pois, devido suas características a sua utilização reduz a emissão de MP, CO e HC com relação ao diesel fóssil. Por outro lado aumenta as emissões de NOx, e quando se tenta reduzir estas emissões se aumenta o consumo de combustível e as emissões de MP.

Wilhelm et al. (2007), realizaram testes de desempenho e de emissões de poluentes utilizando biodiesel de soja em um motor a combustão MWM de 132 kW a 1780 rpm utilizado para acionar um gerador. As misturas B60 e B80 não obtiveram mudanças significativas de torque e potência com relação ao diesel convencional. Houve uma maior alteração nesses aspectos quando utilizado B100, que chegou a uma redução de até 11% de torque e potência e um aumento de 19% no consumo de combustível. Nas emissões de fumaças o B100 teve uma redução bastante expressiva, 70%. Nos resultados de emissões atmosféricas os biodieseis B100, B60 e B80 tiveram uma diminuição na emissão de hidrocarbonetos (HC) e fuligem MIRA (para o B100 uma redução de até 80%) e um aumento nas emissões de gases NOx.

Analisando a revisão bibliográfica apresentada, verifica-se que motores operando com diesel possuem maiores eficiência que motores operando com biodiesel e mistura diesel mais biodiesel, como relação a potência, torque e consumo específico. Desta forma o diesel é economicamente mais viável comparado ao biodiesel. Porém com relação aos produtos gerados na combustão observou se que quando utilizado biodiesel houve uma diminuição na emissão de gases poluentes como hidrocarbonetos, benzeno e fuligem, sendo assim, importante considerar a sua utilização por ser uma alternativa de energia mais limpa, com menor impacto ambiental.

Ficou nítida uma carência na realização de trabalhos dos processos de combustão de biodiesel e misturas diesel-biodiesel. Dessa forma, nesse trabalho será analisado o desempenho energético do processo de combustão utilizando-se biodiesel de soja puro ao invés de diesel em um motor diesel por meio de simulação, mostrando um modelo comparativo das vantagens e desvantagens da utilização desses dois combustíveis.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são analisados e comparados através de simulação a combustão de diesel e biodiesel de soja em um motor por ignição, variando temperatura de entrada do combustível e porcentagem de excesso de ar na combustão.

#### 3.1. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho é proposta por Van Whylen, Sonntag e Borgknakke, 2009. Um processo de combustão pode ser descrito por equações químicas, pois, durante a combustão ocorre oxidação dos seus componentes químicos iniciais, desta forma, eles reagem entre si, formando substâncias chamadas de produtos. Nesse processo é conservada a massa de cada elemento, e identificar estes produtos descrevendo e resolvendo equações químicas consiste basicamente nisto, como pode ser exemplificado na equação 3.1, onde ocorre a reação química de um kmol de carbono e um kmol oxigênio (reagentes), formando um kmol de dióxido de carbono (produto). Considerando o ar ideal, onde há apenas oxigênio.



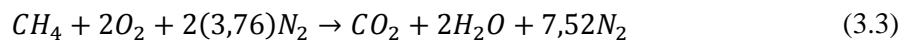
O carbono e o hidrogênio são oxidados em uma combustão de combustível composto por hidrocarbonetos. Como pode se ver na equação 3.2, em uma combustão de metano, o produto gerado da combustão inclui dióxido de carbono e água variando seu estado físico de acordo com a temperatura e pressão da combustão.



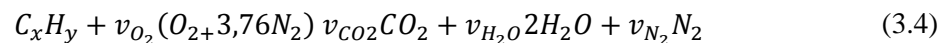
O oxigênio consumido nas maiorias das combustões é proveniente do ar, ou seja, não é oxigênio puro, tendo outros elementos em sua composição. O ar em base molar é composto

por aproximadamente 21% de oxigênio 78% de nitrogênio e 1% de argônio. Iremos admitir que o nitrogênio e o argônio não participem das reações químicas, mas é importante ressaltar que ocorrem algumas reações entre nitrogênio e oxigênio por causa das altas temperatura de reação na câmara de combustível.

Em problemas de combustão em que o ar está presente, é comumente desconsiderado o argônio e admitindo o ar composto por 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, em base volumétrica se concluem que para cada mol de oxigênio se tem  $79/21 = 3,76$  mols de nitrogênio. Feita estas considerações o nitrogênio é chamado de nitrogênio atmosférico com seu peso molar passando de 28,013 para 28,16. Sendo assim, utilizando oxigênio proveniente do ar ao invés de oxigênio puro, temos a seguinte equação para combustão do metano.



Quando se oxida todos os elementos oxidáveis do combustível com uma quantidade de ar mínima e suficiente para chegar a uma combustão completa, este ar é chamado de ar teórico. Sendo assim, em uma combustão com ar teórico os produtos gerados desta combustão não contem oxigênio. Para uma combustão de um hidrocarboneto com ar temos a seguinte equação



na qual os coeficientes das substâncias são denominados como coeficientes estequiométricos. Conservando as espécies químicas quantificamos o a ar teórico. Desta forma,

$$C: v_{CO_2} = x \quad (3.5)$$

$$H: 2v_{H_2O} = y \quad (3.6)$$

$$N_2: v_{N_2} = 3,76 \times v_{O_2} \quad (3.7)$$

$$O_2: v_{O_2} = v_{CO_2} + \frac{v_{H_2O}}{2} = x + y/4 \quad (3.8)$$



e a quantidade de kmols de ar para um kmol de combustível é

$$n_{ar} = v_{O_2} \times 4,76 = 4,76 \left( x + \frac{y}{4} \right) \quad (3.9)$$

Assim tem-se a quantidade de 100% de ar teórico. Mas, sabe-se que para alcançar a combustão completa é necessário que a quantidade de ar fornecido para combustão deve ser maior que a quantidade de ar teórico necessário.

A relação entre o ar e o combustível pode ser designado pela relação ar-combustível (AC) ou a relação combustível-ar (CA). Podendo ser calculada em base mássica, que é a forma mais comum ou em forma em base molar. Da seguinte maneira,

$$AC_{mássica} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} \quad (3.10)$$

$$AC_{molar} = \frac{n_{ar}}{n_{comb}} \quad (3.11)$$

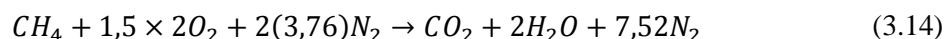
Na equação 3.12 nota-se que estas relações são ligadas por meio das massas moleculares.

$$AC_{mássica} = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} = \frac{n_{ar}M_{ar}}{n_{comb}M_{comb}} = AC_{molar} \frac{M_{ar}}{M_{comb}} \quad (3.12)$$

É possível exibir o quanto realmente foi consumido nas reações em função da porcentagem de ar teórico e também através da relação de equivalência, conforme na equação 3.13, onde “s” indica que a relação é referente a 100% do ar teórico.

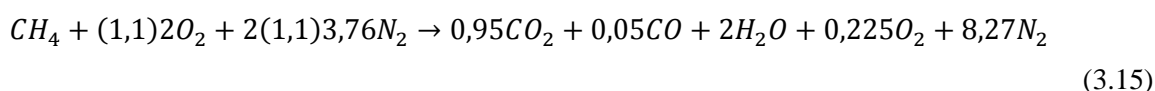
$$\phi = \frac{CA}{CA_s} = \frac{AC_s}{AC} \quad (3.13)$$

Deste modo, 150% de ar teórico quer dizer que tem-se uma vez e meia maior que o ar teórico, ou seja, 50% de ar em excesso. Uma combustão de metano com 150% de ar teórico pode ser descrita assim:



Por outro lado, o ar fornecido para a combustão pode ser menor em quantidade que o ar teórico necessário, ocorrendo isto, se tem uma combustão incompleta. Em casos que o ar fornecido é apenas um pouco menor que o ar teórico necessário o resultado é que somente uma parte do carbono reage com o oxigênio formando monóxido de carbono (CO), em vez de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se esta deficiência de ar for considerável, pode ser que no produto da reação se encontre hidrocarbonetos.

A presença de monóxido de carbono em pequenas quantidades poderá ocorrer mesmo em combustões que haja um pouco de excesso de ar fornecido. Esta quantidade de CO<sub>2</sub> pode ser variada de acordo com vários fatores, incluindo turbulência e mistura. A equação 3.15 mostra como pode ser expressa a combustão de metano com 10% de ar em excesso.



