



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ALANDERSON ARTHU ARAÚJO ALVES**

**PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE MISTURAS DE BIODIESEL E PETRO-  
DIESEL EM ALTAS PRESSÕES E ALTAS TEMPERATURAS E UM NOVO  
MODELO PARA PREVER O EFEITO DA PRESSÃO NA DENSIDADE**

**FORTALEZA-CE**

**2022**

ALANDERSON ARTHU ARAÚJO ALVES

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE MISTURAS DE BIODIESEL E PETRO-  
DIESEL EM ALTAS PRESSÕES E ALTAS TEMPERATURAS E UM NOVO MODELO  
PARA PREVER O EFEITO DA PRESSÃO NA DENSIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestrado em  
Engenharia Química. Área de concentração:  
Processos Químicos e Bioquímicos

Orientador: Prof. Dr. Hosiberto Batista de  
Sant'Ana.

Coorientador: Prof. Dr. Filipe Xavier Feitosa

FORTALEZA-CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A477p Alves, Alanderson Arthu Araújo.  
Propriedades termodinâmicas de misturas de biodiesel e petro-diesel em altas pressões e altas temperaturas e um novo modelo para prever o efeito da pressão na densidade / Alanderson Arthu Araújo Alves. – 2022.  
154 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Hosiberto Batista de Sant'Ana.  
Coorientação: Prof. Dr. Filipe Xavier Feitosa.
1. Novo modelo. 2. Mistura petro-diesel e biodiesel. 3. Densidade em alta pressão e alta temperatura. 4. Propriedades termodinâmicas.. I. Título.
- 

CDD 660

ALANDERSON ARTHU ARAÚJO ALVES

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DE MISTURAS DE BIODIESEL E PETRO-  
DIESEL EM ALTAS PRESSÕES E ALTAS TEMPERATURAS E UM NOVO MODELO  
PARA PREVER O EFEITO DA PRESSÃO NA DENSIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestrado em  
Engenharia Química. Área de concentração:  
Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Hosiberto Batista de Sant'Ana (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Frederico Ribeiro do Carmo  
Universidade Federal do Semi-Árido (UFERSA)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Roberta Ceriani  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

A Deus.

Aos meus pais, Arinaldo Alves e Maria Liliene  
Santos de Araújo Alves.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me servido como base para toda essa difícil caminhada, e por ter me concedido toda a sabedoria, motivação e força para conquistar os meus objetivos. Agradeço também aos meus pais, Arinaldo Alves e Maria Liliane Santos de Araújo Alves, por todo o carinho, amor, atenção e principalmente por ter me dado todo o estudo e a educação necessária, pois sem isso, não teria chegado até aqui. Agradeço também aos meus avós paternos e a minha avó materna, Cremilda Francisca dos Santos, por todo o apoio e força. Aos meus irmãos Arinaldo Alves Filho e Amanda Luanna de Araújo Alves, por me conceder toda a ajuda necessária. A Thais Oliveira, por todo o apoio, carinho, motivação e ajuda nos momentos difíceis dessa jornada, muito obrigado.

Também agradeço aos meus amigos e companheiros Maxwell Silva, Peterson Yamagushi, Hugo Anderson e Lucas Henrique que dividiram momentos únicos nesta passagem pelo GPTA e que sempre que precisei me deram toda a ajuda e suporte necessário. Agradeço também ao professor e amigo Frederico Ribeiro do Carmo, por todo o tempo concedido a pesquisa e por toda sua ajuda durante minha graduação, além das ótimas sugestões dadas durante a minha qualificação e defesa.

À professora Dr<sup>a</sup>. Regiane Silva Pinheiro, por todas as sugestões atribuídas durante a minha qualificação.

À professora Dr<sup>a</sup>. Roberta Ceriani, por todas as sugestões concedidas durante a minha defesa.

Agradeço imensamente aos professores, coordenadores do GPTA Prof. Dr. Hosiberto Batista de Sant'Ana e Prof. Dr. Filipe Xavier Feitosa pela excelente orientação, paciência e companheirismo nessa jornada. À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Por fim, a todos que contribuíram de qualquer forma para a realização deste trabalho.

*“Concentre todos seus pensamentos na tarefa que está realizando. Os raios de sol não queimam até que sejam colocados em foco”*

Alexander Graham Bell

## RESUMO

A redução das emissões de gases do efeito estufa tem sido a principal motivação para impulsionar o aumento da produção e da participação dos biocombustíveis na matriz energética de transporte. Em relação ao petro-diesel, o biodiesel aparece como seu substituto mais viável até o momento. Diante disso, pesquisas que relatem o comportamento destes combustíveis foram intensificadas nas últimas décadas. O uso do biodiesel e suas misturas com o petro-diesel podem ser utilizados como combustíveis nos motores diesel existentes. Porém, para melhor prever o desempenho do motor e buscar um aumento em sua eficiência, o conhecimento das propriedades termofísicas frente a variações operacionais apresentadas são de suma importância. Nesse sentido, a densidade tem papel importante no que tange os processos de injeção e combustão nos motores de ciclo diesel. Assim, baseado na equação de estado de Murnaghan, o presente trabalho reporta um novo modelo para prever o efeito da pressão sobre a densidade de misturas entre petro-diesel e biodiesel, tendo como dados de entrada a densidade em função da temperatura e a composição volumétrica dos componentes presentes na mistura. Adicionalmente, este trabalho também apresenta novos dados de densidade em altas pressões (0,10 – 100,00 MPa) e altas temperaturas (293,15 - 413,15 K) de misturas entre petro-diesel e três diferentes biodieséis (semente de uva, linhaça e milho), varrendo as composições de biodiesel em uma mistura de 0, 20, 40, 60, 80 e 100 %v/v, totalizando 1344 dados de densidade para estas misturas. Além disso, os dados experimentais de densidade foram correlacionados com a equação de Tammann-Tait, obtendo-se as seguintes propriedades termodinâmicas: compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ), expansibilidade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ) e a diferença entre a capacidade térmica a constante pressão e volume ( $c_p - c_v$ ). Por fim, com o modelo proposto, os dados de densidade experimental obtidos neste trabalho, juntamente com os dados experimentais coletados na literatura, foram submetidos a testes de comparação (para validação) entre o valor previsto pelo modelo e o valor experimental, obtendo-se desvios relativos absolutos (% DMRA) menores que 0,50 %, valor próximo a incerteza experimental das medidas de densidade.

### **Palavras-chave:**

Novo modelo; Mistura petro-diesel e biodiesel; Densidade em alta pressão e alta temperatura; Propriedades termodinâmicas.



## ABSTRACT

Reducing greenhouse gas emissions has been the main motivation to drive increased production and the participation of biofuels in the energy matrix of transport. In relation to petro-diesel, biodiesel appears as its most viable substitute so far. That said, research that report the behavior of these fuels have been intensified in the last decades. The use of biodiesel and its blends with petro-diesel can be used as fuels in existing diesel engines. However, to better predict the engine performance and seek an increase in its efficiency, the knowledge of the thermophysical properties in the face of operational variations presented are of paramount importance. In this sense, density plays an important role in the injection and combustion processes in diesel cycle engines. Thus, based on the Murnaghan equation of state, the present work reports a new model to predict the effect of pressure on the density of mixtures between petro-diesel and biodiesel, having as input data the density as a function of temperature and the volumetric composition of the components present in the mixture. Additionally, this work also presents new experimental data set for biodiesel (grape seed, corn, and linseed) + petro-diesel, at high pressure (0.10 – 100.00 MPa) and high temperature (293.15 – 413.15 K) in a composition range of 0, 20, 40, 60, 80, and 100 %v/v, totaling 1344 density data for these mixtures. Furthermore, data experiencing density was correlated with the Tammann-Tait addition connection obtaining the following thermodynamic properties: isothermal compressibility ( $\kappa_T$ ), isobaric thermal expansibility ( $\alpha_p$ ), internal pressure ( $p_{int}$ ) and the difference between pressure and volume heat capacities ( $c_p - c_v$ ). Lastly, to test the proposed model, the experimental density data obtained in this work, together with the experimental data collected in the literature, they were submitted to tests of comparison (for validation) between the predicted value by the model and the experimental value, with smaller absolute relative deviations (% AARD) a 0,50 %, value close to the experimental uncertainty of density measurements.

### Keywords:

New model; Petro-diesel and biodiesel blends; Density high pressure and high temperature; Thermodynamic properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço energético nacional para o setor de transportes rodoviário entre 2017 e 2019. .....	34
Figura 2 – Ilustração das rotas reacionais de transesterificação do biodiesel, com a utilização do metanol e etanol. ....	36
Figura 3 - Principais matérias-primas do biodiesel utilizadas no Brasil por disponibilidade de região.....	37
Figura 4 - Ciclo de carbono do biodiesel. ....	38
Figura 5 - Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no petro-diesel no Brasil ....	39
Figura 6 - Funcionamento de um motor diesel de quatro tempos. ....	40
Figura 7 - Esquema metodológico para obtenção das propriedades derivativas a partir da equação de Tammann-Tait, compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e a expansividade térmica isobárica ( $\alpha_P$ ) pressão interna ( $p_{int}$ ) e a diferença de capacidades de calor específicas em pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ). ....	46
Figura 8 - Esquema metodológico para preparo da mistura Petro-diesel e Biodiesel. ....	50
Figura 9 - Sistema para a medição experimental da densidade. ....	51
Figura 10 - Esquema metodológico para obtenção da compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e incerteza expandida da propriedade.....	54
Figura 11 - Densidade em função da pressão para sistemas de biodieséis e petro-diesel estudados. Cada gráfico apresentado reporta dados para misturas biodieséis + petro-diesel. Onde: (a) Bio 100 – PD 0 (semente de uva), (b) Bio 60 – PD 40 representam o sistema de biodiesel de semente de uva. (c) Bio 100 – PD 0 (milho), (d) Bio 60 – PD 40 representam o sistema de biodiesel de milho. (e) Bio 100 – PD 0 (linhaça), (e) Bio 60 – PD 40 representam o sistema de biodiesel de linhaça. Por fim, (g) Bio 0 – PD 100. Para as temperaturas: (*) 413,15 K, (●) 393,15 K, (◆) 373,15 K, (▲) 353,15 K, (■) 333,15 K, (×) 313,15 K, e (□) 293,15 K. .....	60

Figura 12 - Gráficos da densidade experimental em relação a pressão à temperatura constante  $T = 293,15 \text{ K}$ . Gráfico (a): para as misturas biodiesel + petro-diesel. (×) Bio 5 – PD 95, (\*) Bio 10 – PD 90 e (□) Bio 20 – PD 80. Gráfico (b): para petro-diesel (○) Bio 0 – PD 100. .... 61

Figura 13 – Compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) em função da pressão para três misturas de biodiesel e petro-diesel (40 % vol de biodiesel). Os símbolos representam a compressibilidade calculada pelo método de Tammann-Tait e as linhas pontilhadas por metodologia de Daridon e Bazile (2018). (a) biodiesel de semente de uva, (b) biodiesel de milho, e (c) biodiesel de linhaça. (\*, - - -) 413,15 K, (●, - - -) 393,15 K, (◆, - - -) 373,15 K, (▲, - - -) 353,15 K, (■, - - -) 333,15 K, (×, - - -) 313,15 K e (□, - - -) 293,15 K. .... 64

Figura 14 - Expansividade térmica isobárica ( $\alpha_P$ ) em função da pressão para diferentes misturas de biodiesel e petro-diesel. Símbolos e linhas representam expansividades térmicas isobáricas. (a) Bio 0 – PD100, (b) Bio 20 – PD 80 (c) Bio 40 – PD 60, (d) Bio 60 – PD 40, (e) Bio 80 – PD 20, (f) Bio 100 – PD 0, para o biodiesel de linhaça. (\*) 413,15 K, (●) 393,15 K, (◆) 373,15 K, (▲) 353,15 K, (■) 333,15 K, (×) 313,15 K, e (□) 293,15 K. Linhas são para guiar visão..... 66

Figura 15 - Pressão interna ( $P_{int}$ ) em função da pressão para as misturas (a) Bio 0 – PD 100 e (b) Bio 80 – PD 20, para o sistema de biodiesel de linhaça. Para as temperaturas: (\*) 413,15 K, (●) 393,15 K, (◆) 373,15 K, (▲) 353,15 K, (■) 333,15 K, (×) 313,15 K, e (□) 293,15 K... 67

Figura 16 - Desvios relativo em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto e os valores experimentais coletados da literatura e determinados experimentalmente neste trabalho. Símbolos pretos (□,○) refere-se ao Bio 05 - PD 95 e Bio 10 - PD 90 para Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018), símbolos azul (□) refere-se ao Bio 20 - PD 80 para Dzida e Prusakiewicz (2008), símbolos verdes (□,○) refere-se ao Bio 10 - PD 90 e Bio 20 - PD 80 para Ivaniš *et al.*(2016); e símbolos vermelhos (□, ◆, ○, △ ) refere-se ao Bio 20 – PD 80, Bio 40 – PD 60, Bio 60 – PD 40, e Bio 80 – PD 20 para os dados coletados neste trabalho, para o biodiesel de linhaça..... 70

Figura 17 - Gráficos da densidade experimental ( $\rho_{Exp}$ ) versus densidade calculada ( $\rho_{Calc}$ ) para dados experimentais de misturas de petro-diesel e biodiesel obtidos neste trabalho, calculados pelo modelo proposto. Gráficos à esquerda (a, c e e) representam erros relativos para Bio 20 – PD 80, Bio 40 – PD 60, Bio 60 – PD 40 e Bio 80 – PD 20. Gráficos à direita (b, d e f) mostram como as densidades calculadas são distribuídas aleatoriamente ao longo da diagonal  $\rho_{Calc} =$

$\rho_{Exp}$ . Linhas vermelhas pontilhadas (- - -) corresponde a  $\pm 0.50\%$  desvio relativo. Círculos verdes (●) representa o biodiesel de semente de uva, círculos amarelos (●) representa o biodiesel de milho, círculos marrons (●) representa o biodiesel de linhaça..... 72

Figura 18 - Teste de predição do modelo à altas pressões. Gráficos para sistema do biodiesel de semente de uva, círculos representam dados experimentais (●) composição Bio 80 – PD 20; (●) composição Bio 60 – PD 40; (○) composição Bio 40 – PD 60; (●) densidade experimental para um líquido regular qualquer. Linhas contínuas pontilhadas (---) representam dados preditos pelo modelo proposto nesta dissertação. .... 73

Figura 19 - Desvios relativos absolutos em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) para os valores de Bio 100 – PD 0 determinados experimentalmente neste trabalho. Círculos verdes (●) representa o biodiesel de semente de uva, círculos amarelos (●) representa o biodiesel de milho, círculos marrons (●) representa o biodiesel de linhaça..... 75

Figura 20 - Desvios relativos em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) (metodologia de Rackett-Soave-Tait) (●) e para o modelo proposto nesta dissertação (●). Para os dados de biodiesel de óleo de cozinha residual (Bio 100 – PD 0) determinados experimentalmente por Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018). .... 77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de medidas da densidade ( $\rho$ ).....	42
Tabela 2 - Informações químicas dos Biodieseis estudados neste trabalho. ....	48
Tabela 3 - Informações químicas do petro-deisel estudado neste trabalho. ....	49
Tabela 4 - Dados experimentais de densidade em alta pressão para diferentes petro-diesel, dados coletados na literatura e usados no conjunto de dados para correlacionar com o modelo.....	55
Tabela 5 - Dados experimentais de densidade em alta pressão para diferentes biodieseis, dados coletados na literatura e usados no conjunto de dados para correlacionar com o modelo.....	56
Tabela 6 – Parâmetros ajustáveis da equação de Tammann-Tait modificada para amostras de milho de semente de uva e biodiesel de linhaça aqui estudadas. ....	62
Tabela 7 - Dados da literatura, juntamente com os determinados neste trabalho, serviram para testar a capacidade preditiva do modelo aqui proposto. ....	68
Tabela 8 - Análises estatísticas (DP, DMA, %DMRA, bias) para previsão do efeito da pressão na densidade de misturas de biodiesel + petro-diesel. ....	69
Tabela 9 - Propriedades críticas e massa molar dos biodieseis estudados nesta dissertação, valores aplicados na estimativa da densidade HPHT pelo modelo proposto por Do Carmo <i>et al.</i> (2015). ....	75
Tabela 10 - Informações do biodiesel de óleo de cozinha residual, coletados por Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018). ....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>SMC</b>	Simulação de Monte Carlo
<b>PVT</b>	Pressão, Volume e Temperatura
<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<b>PDF</b>	Função Densidade de Probabilidade
<b>HPHT</b>	High pressure and High Temperature (alta pressão e alta temperatura)
<b>VA</b>	Válvula de admissão
<b>VD</b>	Válvula de descarga
<b>PMS</b>	Ponto morto superior
<b>PMI</b>	Ponto morto inferior
<b>EPE</b>	Empresa de Pesquisa Energética

## LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
%	Porcentagem
$\rho$	Densidade da amostra
$\rho_{ref}$	Densidade de referência
$T$	Temperatura
$P$	Pressão
$U$	Energia interna
$P_{atm}$	Pressão atmosférica
$P_{ref}$	Pressão de referência
$p_{int}$	Pressão interna
$V$	Volume
$\kappa_T$	Compressibilidade Térmica
$\alpha_P$	Expansividade Térmica
$c_p$	Capacidade calorífica a pressão constante
$c_v$	Capacidade calorífica a volume constante
$\rho^{Exp}$	Densidade experimental
$\rho^{Calc}$	Densidade calculada
$U(\kappa_T)$	Incerteza da compressibilidade térmica

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>32</b>
<i>1.1.1 Objetivos específicos</i> .....	<i>32</i>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1 ÓLEO DIESEL</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1.1 Tipos de óleo diesel</b> .....	<b>34</b>
<i>2.1.1.1 Óleo diesel S10 e S50</i> .....	<i>34</i>
<i>2.1.1.2 Óleo diesel S500</i> .....	<i>35</i>
<i>2.1.1.3 Óleo diesel TFM (S1800)</i> .....	<i>35</i>
<i>2.1.1.4 Óleo diesel marítimo</i> .....	<i>35</i>
<b>2.1.2 Principais características e especificações do óleo diesel</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2 BIODIESEL</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.1 Adição do biodiesel no petro-diesel</b> .....	<b>39</b>
<b>2.2.2 Principais características e especificações do biodiesel</b> .....	<b>40</b>
<b>2.3 MOTOR DIESEL</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA DENSIDADE HPHT</b> .....	<b>41</b>
<b>2.5 EQUAÇÃO DO TIPO TAIT</b> .....	<b>43</b>
<b>2.6 MÉTODO DE MONTE CARLO</b> .....	<b>46</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>48</b>
<b>3.1 Materiais</b> .....	<b>48</b>
<b>3.2 Preparo da mistura biodiesel e petro-diesel</b> .....	<b>49</b>
<b>3.3 Aparatos e procedimento experimental</b> .....	<b>50</b>
<i>3.3.1. Descrição do procedimento experimental</i> .....	<i>52</i>
<b>3.4 Procedimento para cálculo da compressibilidade isotérmica (<math>\kappa_T</math>) e incerteza padrão (<math>U_{\kappa_T}</math>)</b> .....	<b>52</b>



<b>3.5. Metodologia para a proposição do modelo para prever o efeito da pressão na densidade de misturas biodiesel + petro-diesel .....</b>	<b>54</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 Análise dos dados de densidade HPHT .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 Propriedades Derivadas .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3 Validação de modelo para predição de densidade de misturas de biodiesel e petro-diesel .....</b>	<b>67</b>
<i>4.3.1 Comparativo entre modelos com diferentes abordagens. Modelo proposto nesta dissertação e modelo desenvolvido por Do Carmo et al. (2015) .....</i>	<i>73</i>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES PARA DIESEL.....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS OBTIDOS PELO AJUSTE DA EQUAÇÃO DE MURNAGHAN PARA OS COMPONENTES DA MISTURA (PETRO-DIESEL E BIODIESEL) QUE FORAM UTILIZADOS NA EQUAÇÃO (17) ONDE AS UNIDADES SÃO K PARA TEMPERATURA (T), MPa PARA PRESSÃO (P) E <math>\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math> PARA DENSIDADE (<math>\rho</math>).....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE C – DADOS EXPERIMENTAIS DE DENSIDADE HPHT PARA AS MISTURAS BIODIESEL + PETRO-DIESEL .....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE D - DADOS DAS PROPRIEDADES DERIVATIVAS .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE E – VALORES DA COMPRESSIBILIDADE TÉRMICA E SUA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA, CÁLCULO PELA METODOLOGIA DO DARIDON E BAZILE (2018).....</b>	<b>132</b>
<b>APÊNDICE F– INCERTEZA DAS PROPRIEDADES OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E CALCULADAS .....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE G – COMPOSIÇÕES MÁSSICAS DOS BODIESEIS CORRELACIONADO PARA O MODELO.....</b>	<b>150</b>
<b>ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DO ÓLEO DIESEL BX A B30 .....</b>	<b>151</b>
<b>ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES DO BIODIESEL.....</b>	<b>153</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a promulgação da Lei nº 13.576/2017, foi instituída a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), cujo principais objetivos, segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) inclui o reconhecimento do papel estratégico e a adequada expansão da produção e uso dos biocombustíveis na matriz energética brasileira. Além disso, o RenovaBio almeja assegurar a segurança energética e a mitigação das emissões de gases nocivos ao meio ambiente no setor de combustíveis, no curto, médio e longo prazos. Essa política tem por princípio impulsionar o desenvolvimento tecnológico e a inovação para aumento da competitividade dos biocombustíveis (sendo eles o etanol, o biodiesel, o biogás e o bioquerosene de aviação), bem como, a inserção e desenvolvimento de novos combustíveis (PAGEL; CAMPOS; CAROLINO, 2019)

Apesar de muitas discussões e questões levantadas, os combustíveis fósseis ocupam um papel importante em setores como o industrial, agrícola e transporte. O uso regular de combustíveis fósseis, como por exemplo gasolina e diesel causam problemas irreparáveis ao meio ambiente, além de uma redução branda em reservas de matéria-prima, deste material. Muitos governos vêm implementado medidas rigorosas para redução da utilização destes combustíveis, tais como a adoção de normas mais rígidas para gases de escape e incentivos para o uso de fontes de energia renovável, a fim de aumentar a substituição de combustíveis fósseis por substitutos menos agressivos ao meio ambiente. Uma solução para o setor de transportes que corrobora com as preocupações ambientais foi a inserção do biodiesel na matriz energética deste setor, devido ao seu alto potencial como substituinte ao combustível fóssil (AITBELALE *et al.*, 2019a; FERREIRA *et al.*, 2021; IVANIŠ *et al.*, 2016a).