### 3.2. Entalpia de formação

Considerando o processo de combustão, onde há reação entre carbono sólido com oxigênio gasoso (gás ideal), admitindo que os dois estejam entrando no volume de controle a 25°C e 0,1 MPa e o produto formado pela reação dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) saindo com mesma temperatura e pressão. Se fosse realizada uma medição de transferência de calor no processo, teria resultado de 393522 KJ/Kmol de CO<sub>2</sub> formado. O processo possui a seguinte equação química



Aplicando a primeira lei da termodinâmica, chega-se a:

$$Q_{v.c.} + H_R = H_P \quad (3.17)$$

onde o índice R se refere aos reagentes e o P aos produtos. Sendo conveniente escrever a primeira lei da termodinâmica de acordo com a equação 3.18, onde os somatórios se referem a todos reagente e produtos.

$$Q_{v.c} + \sum_R n_e \bar{h}_e = \sum_P n_s \bar{h}_s \quad (3.18)$$

Assim, a quantificação da transferência de calor nos mostra a diferença de entalpia dos reagentes e os produtos. Contudo, admitimos que a entalpia de todos os elementos a 25°C e 0,1MPa seja 0, assim anula-se a entalpia do reagentes.

$$Q_{v.c.} + H_R = -393522Kj/Kmol \quad (3.19)$$

Admitindo 25°C e 1 Mpa onde a dos elementos na admissão é nula, a entalpia do  $CO_2$  é chamada de entalpia de formação. Sendo assim, para  $CO_2$ ,

$$\bar{h}_f^0 = -393522kj/Kmol \quad (3.20)$$

Encontra-se a entalpia do  $CO_2$  em outro estado, relativa a essa base em que a entalpia dos elementos é zero, através da soma da variação de entalpia desse estado (gás ideal a 25°C 0,1MPa) e o estado com a entalpia de formação. Deste modo a entalpia a qualquer temperatura e pressão se dá por,

$$\bar{h}_{T,P} = (\bar{h}_f^0)_{298; 0,1Mpa} + (\Delta\bar{h})_{298; 0,1Mpa} \quad (3.21)$$

em que o último termo da equação significa a diferença da entalpia em qualquer estado dado a entalpia a 298K e 0,1Mpa.

O procedimento realizado anteriormente para o  $CO_2$  como exemplo pode ser aplicado para qualquer outro composto.

### 3.3. Primeira lei aplicada em sistemas reagentes

A utilização da entalpia de formação se faz imprescindível na aplicação da primeira lei da termodinâmica para que se possa somar ou subtrair entalpias de substâncias diferentes.

Para essas situações a aplicação da primeira lei da termodinâmica pode ser descrita assim:

$$Q_{v.c.} + H_R = W_{v.c.} + H_P \quad (3.22)$$

ou

$$Q_{v.c.} + \sum_R n_e \bar{h}_e = W_{v.c.} + \sum_P n_s \bar{h}_s \quad (3.23)$$

### 3.4. Energia interna de combustão e calor de reação

A diferença entre as entalpias dos reagentes e dos produtos respectivamente quando sua combustão é total pode ser denominada como entalpia da combustão ( $\bar{h}_{RP}$ ), como demonstrado na equação 3.24 e 3.25, podendo se expressar em massa ou Kmol de combustível.

$$\bar{h}_{RP} = H_P - H_R \quad (3.24)$$

$$\bar{h}_{PR} = \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_s - \sum_R n_e (\bar{h}_f^0 + \Delta\bar{h})_e \quad (3.25)$$

Como a entalpia de formação é fixa, ela pode ser expressa da seguinte maneira,

$$H = H^0 - \Delta H \quad (3.26)$$

no qual,

$$H_R^0 = \sum_R n_i \cdot \bar{h}_{fi}^0 \quad (3.27)$$

$$H_R = \sum_R n_i \cdot \Delta \bar{h}_i^0 \quad (3.28)$$

$$H_P^0 = \sum_P n_i \cdot \bar{h}_{fi}^0 \quad (3.29)$$

$$H_P = \sum_P n_i \cdot \bar{h}_{fi}^0 \quad (3.30)$$

Reescrevendo a diferença entre a entalpia dos reagentes e dos produtos

$$H_P - H_R = H_P^0 - H_R^0 + \Delta \bar{h}_P - \Delta \bar{h}_R = \bar{h}_{RP0} + \Delta \bar{h}_P - \Delta \bar{h}_R \quad (3.31)$$

Pode-se notar que a diferença de entalpias é a função da entalpia de combustão e a diferença das entalpias dos produtos e dos reagentes respectivamente.

De maneira análoga é definida a energia de combustão

$$\bar{u}_{RP} = U_P - U_R \quad (3.32)$$

$$\bar{u}_{RP} = \sum_P n_i (\Delta \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} - P\bar{v})_s - \sum_R n_i (\Delta \bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h} - P\bar{v})_e \quad (3.33)$$

Nos casos em que elementos gasosos puderem ser considerados como gases ideais e o volume dos seus elementos líquidos e gasosos, forem desprezíveis com relação dos constituintes gasosos, fica reduzida a relação para  $\bar{u}_{RP}$ . Desta forma

$$\bar{u}_{RP} = \bar{h}_{RP} - \bar{R}T(n_{\text{produtos gasosos}} - n_{\text{reagentes gasosos}}) \quad (3.34)$$

### 3.5. Potência de um motor a combustão

A potência de um motor a combustão pode ser definida pelo calor gerado em sua combustão e o rendimento conforme demonstrado na equação 3.35

$$\dot{W} = \eta \dot{Q} \quad (3.35)$$

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo é feita a simulação do calor de combustão gerado para o diesel e biodiesel em diferentes condições de combustão, variando-se o excesso de ar e temperatura de entrada dos produtos.

### 4.1. Modelo de aplicação

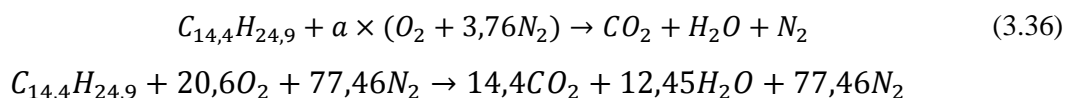
Analisando os processos de combustão do diesel e do biodiesel por meio de equações químicas. Calcula-se o calor de combustão com as propriedades fornecidas na Tab. 1. Considera-se um processo de combustão estequiométrica a pressão constante, no qual os reagentes adentram à câmara de combustão com temperatura de 40 °C e os produtos deixam a câmara de combustão a 600 °C. Tal processo é descrito a seguir, e serve apenas como modelo ilustrativo para os resultados que serão obtidos.

TABELA 1 – Propriedades Físico Químicas dos Elementos de Combustão

Propriedades Físico químicas				
Substancias	Moleculas	Entalpia de formação	Calor específico	Massa
		kJ/mol	kJ/kg k	kg/mol
Biodiesel	$C_{18,78}H_{34,54}O_2$	-260,147	1,917	0,29230
Oxigênio	$O_2$	0	0,9216	0,02199
Nitrogênio	$N_2$	0	1,042	0,02801
D'carbono	$CO_2$	-393,5	0,842	0,04401
Água	$H_2O$	-241,826	1,872	0,018015
Oxigênio	$O_2$	0	0,9216	0,02199

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009); Costa (2007).

Para o Diesel tem-se que:



Calculando-se então a entalpia dos reagentes, obtém-se:

$$H_R = \sum_R n_e (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_e \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} H_R = & 1 \cdot (-174 + (2,21 \cdot (313,15 - 298,15) \cdot 0,1683)) + 20,6 \\ & \cdot (0 + (0,9216 \cdot (313,15 - 298,15) \cdot 0,0219)) + 77,456 \cdot (0 \\ & + (1,042 \cdot (31,15 - 298,15) \cdot 0,02801)) \end{aligned}$$

$$H_R = -128,25 \frac{kJ}{mol}$$

Calculando a entalpia dos produtos, tem-se que:

$$H_P = \sum_P n_s (\bar{h}_f^0 + \Delta \bar{h})_s \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} H_p = & 14,4 \cdot (-393,5 + (0,842 \cdot (873,15 - 298,15) \cdot 0,0440)) + 12,45 \cdot (-241,8 \\ & + (1,87 \cdot (873,15 - 298,15) \cdot 0,018)) + 0 \cdot (0 + (0,9216 \cdot (873,15 \\ & - 298,15) \cdot 0,0219)) + 99,32 \cdot (77,456 + (1,042 \cdot (873,15 \\ & - 298,15) \cdot 0,028)) \end{aligned}$$

$$H_p = -6828,86 \frac{kJ}{mol}$$

Realizando a diferença entre as entalpias dos produtos pela dos reagentes, chega-se ao calor liberado no processo de combustão do diesel, como é representado por:

$$q = H_p - H_r \quad (3.39)$$

$$q = -6828,86 - 128,25$$

$$q = -6700,61 \frac{kJ}{mol}$$

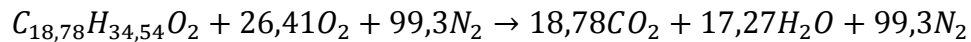
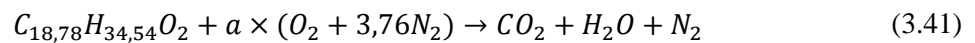


Convertendo para quilojoule por quilograma de Diesel, dividindo pela massa molecular do Diesel

$$q = -\frac{6700,61}{0,1683} \quad (3.40)$$

$$q = -39813,49 \frac{kJ}{kg}$$

Para o biodiesel tem-se que:



Calculando a entalpia dos reagentes com a equação 3.37, obtém-se que:

$$H_R = 1 \cdot (-260,147 + (1,917 \cdot (313,15 - 298,15) \cdot 0,2923)) + 26,41 \cdot (0 + (0,9216 \cdot (313,15 - 298,15) \cdot 0,0219)) + 99,3 \cdot (0 + (1,042 \cdot (313,15 - 298,15) \cdot 0,02801))$$

$$H_R = -200,23 \frac{kJ}{mol}$$

Usando a equação 3.38 tem-se a entalpia dos produtos

$$H_p = 18,72 \cdot (-393,5 + (0,842 \cdot (873,15 - 298,15) \cdot 0,04401)) + 17,27 \cdot (-241,8 + (1,87 \cdot (873,15 - 298,15) \cdot 0,018)) + 0 \cdot (0 + (0,9216 \cdot (873,15 - 298,15) \cdot 0,0219)) + 99,32 \cdot (0 + (1,042 \cdot (873,15 - 298,15) \cdot 0,028))$$

$$H_p = -9164,4 \frac{kJ}{mol}$$

Realizando a diferença entre as entalpias dos produtos pela dos reagentes usando a equação 3.39, chega-se ao calor liberado no processo de combustão do Biodiesel, como é representado por:

$$q = -9164,4 - 200,23$$

$$q = -8963,77 \frac{kJ}{mol}$$

Convertendo para quilojoule por quilograma de Diesel, dividindo pela massa molecular do biodiesel

$$q = -\frac{8963,77}{0,2923} \tag{3.42}$$

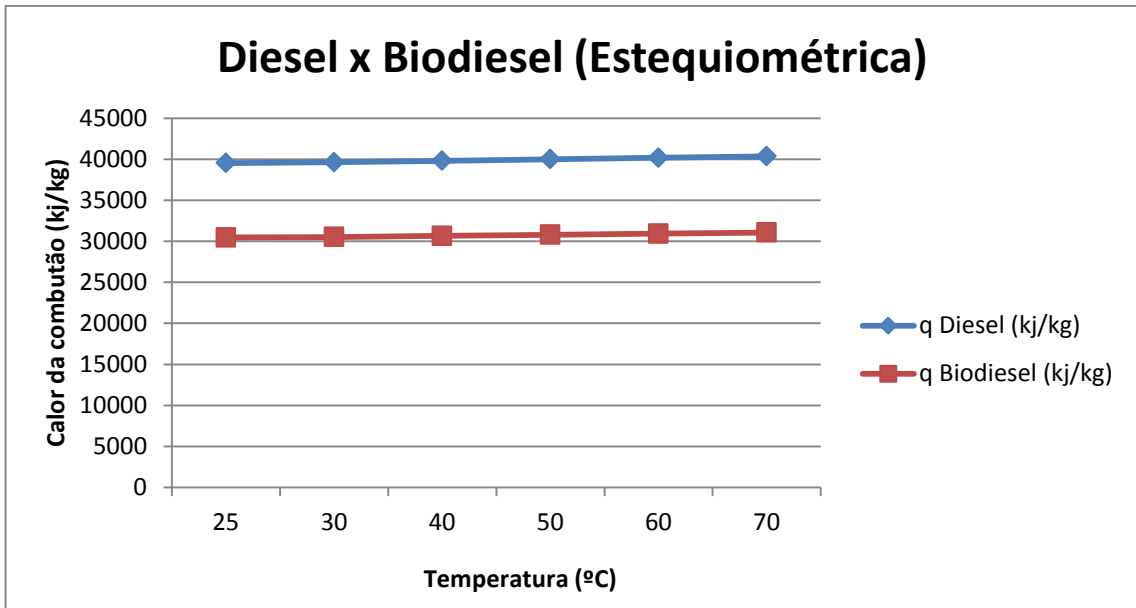
$$q = -30666,3 \frac{kJ}{kg}$$

Observa-se no modelo ilustrativo, que o calor liberado na queima do Diesel é 32,31 % maior que o liberado pelo biodiesel de soja, o que justifica a não adequação por completo dos MIE's ao uso de biodiesel.

Para melhor entendimento de tal variação é feito a seguir uma série de comparações entre os processos de combustão do diesel e do biodiesel de soja.

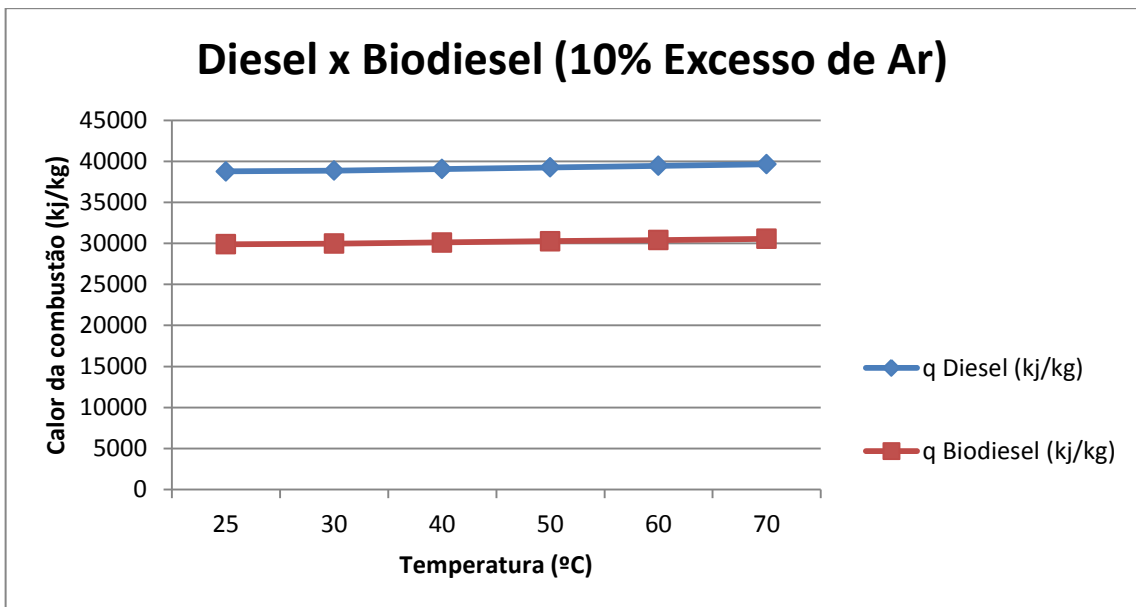
#### **4.2. Análise da combustão diesel x biodiesel**

Repetindo-se os cálculos do item 4.1 variando-se o percentual de excesso ar que adentra a câmara de combustão de 0 a 100 % e a temperatura de entrada do comburente de 25 a 70 °C, obtêm-se os resultados apresentados da Figura 3 à Figura 13, as quais apresentam a comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel.



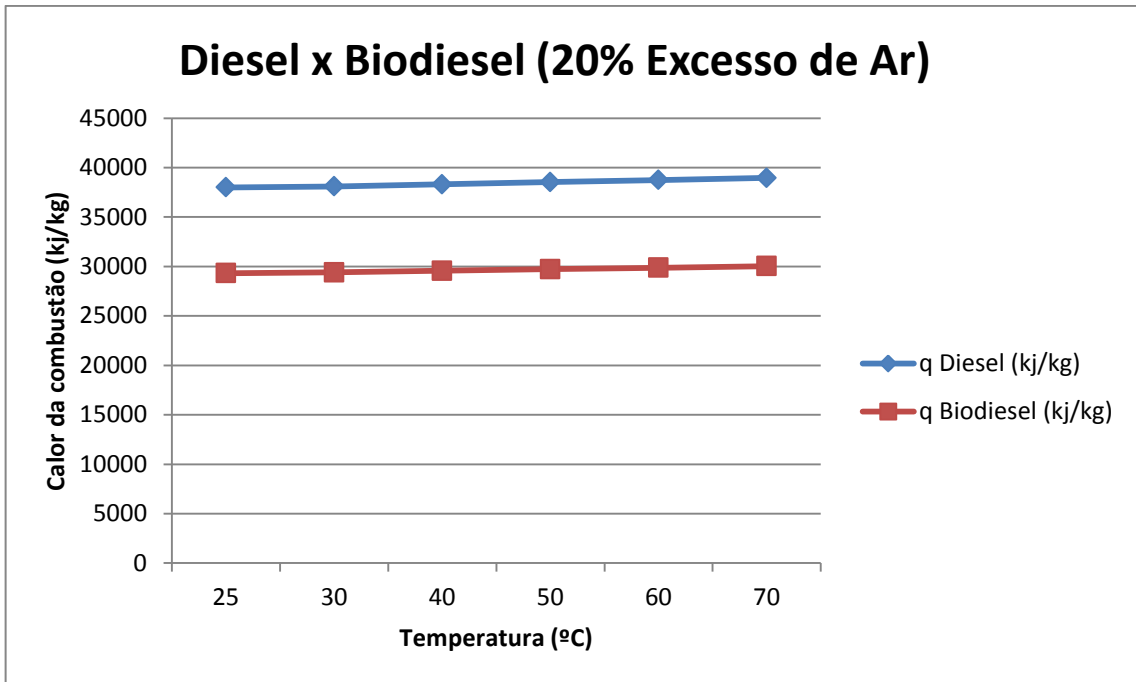
Fonte: Próprio autor

FIGURA 3 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão estequiométrica.