Nas últimas décadas, o biodiesel tem ganhado atenção especial em pesquisas científicas (EVANGELISTA; DO CARMO; DE SANT'ANA, 2018; KNOTHE; KRAHL; GERPEN, 2010; PRATAS *et al.*, 2010), devido às suas inúmeras questões ambientais, tais como: redução da emissão de gases de efeito estufa e inclusão social em países subdesenvolvidos (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2007; GUPTA; DEMIRBAS, 2010). O biodiesel é uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa, produzidos a partir de óleos vegetais ou gorduras animais em reação de transesterificação com álcool (KNOTHE; GERPEN; KRAHL, 2005). As misturas de biodiesel e petro-diesel podem ser utilizadas indistintamente em motores de ciclo diesel devido à completa miscibilidade entre eles. Apesar disso, muitos países adotaram volume padrão de biodiesel com diesel, por

exemplo, no Brasil, a concentração de biodiesel varia de 8% em 2018 a 15% em 2023 (HOSSEINZADEH-BANDBAFHA *et al.*, 2018; THANGAMANI *et al.*, 2021).

Consequentemente, o conhecimento das propriedades termodinâmicas em alta pressão e alta temperatura (HPHT) é importante para o estudo da eficiência de combustão e também para o desenvolvimento e projetos de novos motores (MALIK *et al.*, 2021; TAT; VAN GERPEN, 2000) a título de exemplo: a densidade desempenha um papel importante no sistema de injeção de combustível (BOUDY; SEERS, 2009; DARIDON, 2020) e no fenômeno de atomização, que está relacionado ao tamanho da gota formada no momento da pulverização do combustível, na câmara de combustão (BARABÁS; TODORUȚ, 2009).

Misturas de biodiesel + petro-diesel foram amplamente estudadas em condições de pressões atmosféricas (ALPTEKIN; CANAKCI, 2008; BARABÁS; TODORUȚ, 2009; DAS *et al.*, 2018; MALIK *et al.*, 2021; MESQUITA *et al.*, 2014). No entanto, ainda há escassez de dados experimentais na literatura em condições experimentais de alta pressão e alta temperatura, em virtude de dificuldades técnico-experimentais. Por esta razão, o uso de modelos correlativos e/ou preditivos pode ser essencial para suprir tal carência de dados. Existem modelos para predição de densidade de componentes do biodiesel (ésteres) e hidrocarbonetos à pressão atmosférica (IHMEELS; GMEHLING, 2003; PRATAS *et al.*, 2011a).

Para condições operacionais HPHT, correlações do tipo Tait foram utilizadas por vários autores para descrever o comportamento da densidade de ésteres e biodieseis com a temperatura e pressão (AITBELALE *et al.*, 2019b; IVANIŠ *et al.*, 2016b; PRATAS *et al.*, 2011b; SCHEDEMANN *et al.*, 2013), outras literaturas sugerem metodologias preditivas para obtenção desta propriedade (DO CARMO *et al.*, 2015). Porém, metodologias que considerem misturas biodiesel + petro-diesel, ainda são pouco exploradas.

Recentemente, Daridon (2020) propôs um modelo capaz de prever o efeito da pressão sobre a densidade de ésteres do biodiesel, este com precisão de 0,05% para ésteres de metila de ácidos graxos e 0,04% para ésteres de etila de ácido graxo. É importante mencionar que este trabalho serviu de guia para o desenvolvimento do modelo aqui proposto.

Portanto, o objetivo deste trabalho é determinar a densidade de misturas biodiesel (semente de uva, milho e linhaça) + petro-diesel em altas pressões e altas temperaturas,  $P = 0,10$  a  $100,00$  MPa e  $T = 293,15$  a  $413,15$  K, ao longo de toda a faixa de composição. A partir desses dados, compressibilidade térmica ( $\kappa_T$ ), expansividade térmica isobárica ( $\alpha_P$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ), e diferença de capacidade térmica de pressão e volume ( $c_p - c_v$ ), foram determinados.

Adicionalmente, um novo modelo de previsão do efeito da pressão na densidade de misturas biodiesel + petro-diesel, é proposto.

## 1.1 Objetivo Geral

Obtenção experimental de densidade de misturas biodiesel (semente de uva, milho e linhaça) + petro-diesel em condições de altas pressões e altas temperaturas e o desenvolvimento de um modelo capaz de prever o efeito da pressão na densidade da mistura.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Determinar um novo conjunto de dados experimentais em condições de altas pressões e altas temperaturas para misturas de biodiesel + petro-diesel;
- Ajustar os dados de densidade obtidos experimentalmente em altas pressões e altas temperaturas utilizando uma equação do tipo Tammann-Tait;
- Calcular as propriedades derivadas como: compressibilidade térmica ( $\kappa_T$ ), expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ), e diferença de capacidade calorífica de pressão e volume ( $c_p - c_v$ );
- Analisar os efeitos da pressão, temperatura e proporções biodiesel/petro-diesel nas propriedades obtidas;
- Propor um novo modelo para prever o efeito da pressão na densidade da mistura biodiesel + petro-diesel.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

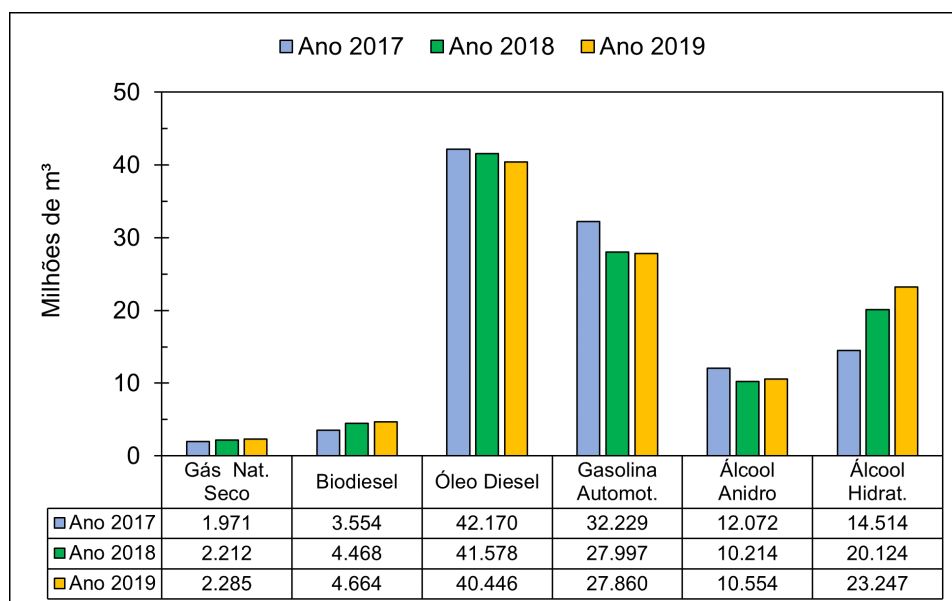
Nesta seção serão discutidos alguns tópicos, tais como: I) informações acerca do petro-diesel, além de suas especificações e tipos; II) informações sobre o biodiesel, especificações impostas por órgãos regulamentadores e legislações atribuídas para misturas biodieséis + petro-diesel; III) explanação sobre o processo de funcionamento de motores diesel; IV) determinação experimental da densidade; V) apresentação de metodologia para correlacionar dados de densidade.

### 2.1 ÓLEO DIESEL

O petróleo bruto é composto por uma mistura de hidrocarbonetos saturados (parafinas, iso-parafinas, naftenos), aromáticos, resinas e asfaltenos (BARKER, 1979), sendo detalhadamente estudado no curso dos séculos XX e XXI dada sua importância econômico-industrial (PEDERSEN *et al.*, 2006). O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, produzido a partir do seu refino, consistindo principalmente de hidrocarbonetos alifáticos contendo de 8-28 átomos de carbono com pontos de ebulição variando de 130 a 370 °C, constituído em maior proporção por carbono e hidrogênio, possui também em sua composição átomos de enxofre, nitrogênio, metais, oxigênio, entre outros compostos, todos estes em uma menor quantidade (PEDERSEN *et al.*, 2006; RIAZI, 2005).

Amplamente utilizado em veículos de elevada potência, tais como: caminhões, tratores, máquinas para mineração e dragagem, o diesel é o combustível que movimenta os setores de atividades, a saber: setores primários (agrícola) e secundários (industrial). Tal como aponta os dados recentemente publicados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), que pode ser observado na Figura 1, descrevendo uma análise para o setor de transportes rodoviários entre 2017 e 2019 (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2004).

Figura 1 - Balanço energético nacional para o setor de transportes rodoviário entre 2017 e 2019.



**Fonte:** Balanço energético nacional da empresa de políticas energéticas (EPE). Disponível em: <[www.epe.gov.br/](http://www.epe.gov.br/)>. Acessado em 30 de março de 2021.

A Figura 1 apresenta uma informação importante em relação ao consumo do óleo diesel, que foi a queda do seu consumo nesse período analisado. Essa queda pode estar associada ao aumento do consumo de biodiesel, em virtude da política de incentivo de uso do biodiesel adotada pelo governo federal, regulada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), (ANP, 2014, 2016, 2019).

### 2.1.1 Tipos de óleo diesel

Como citado anteriormente, o diesel pode ser aplicado como combustível em diversas máquinas e/ou meios de transportes, pois se trata de um combustível muito versátil. Para tal, há diversos tipos de diesel que podem ser comercializados, como descritos nas Seções abaixo:

#### 2.1.1.1 Óleo diesel S10 e S50

O óleo diesel S10 e S50 são combustíveis para veículos com motores ciclo Diesel com baixo teor de enxofre (S10: 10 ppm (parte por milhão) e S50: 50 ppm). E esta diferença entre ambos se dá por maiores restrições atribuídas pelos órgãos competentes. É utilizado essencialmente em veículos produzidos após 2012, que necessitam do uso de combustíveis mais puros para seu correto funcionamento. Além do baixo teor de enxofre, este óleo diesel se caracteriza por possuir coloração de incolor á amarelo, tem alto número de cetano (48 no

mínimo), uma faixa estreita de variação da densidade ( $820$  a  $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ ) e uma curva de destilação com a temperatura dos 95% evaporados de no máximo  $370^\circ\text{C}$ . Essas propriedades também conferem benefícios na combustão e na partida a frio dos motores (PETROBRAS, 2020).

#### *2.1.1.2 Óleo diesel S500*

Trata-se de um combustível para veículos com motores ciclo Diesel, com limite de enxofre especificado em  $500 \text{ ppm}$ , possui uma coloração vermelha e não recebe nenhum tipo de aditivo. Está disponível para comercialização na maior parte do país e pode ser utilizado em veículos produzidos anteriormente à 2012 (PETROBRAS, 2020).