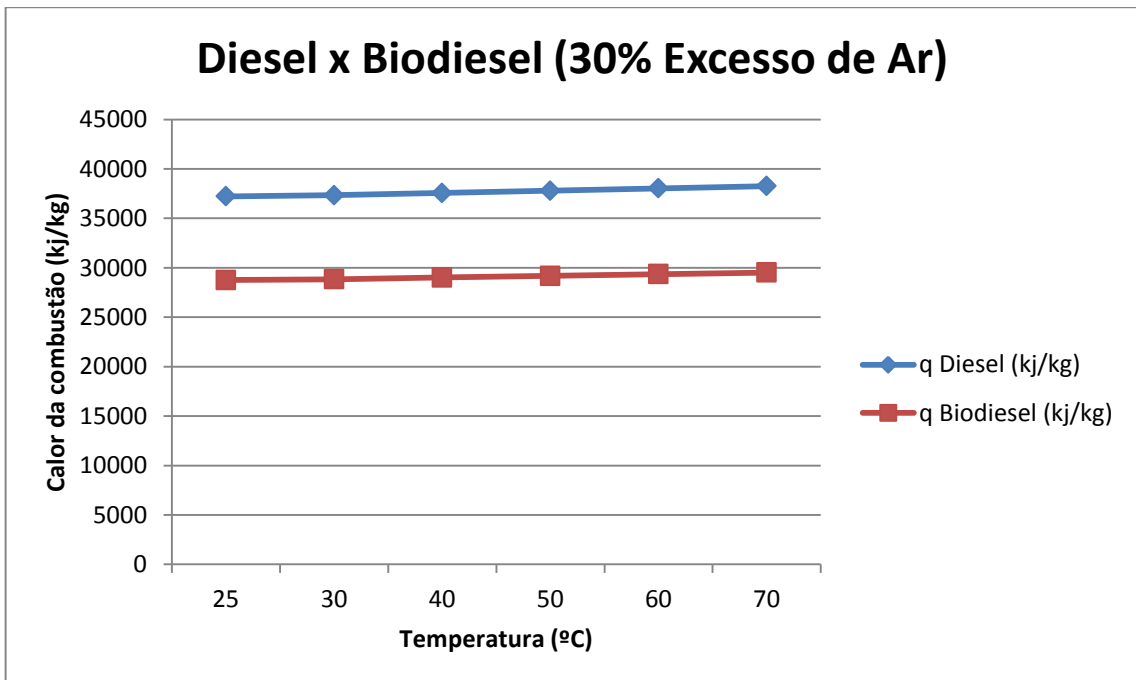
Fonte: Próprio autor

FIGURA 4 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 10 % de excesso de ar.



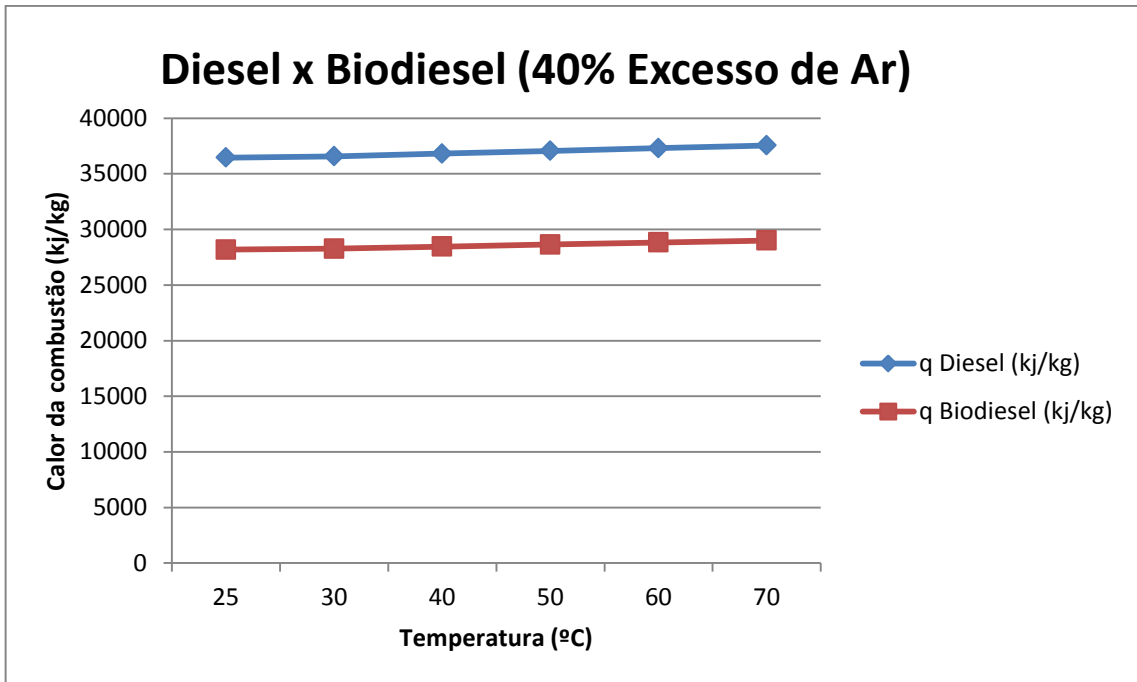
Fonte: Próprio autor

FIGURA 5 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 20 % de excesso de ar



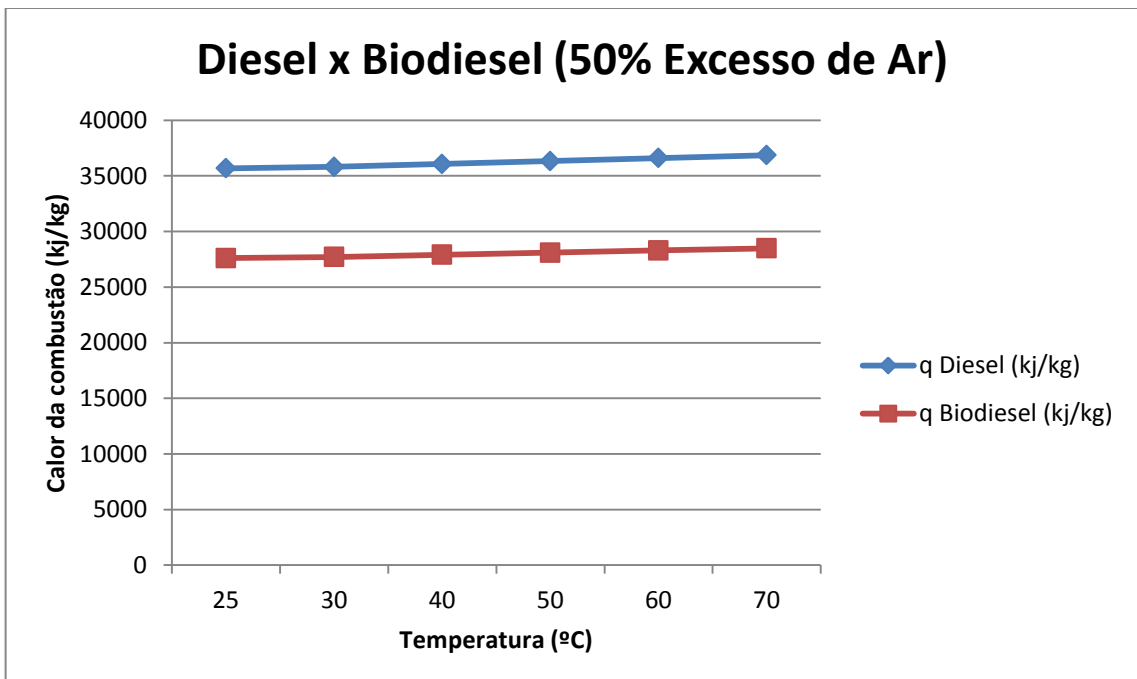
Fonte: Próprio autor

FIGURA 6 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 30 % de excesso de ar.



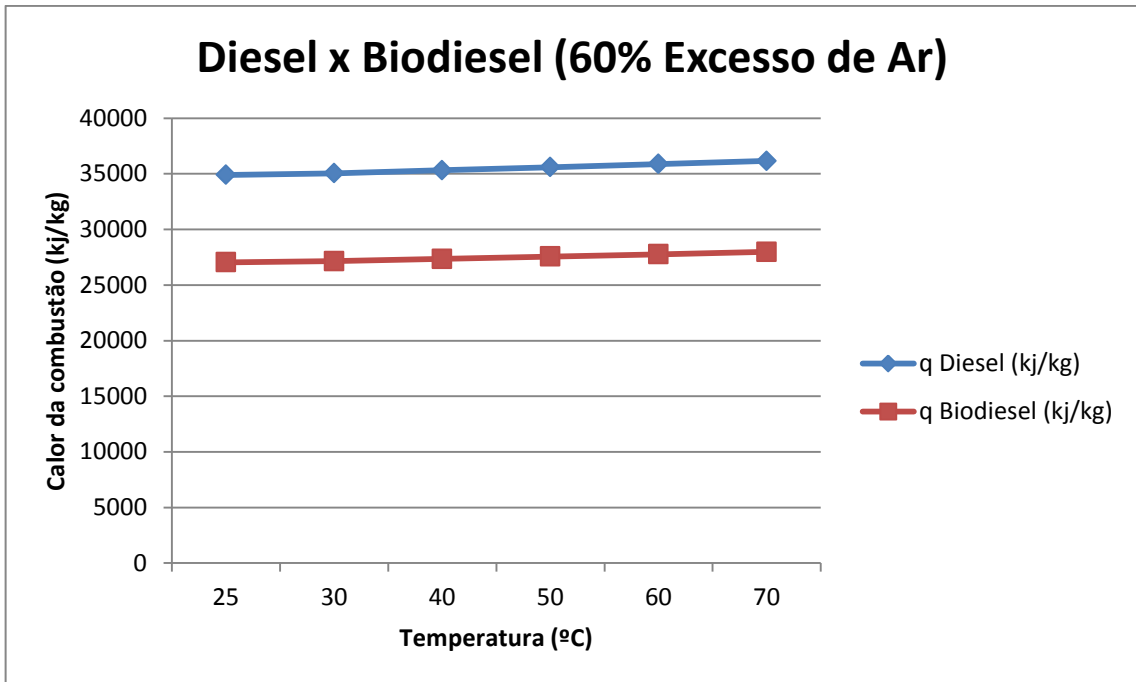
Fonte: Próprio autor

FIGURA 7 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 40 % de excesso de ar.



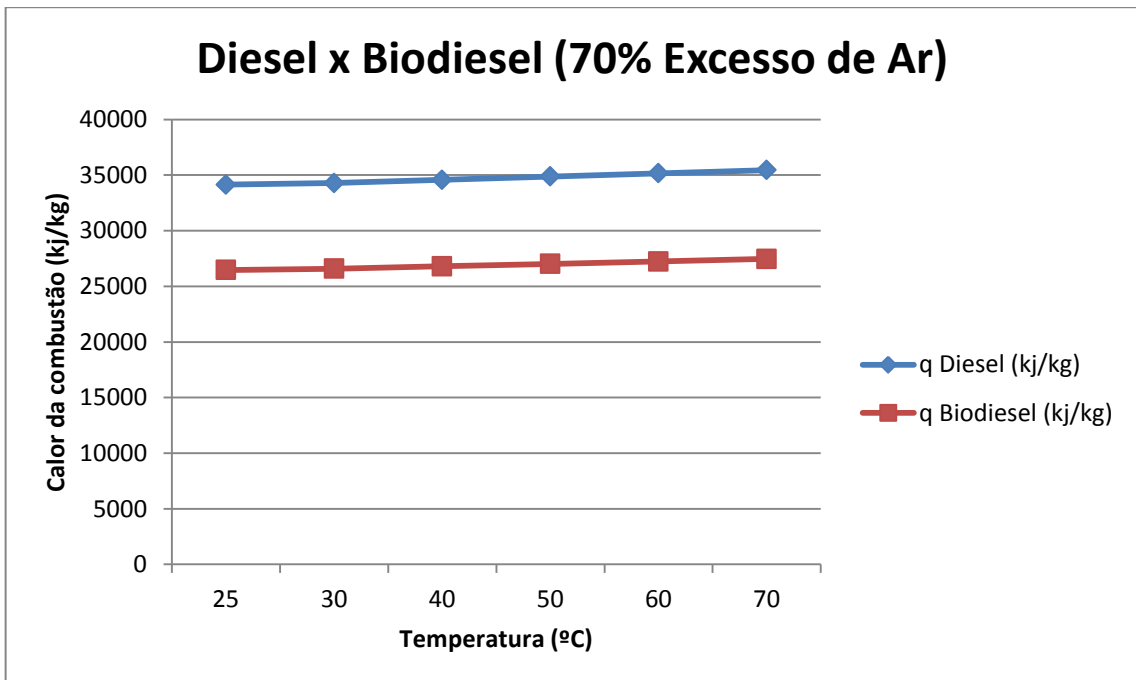
Fonte: Próprio autor

FIGURA 8 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 50 % de excesso de ar.



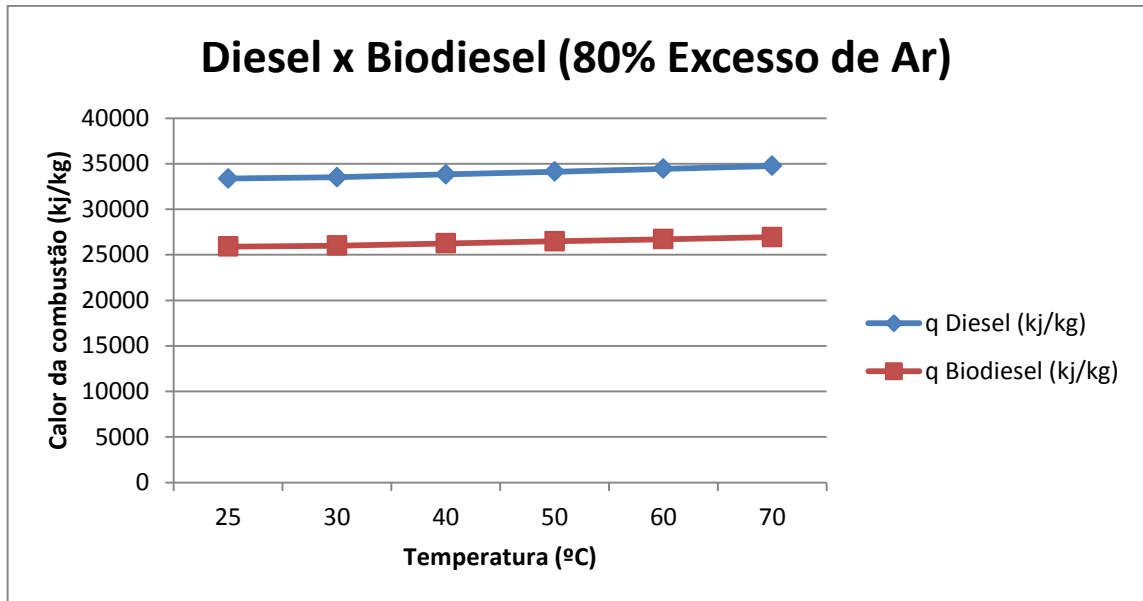
Fonte: Próprio autor

FIGURA 9 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 60 % de excesso de ar.



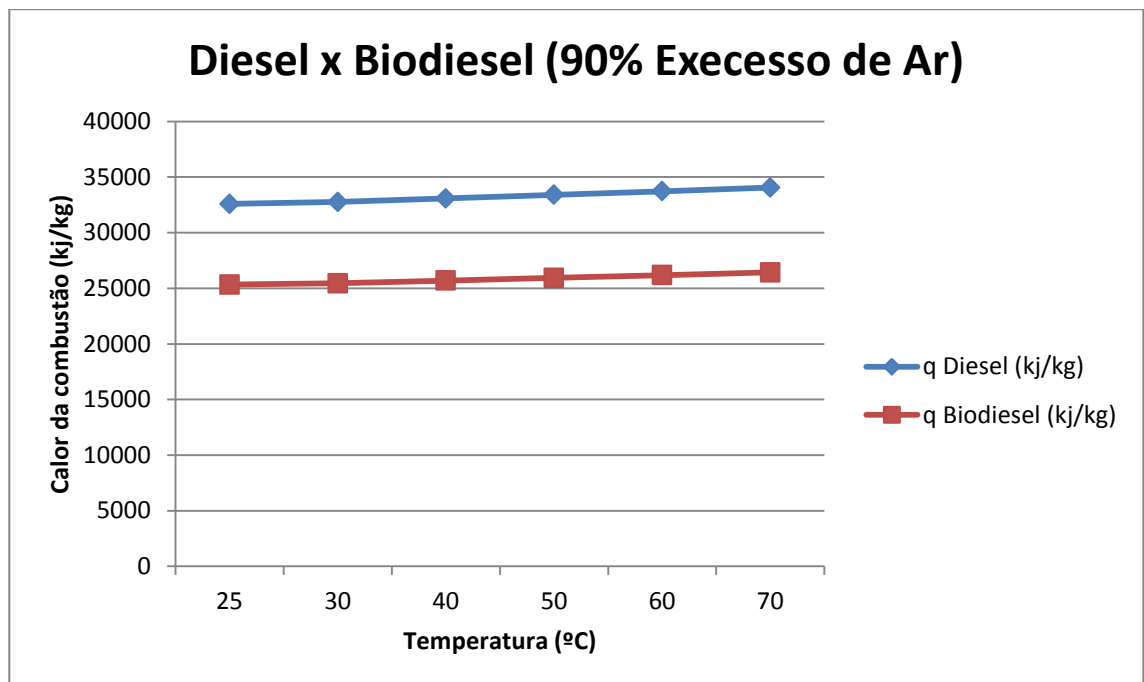
Fonte: Próprio autor

FIGURA 10 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 70 % de excesso de ar.



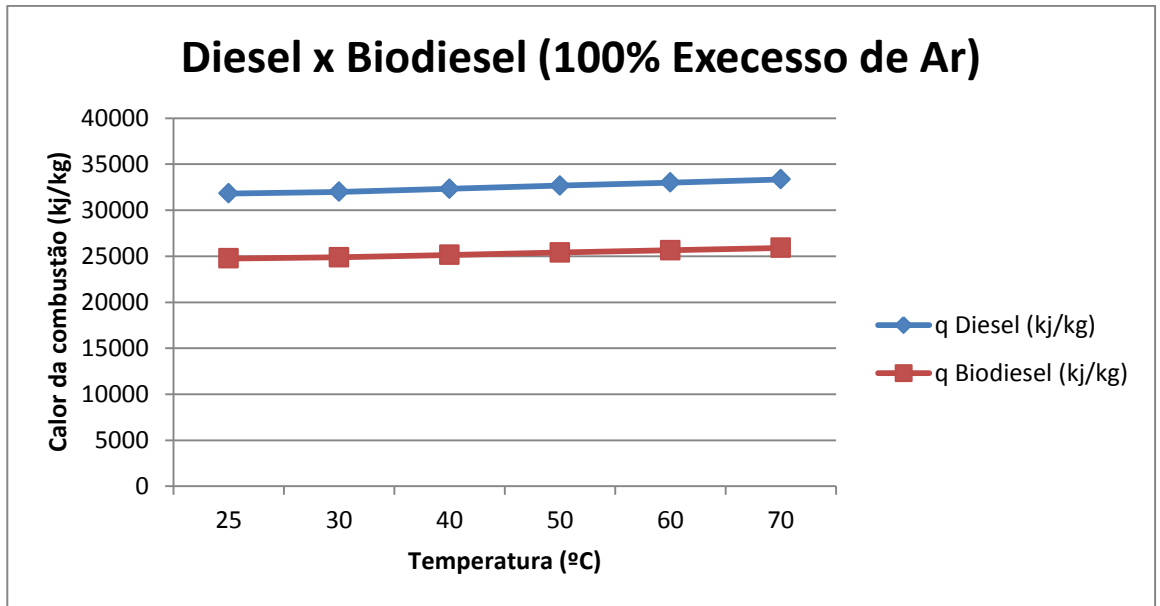
Fonte: Próprio autor

FIGURA 11 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 80 % de excesso de ar.