#### *2.1.1.3 Óleo diesel TFM (S1800)*

Trata-se de um combustível para veículos com motores ciclo Diesel de uso não rodoviário, utilizado em usinas termoeletricas, mineração a céu aberto, transporte ferroviário, com limite de enxofre de  $1800 \text{ ppm}$ , de coloração amarela ou laranja, podendo conter traços de marrom e que não recebe nenhum tipo de aditivo em sua versão comum, já a versão extra aditivada recebe aditivos detergentes, dispersantes, antiespumantes e anticorrosivos (PETROBRAS, 2020).

#### *2.1.1.4 Óleo diesel marítimo*

Trata-se de um combustível para embarcações marítimas, com limite de enxofre de  $50000 \text{ ppm}$ , de coloração avermelhada e que não recebe nenhum tipo de aditivo, com ponto de fulgor de  $60^\circ\text{C}$  (PETROBRAS, 2020).

### **2.1.2 Principais características e especificações do óleo diesel**

Para a produção padrão entre todos os produtores, o óleo diesel é produzido de maneira a atender as especificações impostas pela ANP para implementar a política nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis, com ênfase na garantia do suprimento de derivados de petróleo, gás natural e seus derivados, e de biocombustíveis, em todo o território nacional, cujos valores são mostrados no **Anexo A** (ANP, 2014, 2016, 2019).

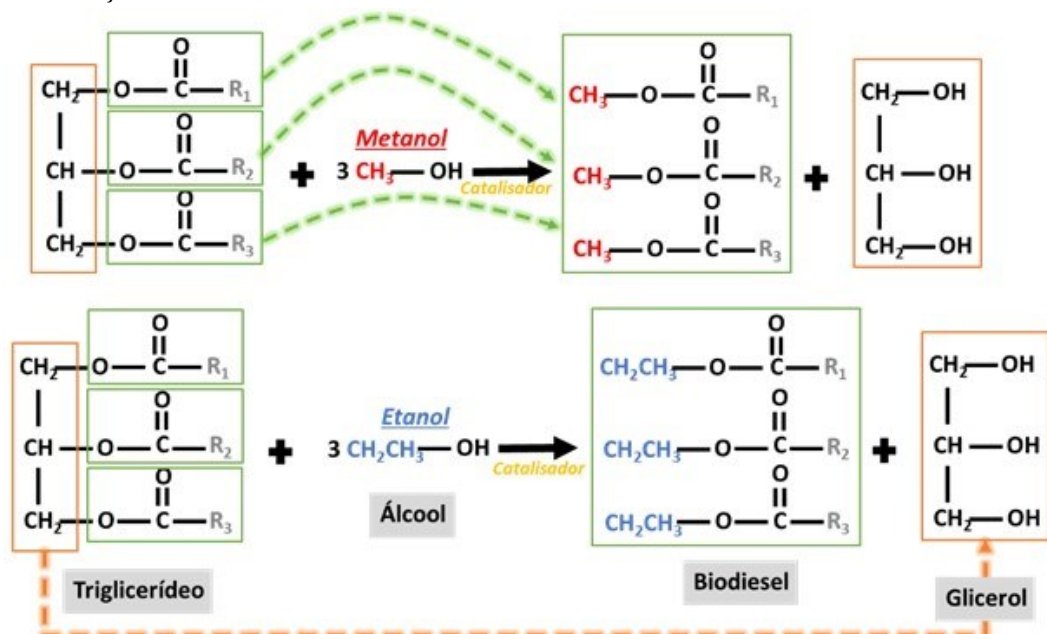
## **2.2 BIODIESEL**

O biodiesel é definido pela ANP como um combustível renovável obtido a partir de um processo químico denominado transesterificação, onde, 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. Os ésteres presentes no biodiesel possuem cadeias variadas, em decorrência do tipo do álcool utilizado e da matéria prima (biomassa) usada no processo (KNOTHE; GERPEN; KRAHL, 2005; PINTO *et al.*, 2005).

A rota mais convencional para a produção do biodiesel é a transesterificação termo geral usado para descrever uma importante classe de reações orgânicas na qual um éster é transformado em outro através da troca dos grupos alcóxidos. Durante esta reação, os triglicerídeos transformam-se em monoésteres de ácidos graxos, os quais compõem o biodiesel. Além disso, também surge o glicerol como um subproduto da reação. Para a produção de biodiesel, como já mencionado, o metanol ou etanol são os álcoois mais utilizados no processo. Vale salientar que todo o processo ocorre na presença de catalisadores de reação, que podem vir a ser ácidos ou bases (NOGUEIRA *et al.*, 2010a; VAN GERPEN, 2005). A Figura 2 mostra o mecanismo de transesterificação com a utilização de dois álcoois distintos, onde pode-se observar que o caráter do biodiesel é definido pela cadeia do álcool utilizado no processo e pela ramificação  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , dependente da biomassa utilizada no processo.

Figura 2 – Ilustração das rotas reacionais de transesterificação do biodiesel, com a utilização do metanol e etanol.



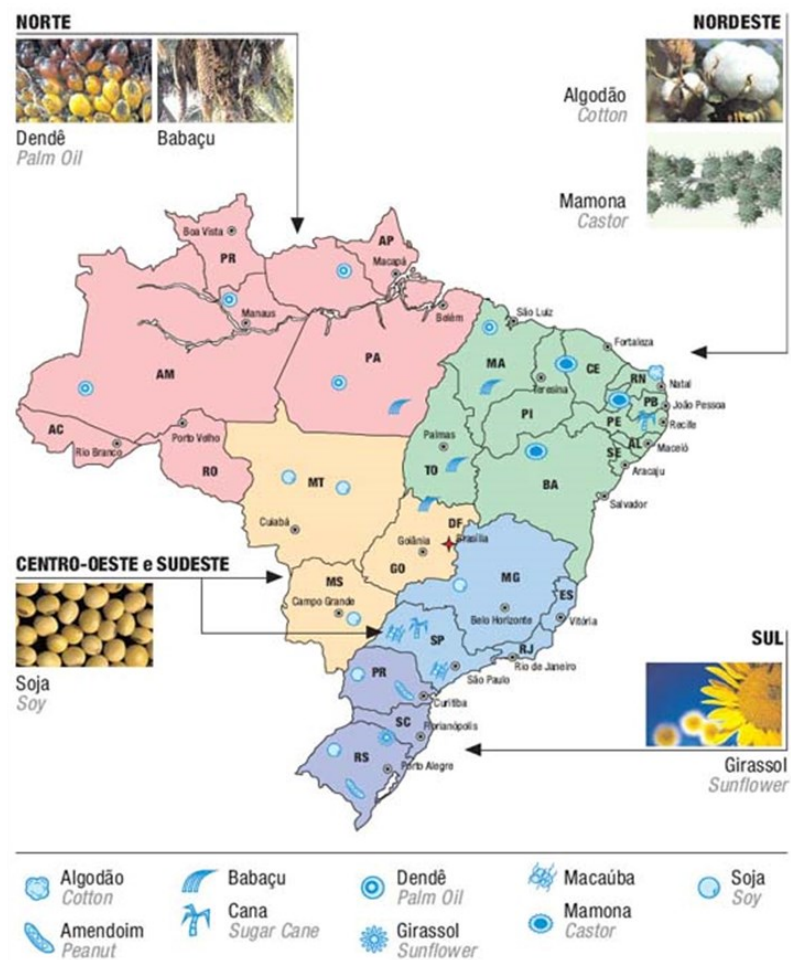
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As características da biomassa refletem no próprio biodiesel, como já mencionado, diferentes matérias-primas podem ser utilizadas para a produção do combustível. As principais fontes de triglicerídeos são óleos vegetais e gordura animal, porém existem outras fontes menos



comuns, que é o caso das bactérias, fungos, algas, entre outras (ATABANI *et al.*, 2012). A escolha da matéria-prima utilizada para a produção do biodiesel pode depender de alguns fatores, como rendimento, disponibilidade (abundância na região), custo, dentre outros. Algumas matérias-primas utilizadas no Brasil para a produção do combustível e suas respectivas regiões, estão dispostas na Figura 3.

Figura 3 - Principais matérias-primas do biodiesel utilizadas no Brasil por disponibilidade de região.

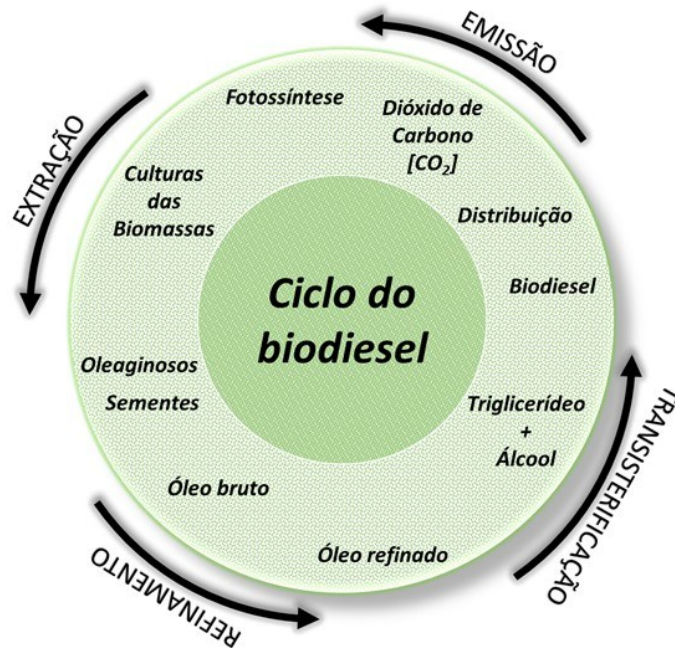


Fonte: BIODIESELBR, 2011. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/>>. Acessado em 29 de março de 2021.

O biodiesel é um combustível com grande potencial produtivo, socioeconômico e ecológico, isso pois ao se comparar com os combustíveis fósseis apresentam inúmeras vantagens, levando em consideração estes três pilares, a saber: produtivo, econômico e ambiental. Entre as principais vantagens do consumo do biodiesel é a menor emissão de gases poluentes, esse fato está intimamente ligado ao ciclo produtivo do biodiesel que ocorre de “maneira fechada”. Esta expressão está relacionada ao ciclo do carbono, onde na produção de

biodiesel, o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), que é produto da combustão realizada pelos motores, é captado de volta durante o cultivo da biomassa utilizada na produção, como ilustrado na Figura 4. Vale lembrar que para alguns estudiosos o CO<sub>2</sub> é um dos principais vilões do efeito estufa, revelando por si só a importância do pilar ambiental (GROSS, 2014; SILVA; FREITAS, 2008).

Figura 4 - Ciclo de carbono do biodiesel.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Porém relacionando a parte socioeconômica e produtiva, pode-se enxergar pontos positivos e negativos. Quanto aos aspectos positivos citam-se: abundância e diversidade de matérias-primas e a inclusão social que poderá ser advindo do cultivo (ou produção) de materiais oleaginosos (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2007). Já um ponto negativo é a competição entre produtores de biocombustíveis e indústrias de alimentos, pois as matérias-primas podem ser utilizadas em ambos os setores de atividades (HERRMANN *et al.*, 2018).