Fonte: Próprio autor

FIGURA 12 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 90 % de excesso de ar.



Fonte: Próprio autor

FIGURA 13 – Comparação dos calores de combustão do diesel e do biodiesel para um processo de combustão com 100 % de excesso de ar.

Observa-se na Figura 3, que a combustão estequiométrica do diesel libera uma maior quantidade calor do que a do biodiesel. Com os reagentes entrando a 70°C, obteve-se a maior diferença de calor liberado entre os dois combustíveis, 9.208,07 kJ/kg e a 25 °C esse valor foi o menor registrado, 9.079,7 kJ/kg. A diferença média entre o calor de combustão do diesel e do biodiesel foi, 9.191,2 kJ/kg.

Verifica-se na Figura 4, com 10% de excesso de ar na combustão, que o calor liberado pela queima do diesel foi em média 8.999,4 kJ/kg maior do que calor liberado pela queima do biodiesel. O maior desvio ocorreu para temperatura de 70°C e o menor para 25°C, com diferença de calores de combustão de 9.096,9 kJ/kg e 8.877,6 kJ/kg, respectivamente.

Com 20% de excesso de ar além do ideal para toda a faixa de temperatura de entrada dos reagentes analisada, verifica-se na Figura 5 que o calor liberado pelo diesel foi em média 8.807,7 kJ/kg maior que do biodiesel, sendo que com 25°C obteve-se menor diferença, 8.675,5 kJ/kg e com 70°C obteve-se a maior diferença, 8.913,6 kJ/kg

Na Figura 6, com 30% de excesso de ar, nota-se que a tendência de todas as Figuras anteriores se mantém. Considerando toda a faixa de temperaturas analisadas a diferença média entre o calor de combustão do diesel e do biodiesel foi de 8.616,1 kJ/kg. Para os reagentes



entrando na câmara de combustão a 70°C, observou-se o maior desvio e com 25°C o menor, com valores de 8.730,19 kJ/kg e 8.473,39 kJ/kg, respectivamente.

Na Figura 7, com 40% de excesso de ar, verifica-se para toda a faixa de temperaturas analisadas que a diferença média entre o calor de combustão do diesel e do biodiesel foi de 8.424,3 kJ/kg. Sendo que com 25°C registou-se a menor diferença, 8.271,27 kJ/kg e com 70°C a maior de 8.546,8 kJ/kg.

Na Figura 8, para 50 % de excesso de ar, verifica-se que para toda a faixa de temperaturas analisadas que a diferença média entre o calor de combustão do diesel e do biodiesel foi de 8.232,6 kJ/kg. A diferença local entre os calores de combustão do diesel e biodiesel aumentou com o aumento da temperatura de entrada dos reagentes. O maior desvio foi obtido para os reagentes entrando na câmara de combustão a 70°C e o menor para 25°C, com calor de combustão de 8.363,43 kJ/kg e 8.069,16 kJ/kg respectivamente.

Verifica-se na Figura 9, que para 60% de excesso de ar, o calor liberado pela queima do diesel foi em média 8.040,9 kJ/kg maior do que o calor liberado pela queima do biodiesel. Essa diferença foi menor para os reagentes entrando na câmara de combustão a 25°C, 7.867,04 kJ/kg e maior para 70°C, 8.180,05 kJ/kg.

Na Figura 10, com 70% de excesso de ar na combustão e variando a temperatura de entrada dos reagentes o diesel liberou em média 7.894,2 kJ/kg a mais que o biodiesel, sendo que com 25°C essa diferença foi a menor registrada, e a 70°C a maior, com valores de 7.664,92 kJ/kg e 7.996,69 kJ/kg respectivamente.

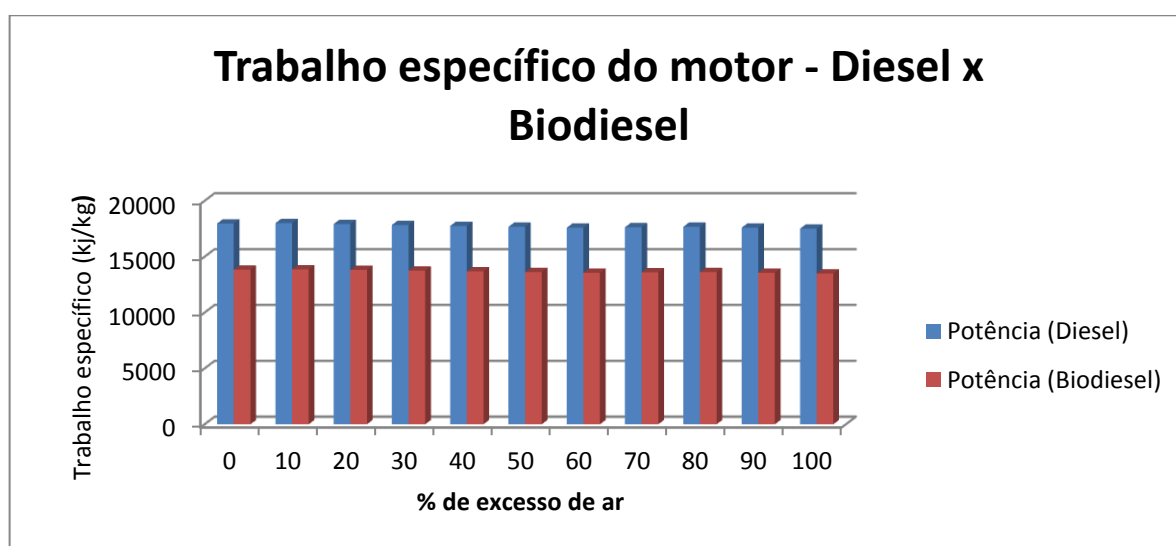
Na Figura 11, nota-se que a queima do diesel libera em média 7.657,5 kJ/kg a mais que o biodiesel. A menor diferença entre os resultados do diesel e do biodiesel ocorreu para 25°C, 7.462,8 kJ/kg e a maior ocorreu para 70°C, 7.813,29 kJ/kg

Verifica-se na Figura 12, para 90% de excesso de ar, que o calor liberado na combustão do diesel foi em média 7.465,8 kJ/kg maior que a do biodiesel. Nota-se também que a maior diferença ocorreu para os reagentes entrando a 70°C na câmara de combustão, 7.629,91 kJ/kg e a menor a 25°C, 7.260,68 kJ/kg.

Considerando um processo de combustão com o dobro de ar necessário, mostrado na Figura 13, observa-se que o diesel libera em média 7.274,1 kJ/kg a mais que o biodiesel. Sendo que com o combustível com temperatura de entrada a 70°C teve sua maior disparidade e com 25°C a menor, com valores de 7.446,53 kJ/kg e 7.058,56 kJ/kg respectivamente.

Na análise das Figuras 3 à Figura 13 verifica-se que os perfis das curvas do calor liberado no processo de combustão são os mesmos tanto para o diesel quanto para o biodiesel. Verifica-se também que o calor liberado na queima dos dois combustíveis é proporcional a temperatura de entrada dos reagentes. Nota-se que na combustão sem excesso de ar com o combustível entrando a 70°C se obteve a maior diferença de calor gerado na combustão, diferença essa que chegou a 9.280,33 kJ/kg. Com o dobro de excesso de ar na combustão a diferença entre os dois com o combustível entrando a 25°C foi de 7.058,56 kJ/kg, a menor diferença de calor gerado na combustão evidenciada nas simulações.

Calculando a potência do motor conforme a equação 3.35 considerando um motor com rendimento de 45% e variando excesso de ar na combustão, obtém-se a Fig. 14



Fonte: Próprio autor

FIGURA 14 – Comparação do trabalho específico para um motor operando a diesel e a biodiesel com o mesmo rendimento.

Nota-se na Figura 14 que o motor abastecido com diesel apresenta maior potência em relação ao abastecido com biodiesel, uma diferença média de 4.068,48 kJ/kg de potência no motor. Tal diferença justifica o porquê da utilização apenas de diesel em motores de ignição espontânea. Fica comprovado que a perda de energia na utilização de biodiesel em substituição do diesel é considerável, e, portanto, inviável quando o objetivo é maximizar a potência do motor.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisado e comparado por simulação o desempenho energético do processo de combustão que ocorrem em motores de ignição por compressão substituindo diesel por biodiesel e alterando variáveis na combustão.

Utilizando o método de Van Whylen, Sonntag e Borgknakke (2009), foi descrito o processo de combustão do diesel e biodiesel por meio de equações químicas variando temperatura de entrada dos combustíveis e porcentagem de ar na combustão, onde ficou evidenciada a maior eficiência energética do diesel em relação ao biodiesel.