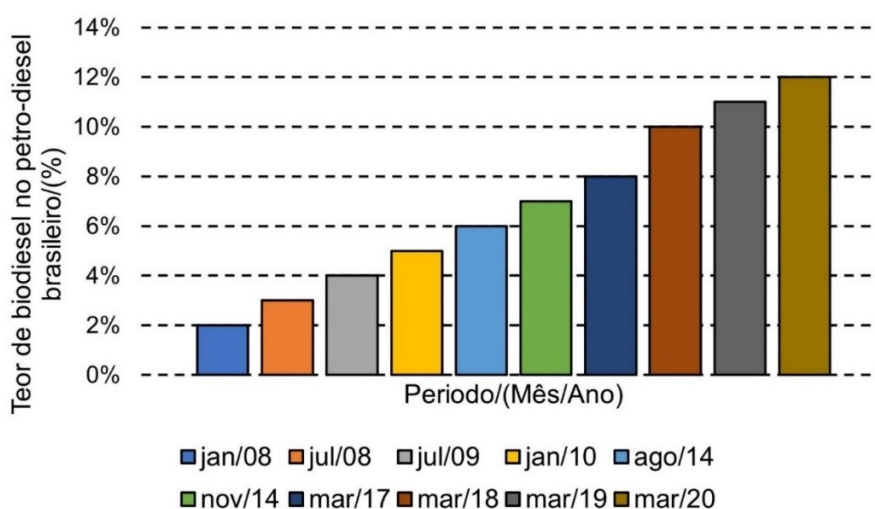
Em linhas gerais, o biodiesel não é tóxico, biodegradável e tem baixo enxofre e aromáticos, que são benéficos para reduzir as emissões de poluentes. O ponto de inflamação do biodiesel é muito maior do que o do diesel, o que reduz a possibilidade de combustão espontânea ou explosão e melhora a segurança nos processos de transporte e armazenamento. Além disso, o biodiesel tem alto número de cetano e teor de oxigênio, contribuindo para um melhor desempenho de ignição e combustão. No entanto, o biodiesel tem grande viscosidade, baixa evaporação e baixa fluidez fria, o que poderia deteriorar a atomização do spray e reduzir

a vida útil do motor. Além disso, algumas pesquisas mostram que a queima de biodiesel em vez de diesel pode reduzir significativamente as emissões de CO e HC, mas aumentar as emissões de NOx. Portanto, é difícil queimar biodiesel diretamente em motores diesel (ZHANG *et al.*, 2022).

### 2.2.1 Adição do biodiesel no petro-diesel

Como se tem visto nos últimos anos, o crescimento da mistura de biodiesel no diesel tem se tornado cada vez mais comum no Brasil. Esta crescente advém desde 2003 devido a criação da Comissão Executiva Interministerial do Biodiesel (CEIB) e do Grupo Gestor (GG) pelo governo federal. Em dezembro de 2004, o governo federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), com o objetivo inicial de introduzir o biodiesel na matriz energética brasileira. Com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional, o principal resultado dessa primeira fase foi a definição de um arcabouço legal e regulatório. A sua mistura ao petro-diesel iniciou-se em 2004, em caráter experimental e, entre 2005 e 2007, no teor de 2%, a comercialização passou a ser voluntária, neste período. A obrigatoriedade da adição de biodiesel no petro-diesel veio no artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira. Em janeiro de 2008, entrou em vigor a mistura legalmente obrigatória de 2% (B2), em todo o território nacional. Com o amadurecimento do mercado brasileiro, esse percentual foi sucessivamente ampliado como pode ser observado na Figura 5, que apresenta a evolução do percentual de teor de biodiesel no petro-diesel no período de 2008 a 2020, no Brasil (ANP, 2022).

Figura 5 - Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no petro-diesel no Brasil



**Fonte:** ANP, 2022 (Adaptado). Disponível em: < [https:// www.gov.br/](https://www.gov.br/)>. Acessado em 22 de fevereiro de 2022.

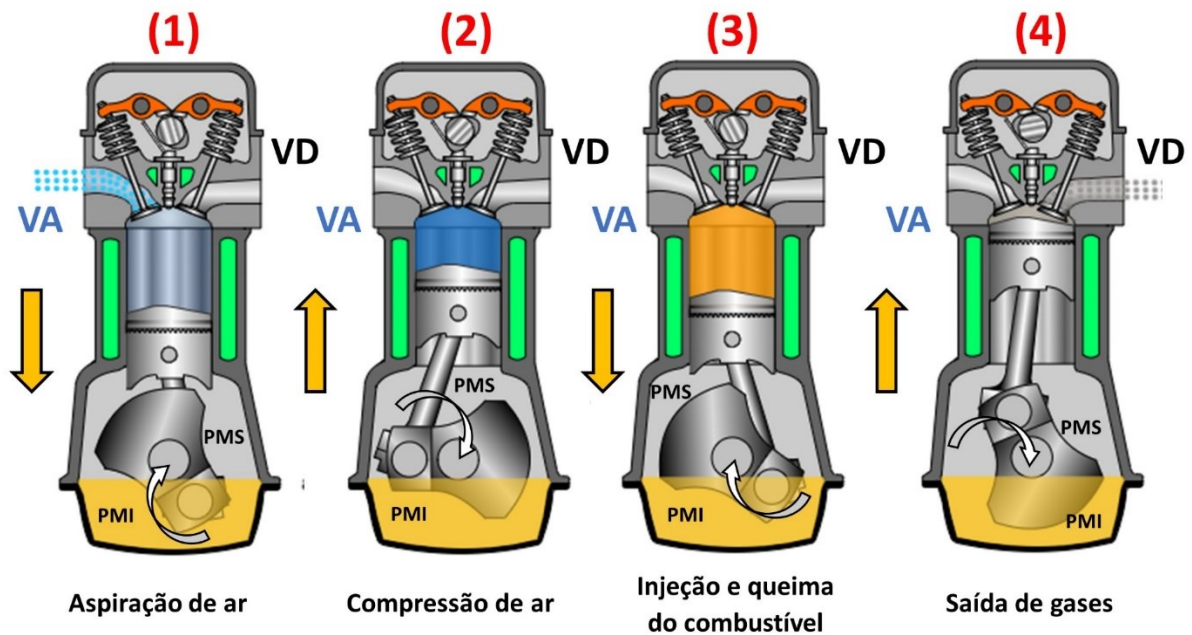
## 2.2.2 Principais características e especificações do biodiesel

Similarmente ao óleo diesel, a ANP também impõe especificações para manter o padrão entre os biodieseis produzidos no Brasil, a partir da resolução da ANP N° 07, de 19 de março de 2008, cujos valores são mostrados no **Anexo B**.

## 2.3 MOTOR DIESEL

Motores são dispositivos complexos que trabalham com transformação de fontes de energias em energia mecânica e, conseqüentemente, em energia útil para movimentar máquinas, equipamentos e veículos. O motor a diesel é um motor de combustão interna patenteado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913), em que a combustão do combustível se faz a partir da compressão do ar, que por sua vez gera uma elevação na temperatura da câmara de tal modo que atinja o ponto de auto inflamação do combustível. Em geral, o motor funciona em quatro tempos, que são responsáveis pela aspiração, compressão e combustão do combustível, e pela descarga dos gases produzidos. Na Figura 6 tem-se um esquema ilustrativo do funcionamento de um motor de quatro tempos (ALEME, 2011).

Figura 6 - Funcionamento de um motor diesel de quatro tempos.



**Fonte:** STEFANELLI, 2022 (Adaptado). Disponível em: < <https://www.stefanelli.eng.br>>. Acessado em 18 de fevereiro de 2022

A primeira etapa (1) de funcionamento do motor diesel é a aspiração do ar. Nesta etapa o pistão é forçado a fazer um movimento para baixo do PMS até o PMI (ponto morto superior e inferior, respectivamente), permitindo a abertura da válvula de admissão (VA) abrir e entrar, no cilindro/câmara, uma mistura de ar e combustível. Na segunda etapa (2), inicia-se o processo de compressão máxima, e conseqüentemente o aumento da temperatura devido à redução do volume do ar. Posteriormente ocorre a etapa de injeção e queima do combustível (3) que é a responsável pelo contato entre o ar, que se encontra à um elevado grau de compressão (alta pressão) e elevada temperatura, e o combustível, que será introduzido por um bico injetor. Com esse contato entre ar e combustível, nessas condições, ocorre a combustão, pois o combustível incendeia-se espontaneamente e, conseqüentemente, empurra o pistão em direção a PMI. Por fim, na quarta e última etapa (4), a válvula de descarga (VD) se abre, permitindo a saída dos gases provenientes da combustão, que se encontram em alta pressão. Contudo, ao fim da quarta etapa, reinicia-se um novo ciclo de transformação de energia (ALEME, 2011).

## 2.4 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA DENSIDADE HPHT

A densidade é uma das propriedades físicas cujo conhecimento é de suma importância na ciência e na engenharia, uma vez que a partir do seu conhecimento é possível estimar outras propriedades de interesse acadêmico, tais como: compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ), expansividade térmica isobárica ( $\alpha_P$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ), diferença de capacidades de calor específicas em pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ), entre outras. A determinação da densidade em alta pressão pode ser realizada para substâncias puras, misturas de dois ou mais compostos, esta propriedade fornece informações precisas para o projeto de compressores, redes de abastecimento, tanques de armazenamento, motores, entre outros equipamentos e processos motores (TORRES-JIMENEZ *et al.*, 2011; VENY *et al.*, 2009). Da mesma forma, é importante saber como se comporta esta propriedade em relação a variação das condições operacionais de pressão e temperatura. Como é bem conhecido, a densidade  $\rho$  pode ser expressa de acordo com a equação 1 (ATKINS; PAULA, 2012).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

onde:  $m$  corresponde à massa do fluido e  $V$  ao volume que ocupa. Portanto, o conhecimento da densidade  $\rho$  ( $P, T$ ) fornece dados valiosos para o projeto, como já mencionado.

A determinação da densidade pode ser realizada por diferentes técnicas, comumente classificadas como diretas e indiretas. Os métodos diretos são baseados na medição do volume ocupado por um determinado fluido, fazendo uma comparação subsequente com o volume ocupado por líquidos conhecidos. Enquanto os métodos indiretos relacionam propriedades da matéria à densidade, portanto exigirá substâncias padrões para calibração. A Tabela 1 lista algumas das técnicas associadas a cada método (ALAOUI, 2011; MUÑOZ RUJAS, 2018).

Tabela 1 - Técnicas de medidas da densidade ( $\rho$ ).

Métodos diretos	Métodos indiretos
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Picnometria<sup>a</sup></li> <li>▪ Densímetro flutuador</li> <li>▪ Balança hidrostática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densímetro de oscilação mecânica<sup>a</sup></li> <li>▪ Refratômetro</li> <li>▪ Velocidade do som<sup>a</sup></li> </ul>

<sup>a</sup> Técnicas quem podem ser utilizadas para medidas de densidade em altas pressões.

Quando é necessário determinar a densidade em altas pressões, diferentes técnicas são usadas tais como picnometria ou células de volume variável, mas sem dúvida a mais utilizada é a densimetria de oscilação mecânica. Esta técnica baseia seu princípio de funcionamento na medida da frequência ressonante de um oscilador mecânico eletronicamente excitado que contém em seu interior o fluido cuja densidade deve ser determinada. Seu amplo uso vem dada por sua velocidade na medição e precisão na determinação dos dados  $\rho(P, T)$  (ALAOUI, 2011; MUÑOZ RUJAS, 2018).