Em uma média de todos os testes simulados o diesel liberou 36.224,02 kJ/kg e o biodiesel 28.018,62 kJ/kg de calor na combustão, uma diferença média de 8.205,4 kJ/kg.

Notou-se que o poder calorífico e a diferença entre o calor liberado na queima dos dois combustíveis são inversamente proporcionais a porcentagem de excesso de ar na combustão.

A potência do motor também foi menor quando utilizado o Biodiesel, devido o seu menor calor de combustão.

Este trabalho vem agregar a outros trabalhos de análise numérica de processos de combustão de biodiesel, nos quais, os estudos ainda são recentes. Se tornando importante por ter-se no biodiesel uma futura alternativa de energia renovável com menor degradação ambiental do que o diesel.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Y. V. A.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, S. M. G. **Energia sociedade e meio ambiente**. 1. Ed. Palmas: Eumed.net, 2010.

BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M. da; SALVADOR, N.; VOLPATO, C. E. S. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, n.5, p.1588-1593, set./out. 2008.

CARDOSO, F. **Efeito estufa Por que a terra morre de calor**. 1. Ed. São Paulo. Editora Terceiro Nome. Mostarda Editora, 2006.

CASTELLANELLI, C. A.; MAYER, F. D.; CASTELLANELLI, M.; HOFFMANN, R. Estudo do biodiesel com fonte de energia em geradores diesel no horário de ponta. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 4., 2007, Resende. **Anais...** Resende: AEDB, 2007. P.1-9.

COSTA, Y. J. R. Análise energética e exergética de um Motor de Combustão Interna operando com mistura de diesel e gás natural. Campina Grande. 2007

CASTELLANELLI, M.; SOUZA, S. N. M.; SILVA, S. L.; KAILER, E. K. Desempenho de motor ciclo diesel em bancada dinamométrica utilizando misturas diesel/biodiesel. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.145-153, 2008.

FERREIRA, S. L.; SANTOS, A. M.; SOUZA, G. R.; POLITO, W. L.; MÓDOLO, D. L. Análise por cromatografia gasosa de BTEX nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (B10). **Química nova**, São Paulo, v. 31, n. 3, outubro. 2008.

MAZIERO, J. V. G.; CORRÊA, I. M.; ÚNGARO, M. R.; BERNARDI, J. A.; STORINO, M. Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de bruto de gira sol. **R. Bras. Agrocência**, Pelotas, v. 13, n. 2, abr/jun. 2007.

SANTOS, M. A.; MATAI, P. H. L. S. Aspectos técnicos e ambientais relativos ao uso de biodiesel em motores de combustão. **InterfacEHS**, v. 3, p. 1-18, 2008

SANTOS, D.C.; PEIXOTO, L. B.; TORRES, E. A. Análise de Emissões e de Consumo Específico de um Motor Diesel Operando com Biodiesel de Soja e de Óleos e Gorduras Residuais. CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL. Brasília, 2007.

SILVA, F. M. da; LOPES, A.; CASTRO NETO, P.; DABDOUB, M. J.; SALVADOR, N.; SILVA, R. P. da. Desempenho do motor de combustão alimentado com diesel, B50 e B100. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 1., 2004, Varginha.

VAN WYLEN, G. J; SONNTAG, R. E; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 6 .ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2003.

VENTURI, V.; MENEZES, E. W.; SILVA, R.; CATULÑA, R. Relação ar/combustível e consumo específico para formulação de diesel/biodiesel. REUNIÃO ANUAL SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA. 30., 2007, Aguas de Lindoia, 2007.

VOLPATO, C. E. S.; CONDE, A. P.; BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B100). **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125-1130, 2009.

WILHELM, H. M; PENTEADO, R. A. N.; SILVA, E. L.; KRUGER, E. A.; REMPEL, D.; CUNHA, R. B. C.; VENTURA, V. G.; KERECH, A.; ARAÚJO, C. R.; STORTI, S.; NETO, P. R. C.; Ramos, L. P. Avaliação do Desempenho de Misturas de Biodiesel em Motor do Ciclo Diesel para Aplicação em Geração de Energia Elétrica. CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL.2., Brasília, 27-29/11/2007.

**ANEXO**

## Anexo 1 – Tabelas de propriedades

**TABELA A.9**  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$ ) base molar

$T$ (K)	Nitrogênio diatômico ( $\text{N}_2$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 0 \text{ kJ/kmol}$ $M = 28,013 \text{ kg/kmol}$		Nitrogênio monatômico (N) $\bar{h}_{f,298}^0 = 472\,680 \text{ kJ/kmol}$ $M = 14,007 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K
0	-8670	0	-6197	0
100	-5768	159,812	-4119	130,593
200	-2857	179,985	-2040	145,001
298	0	191,609	0	153,300
300	54	191,789	38	153,429
400	2971	200,161	2117	159,409
500	5911	206,740	4196	164,047
600	8894	212,177	6274	167,837
700	11937	216,865	8353	171,041
800	15046	221,016	10431	173,816
900	18223	224,757	12510	176,265
1000	21463	228,171	14589	178,455
1100	24760	231,314	16667	180,436
1200	28109	234,227	18746	182,244
1300	31503	236,943	20825	183,908
1400	34936	239,487	22903	185,448
1500	38405	241,881	24982	186,883
1600	41904	244,139	27060	188,224
1700	45430	246,276	29139	189,484
1800	48979	248,304	31218	190,672
1900	52549	250,234	33296	191,796
2000	56137	252,075	35375	192,863
2200	63362	255,518	39534	194,845
2400	70640	258,684	43695	196,655
2600	77963	261,615	47860	198,322
2800	85323	264,342	52033	199,868
3000	92715	266,892	56218	201,311
3200	100134	269,286	60420	202,667
3400	107577	271,542	64646	203,948
3600	115042	273,675	68902	205,164
3800	122526	275,698	73194	206,325
4000	130027	277,622	77532	207,437
4400	145078	281,209	86367	209,542
4800	160188	284,495	95457	211,519
5200	175352	287,530	104843	213,397
5600	190572	290,349	114550	215,195
6000	205848	292,984	124590	216,926

**TABELA A.9 (continuação)**  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$ ) base molar

$T$ (K)	Oxigênio diatômico ( $\text{O}_2$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 0 \text{ kJ/kmol}$ $M = 21,999 \text{ kg/kmol}$		Oxigênio monatômico (O) $\bar{h}_{f,298}^0 = 249\,170 \text{ kJ/kmol}$ $M = 16,00 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$s_f^0$ kJ/kmol K
0	-8683	0	-6725	0
100	-5777	173,308	-4518	135,947
200	-2868	193,483	-2186	152,153
298	0	205,148	0	161,059
300	54	205,329	41	161,194
400	3027	213,873	2207	167,431
500	6086	220,693	4343	172,198
600	9245	226,450	6462	176,060
700	12499	231,465	8570	179,310
800	15836	235,920	10671	182,116
900	19241	239,931	12767	184,585
1000	22703	243,579	14860	186,790
1100	26212	246,923	16950	188,783
1200	29761	250,011	19039	190,600
1300	33345	252,878	21126	192,270
1400	36958	255,556	23212	193,816
1500	40600	258,068	25296	195,254
1600	44267	260,434	27381	196,599
1700	47959	262,673	29464	197,862
1800	51674	264,797	31547	199,053
1900	55414	266,819	33630	200,179
2000	59176	268,748	35713	201,247
2200	66770	272,366	39878	203,232
2400	74453	275,708	44045	205,045
2600	82225	278,818	48216	206,714
2800	90080	281,729	52391	208,262
3000	98013	284,466	56574	209,706
3200	106022	287,050	60767	211,058
3400	114101	289,499	64971	212,332
3600	122245	291,826	69190	213,538
3800	130447	294,043	73424	214,682
4000	138705	296,161	77675	215,773
4400	155374	300,133	86234	217,812
4800	172240	303,801	94873	219,691
5200	189312	307,217	103592	221,435
5600	206618	310,423	112391	223,066
6000	224210	313,457	121264	224,597

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

**TABELA A.9** (continuação)  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$  base molar

$T$ (K)	Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = -393\,522 \text{ kJ/kmol}$ $M = 44,01 \text{ kg/kmol}$		Monóxido de carbono (CO) $\bar{h}_{f,298}^0 = 110\,527 \text{ kJ/kmol}$ $M = 28,01 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
	0	-9364	0	-8671
100	-6457	179,010	-5772	165,852
200	-3413	199,976	-2860	186,024
298	0	213,794	0	197,651
300	69	214,024	54	197,831
400	4003	225,314	2977	206,240
500	6305	234,902	5932	212,833
600	12906	243,284	8942	218,321
700	17754	250,752	12021	223,067
800	22806	257,496	15174	227,277
900	28030	263,646	18397	231,074
1000	33397	269,299	21686	234,538
1100	38885	274,528	25031	237,726
1200	44473	279,390	28427	240,679
1300	50148	283,931	31867	243,431
1400	55895	288,190	35343	246,006
1500	61705	292,199	38852	248,426
1600	67569	295,984	42388	250,707
1700	73480	299,567	45948	252,866
1800	79432	302,969	49529	254,913
1900	85420	306,207	53128	256,860
2000	91439	309,294	56743	258,716
2200	103562	315,070	64012	262,182
2400	115779	320,384	71326	265,361
2600	128074	325,307	78679	268,302
2800	140435	329,887	86070	271,044
3000	152853	334,170	93504	273,607
3200	165321	338,194	100962	276,012
3400	177836	341,988	108440	278,279
3600	190394	345,576	115938	280,422
3800	202990	348,981	123454	282,454
4000	215624	352,221	130989	284,387
4400	240992	358,266	146108	287,989
4800	266488	363,812	161285	291,290
5200	292112	368,939	176510	294,337
5600	317870	373,711	191782	297,167
6000	343782	378,180	207105	299,809

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

**TABELA A.9** (continuação)  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a  $0,1 \times \text{MPa}$  base molar

$T$ (K)	Água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) $\bar{h}_{f,298}^0 = -241\,826 \text{ kJ/kmol}$ $M = 18,015 \text{ kg/kmol}$		Hidroxila (OH) $\bar{h}_{f,298}^0 = 38\,987 \text{ kJ/kmol}$ $M = 17,007 \text{ kg/kmol}$	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
	0	-9904	0	-9172
100	-6617	152,386	-6140	149,591
200	-3282	175,488	-2975	171,592
298	0	188,835	0	183,709
300	62	189,043	55	183,894
400	3450	198,787	3034	192,466
500	6922	206,532	5991	199,066
600	10499	213,051	8943	204,448
700	14190	218,739	11902	209,008
800	18002	223,826	14881	212,984
900	21937	228,460	17889	216,526
1000	26000	232,739	20935	219,735
1100	30190	236,732	24024	222,680
1200	34506	240,485	27159	225,408
1300	38941	244,035	30340	227,955
1400	43491	247,406	33567	230,347
1500	48149	250,620	36838	232,604
1600	52907	253,690	40151	234,741
1700	57757	256,631	43502	236,772
1800	62693	259,452	46890	238,707
1900	67706	262,162	50311	240,556
2000	72788	264,769	53763	242,328
2200	83153	269,706	60751	245,659
2400	93741	274,312	67840	248,743
2600	104520	278,625	75018	251,614
2800	115463	282,680	82268	254,301
3000	126548	286,504	89585	256,825
3200	137756	290,120	96960	259,205
3400	149073	293,550	104388	261,456
3600	160484	296,812	111864	263,592
3800	171981	299,919	119382	265,625
4000	183552	302,887	126940	267,563
4400	206892	308,448	142165	271,191
4800	230456	313,573	157522	274,531
5200	254216	318,328	173002	277,629
5600	278161	322,764	188598	280,518
6000	302295	326,926	204309	283,227



**TABELA A.9** (continuação)  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Hidrogênio (H <sub>2</sub> ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 0$ kJ/kmol $M = 2,016$ kg/kmol		Hidrogênio monatômico (H) $\bar{h}_{f,298}^0 = 217\,999$ kJ/kmol $M = 1,008$ kg/kmol	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
	0	-8467	0	-6197
100	-5467	100,727	-4119	92,009
200	-2774	119,410	-2040	106,417
298	0	130,678	0	114,716
300	53	130,856	38	114,845
400	2961	139,219	2117	120,825
500	5883	145,738	4196	125,463
600	8799	151,078	6274	129,253
700	11730	155,609	8353	132,457
800	14681	159,554	10431	135,233
900	17657	163,060	12510	137,681
1000	20663	166,225	14589	139,871
1100	23704	169,121	16667	141,852
1200	26785	171,798	18746	143,661
1300	29907	174,294	20825	145,324
1400	33073	176,637	22903	146,865
1500	36281	178,849	24982	148,299
1600	39533	180,946	27060	149,640
1700	42826	182,941	29139	150,900
1800	46160	184,846	31218	152,089
1900	49532	186,670	33296	153,212
2000	52942	188,419	35375	154,279
2200	59865	191,719	39532	156,260
2400	66915	194,789	43689	158,069
2600	74082	197,659	47847	159,732
2800	81355	200,355	52004	161,273
3000	88725	202,898	56161	162,707
3200	96187	205,306	60318	164,048
3400	103736	207,593	64475	165,308
3600	111367	209,773	68633	166,497
3800	119077	211,856	72790	167,620
4000	126864	213,851	76947	168,687
4400	142658	217,612	85261	170,668
4800	158730	221,109	93576	172,476
5200	175057	224,379	101890	174,140
5600	191607	227,447	110205	175,681
6000	208332	230,322	118519	177,114

**TABELA A.9** (continuação)  
Propriedades de várias substâncias (gases ideais, entropias a 0,1 × MPa) base molar

T (K)	Óxido nítrico (NO) $\bar{h}_{f,298}^0 = 90\,291$ kJ/kmol $M = 30,006$ kg/kmol		Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ) $\bar{h}_{f,298}^0 = 33\,100$ kJ/kmol $M = 46,005$ kg/kmol	
	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K	$(\bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0)$ kJ/kmol	$\bar{s}_T^0$ kJ/kmol K
	0	-9192	0	-10186
100	-6073	177,031	-6861	202,563
200	-2951	198,747	-3495	225,852
298	0	210,759	0	240,034
300	55	210,943	68	240,263
400	3040	219,529	3927	251,342
500	6059	226,263	8099	260,638
600	9144	231,886	12555	268,755
700	12308	236,762	17250	275,988
800	15548	241,088	22138	282,513
900	18858	244,985	27180	288,450
1000	22229	248,536	32344	293,889
1100	25653	251,799	37606	298,904
1200	29120	254,816	42946	303,551
1300	32626	257,621	48351	307,876
1400	36164	260,243	53808	311,920
1500	39729	262,703	59309	315,715
1600	43319	265,019	64846	319,289
1700	46929	267,208	70414	322,664
1800	50557	269,282	76008	325,861
1900	54201	271,252	81624	328,898
2000	57859	273,128	87259	331,788
2200	65212	276,632	98578	337,182
2400	72606	279,849	109948	342,128
2600	80034	282,822	121358	346,695
2800	87491	285,585	132800	350,934
3000	94973	288,165	144267	354,890
3200	102477	290,587	155756	358,597
3400	110000	292,867	167262	362,085
3600	117541	295,022	178783	365,378
3800	125099	297,065	190316	368,495
4000	132671	299,007	201860	371,456
4400	147857	302,626	224973	376,963
4800	163094	305,940	248114	381,997
5200	178377	308,998	271276	386,632
5600	193703	311,838	294455	390,926
6000	209070	314,488	317648	394,926

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

## Anexo 2 – Tabelas de propriedades

**TABELA A.10**  
Entalpia de formação e entropia absoluta de várias substâncias a 25°C e 100 kPa

Substância	Fórmula	<i>M</i>	Estado	$\bar{h}_f^\circ$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol K
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	gás	+226 731	200,958
Água	H <sub>2</sub> O	18,015	gás	-241 826	188,834
Água	H <sub>2</sub> O	18,015	líquido	-285 830	69,950
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,031	gás	-45 720	192,572
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,114	gás	+82 980	269,562
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,124	gás	-126 200	306,647
Carbono (grafita)	C	12,011	sólido	0	5,740
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44,010	gás	-393 522	213,795
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	64,059	gás	-296 842	249,212
Enxofre	S	32,06	sólido	0	32,056
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,070	gás	-84 740	229,597
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	gás	-235 000	282,444
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	líquido	-277 380	160,554
Eteno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	gás	+52 467	219,330
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100,205	gás	-187 900	427,805
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,178	gás	-167 300	387,979
Metano	CH <sub>4</sub>	16,043	gás	-74 873	186,251
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	gás	-201 300	239,709
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	líquido	-239 220	126,809
Monóxido de carbono	CO	28,011	gás	-110 527	197,653
Nitrometano	CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub>	61,04	líquido	-113 100	171,80
<i>n</i> -Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,232	gás	-208 600	466,514
<i>n</i> -Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,232	líquido	-250 105	360,575
Óxido de Nitrogênio	N <sub>2</sub> O	44,013	gás	+82 050	219,957
Ozônio	O <sub>3</sub>	47,998	gás	+142 674	238,932
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,151	gás	-146 500	348,945
Peróxido de hidrogênio	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	34,015	gás	-136 106	232,991
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,094	gás	-103 900	269,917
Propeno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,081	gás	+20 430	267,066
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	80,058	gás	-395 765	256,769
T-T-Diesel	C <sub>14,4</sub> H <sub>24,9</sub>	198,06	líquido	-174 000	525,90

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).

## Anexo 3 – Tabelas de propriedades

**TABELA A.5**  
Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa\*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p0}$ kJ/kg K	$C_{v0}$ kJ/kg K	$k = C_p/C_v$
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H <sub>2</sub> O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	44,01	0,1889	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,400
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	0,2765	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH <sub>4</sub>	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44,013	0,1889	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,23	0,0727	0,092	1,7113	1,638	1,044
Oxigênio	O <sub>2</sub>	31,999	0,2598	1,292	0,9216	0,662	1,393
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,094	0,1886	1,808	1,679	1,490	1,126
R-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120,914	0,06876	4,98	0,616	0,547	1,126
R-22	CHClF <sub>2</sub>	86,469	0,09616	3,54	0,658	0,562	1,171
R-32	CF <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	52,024	0,1598	2,125	0,822	0,662	1,242
R-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	120,022	0,06927	4,918	0,791	0,722	1,097
R-134a	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	102,03	0,08149	4,20	0,852	0,771	1,106
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	64,059	0,1298	2,618	0,624	0,494	1,263
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	80,053	0,10386	3,272	0,635	0,531	1,196

Fonte: Borgnakke e Sonntag (2009).