Os densímetros de tubo vibrante (técnica utilizada neste trabalho) têm sido amplamente utilizados para determinar a densidade de fluidos. A célula do tubo vibrante em forma de “U” permite que o modo de flexão fundamental do tubo seja excitado e controlado usando eletroímãs de bobina de fio montados sobre ou perto do tubo principal. Com a mudança de frequência causada por uma determinada amostra, a densidade do líquido pode ser determinada com uma grande precisão, proporcionando um meio rápido e robusto de medir a densidade numa ampla gama, de gases a líquidos (NAPOLEÃO, 2018).

A metodologia de obtenção da densidade por picnometria consiste num recipiente fabricado com material adequado e que tenha o seu volume determinado com precisão. Para realizar a medida: Basta pesar o picnômetro vazio, enchê-lo com o produto a ser medido e depois pesá-lo cheio. Uma simples subtração dará a massa do produto. Como o volume já é conhecido, basta dividir a massa obtida pelo volume e, a partir da Equação 1, a densidade é

determinada. Para realizar esta medida em altas pressões basta pressurizar o sistema e repetir o procedimento descrito. A técnica de tubo em “U” trouxe vantagens em relação ao uso de picnômetros, pois os densímetros de tubo vibrante eliminam erros humanos nas medições, regulam a temperatura e pressão, utilizam apenas pequenas quantidades de amostra e são mais rápidos e precisos.

Por fim, a obtenção da densidade em altas pressões a partir de dados de velocidade do som. Neste método, a velocidade do som é determinada a partir de técnicas, como, por exemplo: *pulse-echo*. As densidades são determinadas sob altas pressões a partir da velocidade das medições sonoras, usando uma forma integral da equação de Newton Laplace. A determinação da velocidade de som, em linha gerais, é atribuída a medição da distância entre obstáculos, desta forma: conhecendo-se a velocidade de propagação de um sinal (normalmente ultra-som no ar) é possível medir o tempo que ele gastou a percorrer um determinado espaço. Com este valor é simples calcular a distância percorrida. Utilizam-se sensores especiais que emitem o sinal em forma de *pulse* (ultra-som) e os recebe de volta (*eco*).

## 2.5 EQUAÇÃO CORRELATIVA DO TIPO TAIT

As correlações do tipo Tait (Equação 2) são comumente empregadas na literatura para descrever o comportamento da densidade em relação à pressão e à temperatura (AITBELALE *et al.*, 2019b; IVANIŠ *et al.*, 2016b, 2016c; SCHEDEMANN *et al.*, 2013). O uso desta correlação para sistemas com biodiesel já está bem consolidado na literatura, onde podem ser encontrados vários trabalhos que correlacionam ésteres puros, biodieseis e alguns semelhantes ao presente trabalho com misturas de petro-diesel e biodiesel (DZIDA; PRUSAKIEWICZ, 2008; IVANIŠ *et al.*, 2016c; NGUYENTHI; BAZILE; BESSIÈRES, 2018). A aplicação desta equação se torna importante no que tange à determinação das propriedades termodinâmicas derivadas, que serão expostas ao longo desta Seção.

$$\rho(p, T) = \frac{\rho_0(T, P_{Ref})}{1 - C \cdot \ln\left(\frac{B(T) + P}{B(T) + P_{Ref}}\right)} \quad (2)$$

onde:  $C$  denota um parâmetro independente da temperatura e  $B(T)$ , o parâmetro dependente da temperatura, descrito por um polinômio de grau dois, que pode ser visto na equação 3:

$$B(T) = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 T^2 \quad (3)$$

$\rho_0(T, P_{Ref})$  refere-se à densidade da amostra em uma pressão de referência ( $P_{Ref}$ ) e é calculada a partir de um polinômio de grau dois, que considera apenas as densidades nas condições da pressão de referência, como descrito pela equação 4:

$$\rho_0(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 T^2 \quad (4)$$

onde: valores de  $a_0, a_1$  e  $a_2$  são ajustados a partir dos dados de densidade na pressão de referência, os valores de  $b_0, b_1, b_2$  e  $C$  são ajustados para todo o conjunto de dados ao longo de  $P$  e  $T$ . Vale ressaltar que o ajuste de Tammann-Tait não leva em consideração a composição, ou seja, as composições são fixas, e o ajuste é realizado para cada composição.

A obtenção de dados experimentais de densidade, junto com sua modelagem traz a possibilidade de calcular algumas propriedades termodinâmicas e mecânicas que são muito importantes, tanto do ponto de vista teórico, quanto para aplicação industrial (GMEHLING *et al.*, 2012; SMITH; VAN NESS; ABBOTT, 2007).

### 2.5.1 Propriedades derivadas calculadas a partir da equação de Tammann-Tait

Como mencionado, a partir do ajuste dos dados experimentais com à equação de Tammann-Tait é possível obter propriedades termodinâmicas, tais como: compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ), expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ), diferença de capacidades de calor específicas em pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ), objeto de estudo desta dissertação.

A compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e a expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ) são propriedades que quantificam o efeito da temperatura e pressão no volume. A compressibilidade isotérmica representa a variação da densidade (volume) em relação à pressão à uma temperatura constante, evidenciada pela relação abaixo (equação 5), onde mostra a representação termodinâmica escrita em derivadas parciais e a relação após combiná-la com a equação 2 (ILÍĆ PAJIĆ *et al.*, 2020; IVANIŠ *et al.*, 2016c; SAS *et al.*, 2021):

$$\kappa_T = \frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = \frac{C}{\left( 1 - C \cdot \ln \left( \frac{B(T) + P}{B(T) + p_{ref}} \right) \right) \cdot (B(T) + p)} \quad (5)$$

similarmente, à compressibilidade isotérmica, a expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ) pode ser descrita pela equação (6), descrita abaixo:



$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = -\frac{a_1 + 2a_2 \cdot T}{\rho(T, p_{ref})} - \frac{C \cdot (p_{ref} - p)}{(B(T) + P) \cdot (B(T) + p_{ref})} \cdot \frac{b_1 + 2b_2 \cdot T}{\left( 1 - C \cdot \ln \left( \frac{B(T) + P}{B(T) + p_{ref}} \right) \right)} \quad (6)$$

desta forma, fica claro que pelas equações 5 e 6, tanto a compressibilidade térmica quanto a expansividade térmica isobárica podem ser obtidas a partir dos parâmetros da equação de Tammann-Tait modificada. E, a partir das propriedades termodinâmicas já mencionadas, é possível obter mais algumas informações que podem ser calculadas a partir das relações entre essas propriedades derivadas. É o caso do cálculo da pressão interna ( $p_{int}$ ) e a diferença de capacidades de calor específicas em pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ).

A pressão interna ( $p_{int}$ ) atua relacionando-se com as forças coesivas que agem sobre os compostos fornecendo informações sobre as interações moleculares. A pressão interna pode descrever os resultados macroscópicos das interações moleculares, sendo definida pela equação 7, que indica a mudança na energia interna da amostra durante sua expansão ou compactação isotérmica (ILÍĆ PAJIĆ *et al.*, 2020; IVANIŠ *et al.*, 2016a; SAS *et al.*, 2021; ZOREBSKI; MUSIAŁ; DZIDA, 2019) :

$$p_{int} = \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho - P = \frac{T\alpha_p}{\kappa_T} - P \quad (7)$$

onde:  $U$  é a energia interna,  $V$  representa o volume da amostra.

A diferença entre a capacidade de calor específico em pressão constante ( $c_p$ ) e em volume constante ( $c_v$ ) é obtido a partir da Equação 8 e 9, que é introduzida a partir de manipulações algébricas entre as Equações 5, 6 e 7:

$$c_p = c_v + T \cdot \frac{\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho^2}{\rho^2 \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T} \quad (8)$$

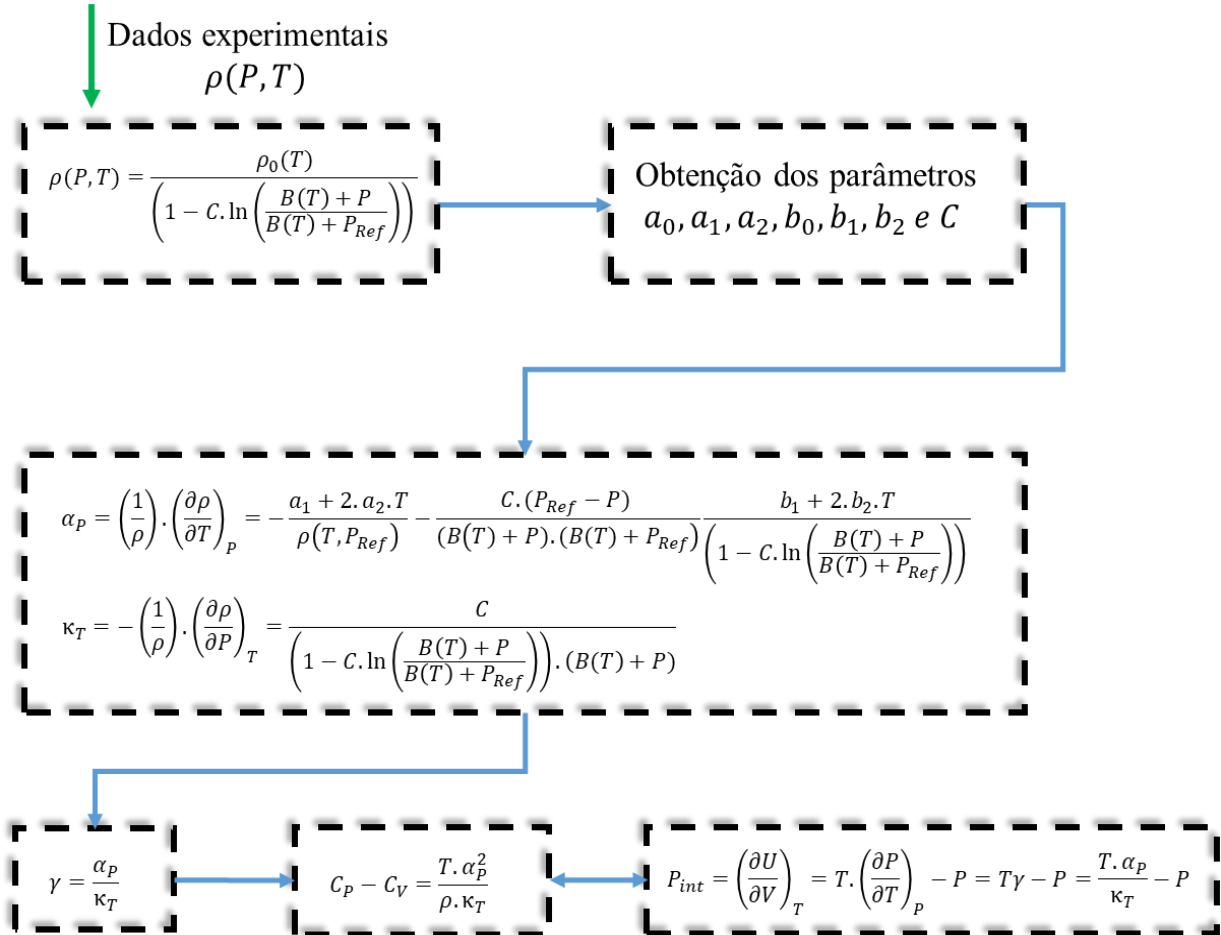
$$(c_p - c_v) = \frac{\alpha_p^2 T}{\rho \kappa_T} \quad (9)$$

estas propriedades remetem quantidade de energia necessária para aumentar um grau de sua temperatura em uma unidade de mol (ou massa). Isoladamente podem se medidas ou, em alguns casos, calculada usando os métodos da mecânica estatística e informações detalhadas sobre a estrutura molecular, comprimentos de ligação, frequências vibracionais, e assim por diante (SANDLER, 2017).

Na Figura 7 é apresentado um breve esquema metodológico para a obtenção das

propriedades derivadas a partir da equação de Tammann-Tait.

Figura 7 - Esquema metodológico para obtenção das propriedades derivativas a partir da equação de Tammann-Tait, compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e a expansividade térmica isobárica ( $\alpha_P$ ) pressão interna ( $p_{int}$ ) e a diferença de capacidades de calor específicas em pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 2.6 MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo é um método computacional que utiliza a propagação de números aleatórios e estatísticas para resolver problemas. Este artifício vem sendo utilizado para resolver problemas numérico de diversos ramos, entre eles, problemas de finanças, estatística, engenharia e até mesmo para estimativa de propriedades e incertezas nas medidas (DE PAULA, 2014).

A utilização de metodologias como esta é atrelada a modelos complexos. A título de exemplo, pode-se citar quando é necessário a utilização de modelo matemático para descrever um sistema, é possível que o modelo seja complexo demais, ou então, não permita

uma solução analítica. Nesse caso, a simulação computacional pode ser considerada uma ferramenta de grande valia na obtenção de uma resposta para um problema particular (DONATELLI;; KONRATH, 2005). E é nestes problemas que surge as Simulações de Monte Carlo (SMC). Contudo, este trabalho, traz uma metodologia de Monte Carlo para obtenção da compressibilidade térmica ( $\kappa_T$ ) e sua incerteza padrão ( $U_{\kappa_T}$ ), tomando por base a metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta Seção é disposta de quatro subtópicos, a saber: I) são apresentadas informações importantes acerca do material utilizado aqui neste trabalho; II) são mostradas as formas de preparo das misturas biodiesel + petro-diesel; III) expõe-se uma descrição do aparato experimental, bem como seu funcionamento e forma de coleta de dados; IV) é apresentada uma detalhada explicação acerca da proposição do modelo para predizer o efeito da pressão na densidade das misturas estudadas.

#### 3.1 Materiais

Os biodieseis utilizados para a preparação das misturas examinadas neste trabalho foram sintetizados por transesterificação de três óleos (semente de uva, linhaça e milho). Nesse processo, os óleos são alimentados com metanol e hidróxido de sódio (que neste processo age como catalisador para a reação). As técnicas utilizadas para obter e caracterizar esses biodieseis são semelhantes a trabalhos anteriores do Grupo de Pesquisa em Termofluidodinâmica Aplicada, os perfis de cada biodiesel e petro-diesel são apresentados nas Tabelas 2 e 3. O petro-diesel estudado foi fornecido pela LUBNOR (Petrobras/LUBNOR, Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste, Fortaleza, Brasil) (NOGUEIRA *et al.*, 2010b, 2012, 2015).

Tabela 2 - Informações químicas dos Biodieseis estudados neste trabalho.

Nome do composto	Acrônimo	Fórmula molecular	CAS	Perfil do Biodiesel [ <i>m/m</i> ]		
				milho	linhaça	semente de uva
Metil palmitato	ME-C16:0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	112-39-0	0,128	0,043	0,0613
Metil stearato	ME-C18:0	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	112-61-8	-	0,001	0,0436
Metil oleato	ME-C18:1	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	112-62-9	0,369	0,42	0,2907
Metil linolato	ME-C18:2	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	112-63-0	0,487	0,536	0,6016
Metil linolenato	ME-C18:3	C <sub>19</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	301-00-8	0,008	-	0,0027
Outros (não identificados)	-	-	-	0,008	-	0,0001
Especificação do material		Limite ASTM <sup>b</sup> D6751	Método ASTM <sup>b</sup>	milho	linhaça	semente de uva
Número de ácido (mg KOH/g)		Max 0,5	D664	0,240	0,080	0,107
Viscosidade cinemática a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)		1,9-6,0	D445	4,865	4,437	4,484
Densidade a 15°C (kg/m <sup>3</sup> )		860-900	D1298	893,8	897,2	895,4
Rendimento (wt%)		-	-	> 99,0	> 99,0	> 99,0

<sup>a</sup> Nomenclatura usada, "ME-CX: Y", onde: ME refere ao tipo de (metil) éster, C refere-se ao composto carbono, X ao número de carbonos presentes na cadeia principal, e Y ao número de insaturações.

<sup>b</sup> American Society for Testing and Materials.

Tabela 3 - Informações químicas do petro-deisel estudado neste trabalho.

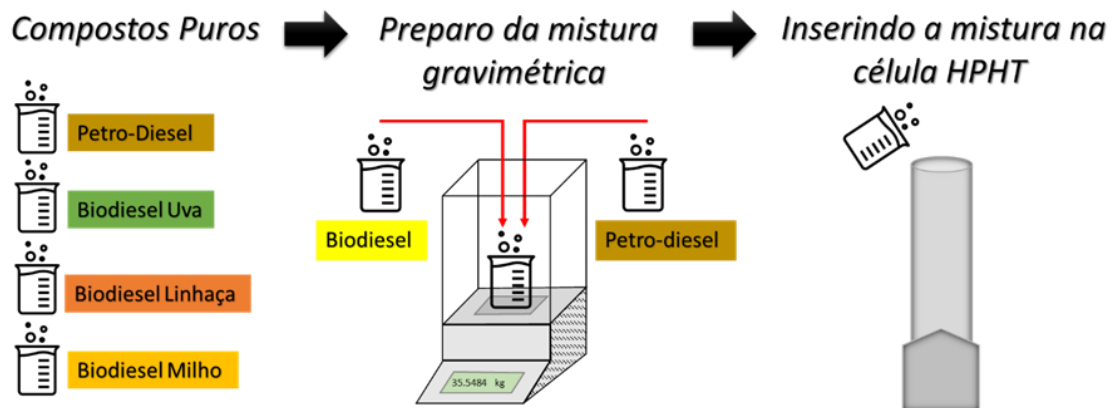
Nome do composto	Acrônimo <sup>a</sup>	Fórmula molecular	CAS	Perfil petro-diesel [ <i>m/m</i> ]
heptano	C7	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	142-82-5	0.030
octano	C8	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	111-65-9	0.038
nonano	C9	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	111-84-2	0.026
decano	C10	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	124-18-5	0.028
undecano	C11	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	1120-21-4	0.065
dodecano	C12	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	112-40-3	0.082
tridecano	C13	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	629-50-5	0.100
tetradecano	C14	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	629-59-4	0.115
pentadecano	C15	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	629-62-9	0.120
hexadecano	C16	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	544-76-3	0.112
heptadecano	C17	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>	629-78-7	0.120
octadecano	C18	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	593-45-3	0.076
nonadecano	C19	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	629-92-5	0.023
eicosano	C20	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	112-95-8	0.018
hencosano	C21	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	629-94-7	0.014
docosano	C22	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>	629-97-0	0.010
tricosano	C23	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>	638-67-5	0.010
tetracosano	C24	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>	646-31-1	0.013

<sup>a</sup> Nomenclatura usada, "CX", onde: C refere-se ao composto carbono, X ao número de carbonos presentes na cadeia do hidrocarboneto.

### 3.2 Preparo da mistura biodiesel e petro-diesel

Todas as misturas foram preparadas usando um béquer e em seguida um cilindro de transferência de pistão flutuante de baixa fricção e alta pressão (Vinci Technologies / França), que permite pressão e temperatura máximas de 100,00 MPa e 473,15 K, respectivamente. É importante mencionar que este cilindro possui um anel de mistura interno para garantir a homogeneização completa da amostra. As misturas foram preparadas por meio de gravimetria, pois todos os compostos estudados estão na fase líquida. Assim, cada amostra foi preparada com o auxílio de uma balança digital (*Shimadzu*, modelo AY220), com resolução de 0,0001 g, a qual cada composto foi adicionado até atingir as composições de misturas desejadas, como mostra a Figura 8, que apresenta a sequência para o preparo da mistura biodiesel e petro-diesel. Todas as misturas preparadas para o estudo foram realizadas em mássica (*m/m*), porém para obtenção das composições volumétricas (*v/v*) foi necessária uma conversão com valores previamente obtidos de densidade na temperatura de 293,15 K.

Figura 8 - Esquema metodológico para preparo da mistura Petro-diesel e Biodiesel.

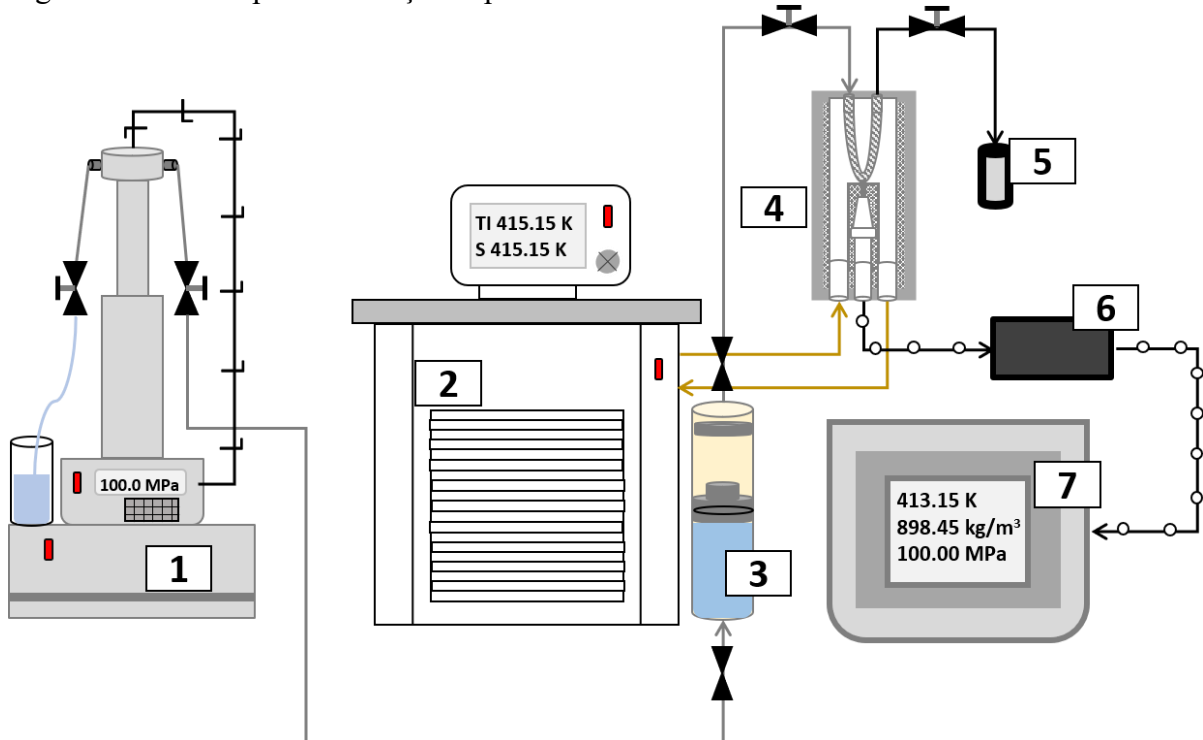


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.3 Aparatos e procedimento experimental

As densidades das misturas entre petro-diesel e biodiesel foram medidas em um densímetro Anton Paar DMA HPM, que tem como princípio de medida um tubo vibrante em “U”. Onde, a partir de uma mudança de frequência causada por uma determinada amostra específica, a densidade do líquido pode ser determinada com uma grande precisão, através de uma unidade de avaliação mPDS 5. Este equipamento tem uma incerteza de  $\pm 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e faixa limite de trabalho em  $T$  e  $P$  de, respectivamente, 263,15 a 473,15 K e pressões de 0 a 140 MPa. O sistema de medição da densidade pode ser visto na Figura 9. A temperatura do densímetro é controlada através de um banho termostático com circulação interna, fabricado pela Julabo, modelo FP50. Este equipamento trabalha em uma faixa de temperatura de 223,15 a 473,15 K. A amostra foi inserida em um cilindro de alta pressão. Este cilindro foi usado como recipiente HPHT para alocar a amostra. O equipamento responsável pelo fornecimento de pressão ao sistema é a bomba seringa Teledyne Isco modelo 65D, que trabalha utilizando água como fluido de pressurização. O sistema da bomba funciona a partir de um controlador, que comanda funções como fluxo volumétrico, pressão desejada e velocidade de fluxo. Com isso, a bomba exerce a função de pressurizar a célula de alta pressão e, conseqüentemente, de todo o sistema.

Figura 9 - Sistema para a medição experimental da densidade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. 1- Bomba seringa Teledyne isco; 2-Banho termostático Julabo; 3- Célula de alta pressão; 4- Densímetro tubo vibrante; 5- Transdutor de pressão Omega; 6- DMA HPM; 7- Interface mPDS.

O sistema de medição experimental da densidade pode ser visto na Figura 9. Para obter esta propriedade é necessário ter um controle preciso das propriedades PVT. O sistema segue o fluxo indicado pelas linhas cinzas, que representam as tubulações, como mostradas no sistema. Cada numeração na imagem refere-se a um equipamento que auxilia na medição da densidade. O densímetro foi anteriormente calibrado usando água deionizada Milli-Q® ultrapura (condutividade de  $18,2 \pm 0,2 M\Omega cm$ , a  $298,15 K$ ) e nitrogênio (White Martins, Brasil, pureza nominal de 99,996 %), em toda a faixa do aparelho ( $P = 0,10 - 100,00 MPa$ , e  $T = 298,15$  a  $423,15 K$ ), como relatado em outros trabalhos (COMUÑAS *et al.*, 2008; CHACON VALERO; FEITOSA; DE SANT'ANA, 2020).

A validação deste equipamento foi conduzida segundo Chaco Valero, Feitosa e De Sant'Ana (2020). Para este procedimento foi utilizando tolueno (Sigma-Aldrich/EUA, com pureza nominal de 99,5%). A validação serviu para garantir que a calibração, descrita anteriormente, tenha sucedido de maneira eficaz. Os dados de densidade ao longo de  $P$  e  $T$  para o tolueno, empregados neste procedimento foram coletados no NIST (*National Institute of Standards and Technology*) e comparados com os dados coletados experimentalmente pelo equipamento. Para a faixa de temperatura ( $303,15 - 468,15 K$ ), e pressões de até  $100,00 MPa$

o desvio padrão de densidade foi encontrado em  $0,58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (com um desvio médio de 0,07%) (CHACON VALERO; FEITOSA; DE SANT'ANA, 2020).

### 3.3.1. Descrição do procedimento experimental

O procedimento experimental para utilização do densímetro inicia-se na injeção da amostra. Nesta etapa a mistura petro-diesel e biodiesel é inserida na célula de alta pressão, como mostra a Figura 8. A célula é conectada ao densímetro através de tubulações de alta pressão com diâmetro nominal 1/8". Após toda a montagem do sistema se inicia a etapa de purga da mistura no densímetro. Nesta etapa, a mistura é inserida no densímetro a um fluxo constante até completar todo o preenchimento do tubo em "U". Após a passagem completa do fluido e a realização da purga o sistema é completamente fechado. Todo este procedimento é realizado para garantir que não exista a presença de ar no sistema, e as condições de  $P$  e  $T$  na injeção, são de  $0,10 \text{ MPa}$  e  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , com incertezas de, respectivamente,  $0,07 \text{ MPa}$  e  $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Após o processo de injeção da amostra, o sistema é deixado à temperatura e à pressão alvos, até que se atinja o equilíbrio térmico e mecânico. Este procedimento é repetido para cada par  $(P, T)$ , em que é fixada a temperatura e varre-se a faixa de medidas de densidade a uma dada pressão. Ao seu fim, uma nova temperatura é escolhida e os dados são determinados. Outro ponto que deve ser abordado é a limpeza do equipamento. O densímetro foi limpo entre a troca de cada composição, ou seja, entre cada sistema de biodiesel. Para tal, fez-se uso de uma bomba à vácuo V-710 Bunchi Switzerland que aplica uma pressão de vácuo de  $0,001 \text{ MPa}$ , e um hidrocarboneto volátil como o hexano para garantir a remoção total de resíduos e a secagem interna do equipamento.

## 3.4 Procedimento para cálculo da compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e incerteza padrão ( $U_{\kappa_T}$ )

A metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018) foi utilizada como ferramenta complementar para o cálculo da compressibilidade isotérmica  $\kappa_T$  e sua incerteza padrão combinada foi calculada ajustando analiticamente e derivando os dados de densidade isotérmica de acordo com a definição, apresentada na equação 5 (derivada parcial, definição de compressibilidade térmica).

Conforme mostrado no tópico acima, a equação de Tammann-Tait modificada foi usada para calcular as propriedades derivadas. Porém, seu uso requer uma boa correlação da equação com os dados, e para isso é necessário um bom ajuste, uma vez que, os valores obtidos



para as propriedades derivadas são fortemente influenciados pela escolha da função de ajuste (DARIDON; BAZILE, 2018; LIFI *et al.*, 2021).

Para solucionar este problema, é recomendado por Daridon e Bazile (2018) o uso de uma metodologia estatística de Monte Carlo, que por sua vez, faz uso de uma perturbação aleatória em torno de distribuição Gaussiana com um número de 5000 pontos (número de pontos, previamente testado e estabelecido pelos autores. A função de densidade de probabilidade gaussiana, requer dois parâmetros de entrada, a média e o desvio padrão, que, respectivamente, foram fixados como a densidade experimental ( $\rho_{Exp}$ ) e a incerteza da distribuição de densidade ( $U(\rho)$ ).

Após isso, cada conjunto de pontos de dados gerados é usado para ajuste e derivação da compressibilidade térmica. Assim como a entrada, a saída gerada também segue uma distribuição gaussiana onde a média e o desvio padrão são, respectivamente, a compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) calculada e a incerteza padrão correspondente ( $U(\kappa_T)$ ). Para esse procedimento, foram utilizadas duas equações de estado empíricas, dentre as seis sugeridas por Daridon e Bazile (2018). A escolha dessas duas equações deveu-se ao menor número de parâmetros de ajuste e por serem explícitas em densidade, mostradas nas equações 10 e 11 (BAZILE *et al.*, 2018; DARIDON; BAZILE, 2018; HAMANI *et al.*, 2020). Vale ressaltar que as equações utilizadas no procedimento foram testadas por uma série de procedimentos estatísticos e de consistência. A Figura 10 mostra um desenho esquemático para representar a metodologia de cálculo.

Equação de Murnaghan (F. D. MURNAGHAN, 1924):

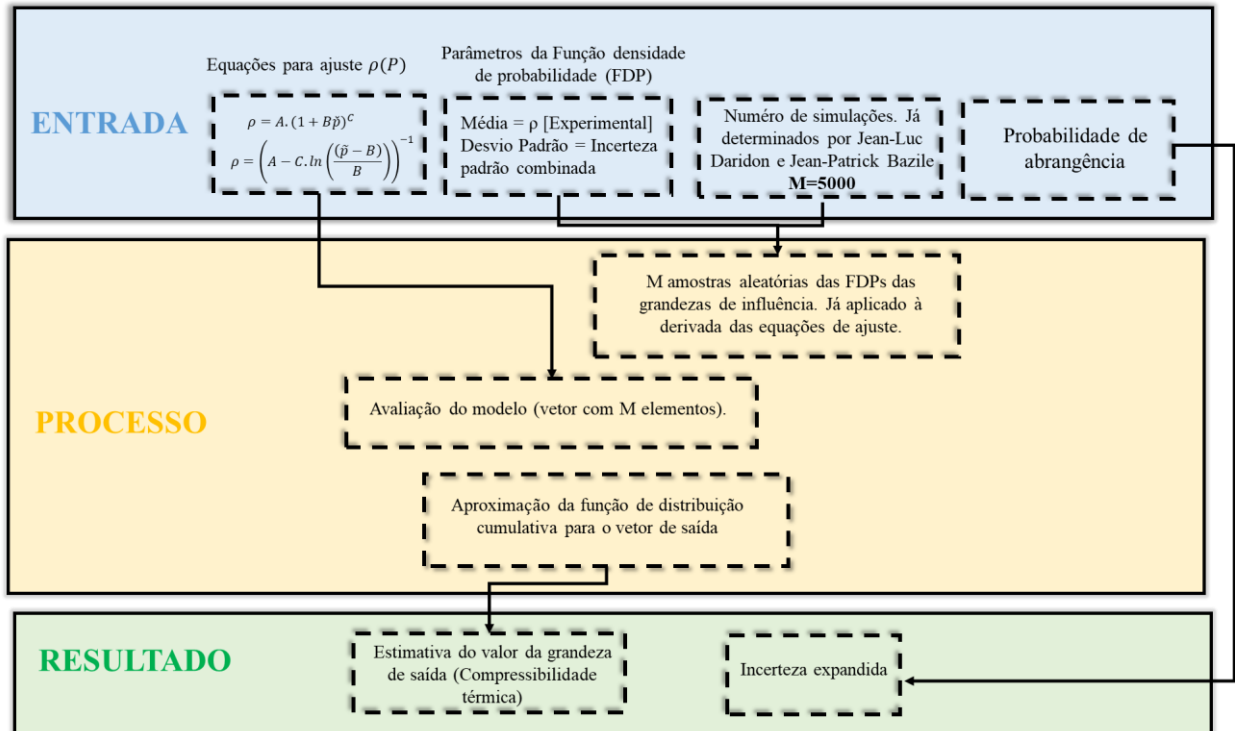
$$\rho = A \cdot (1 + B\tilde{p})^C \quad 10$$

Equação de Tammann (DYMOND; MALHOTRA, 1988):

$$\rho = \left( A - C \cdot \ln \left( \frac{(\tilde{p} - B)}{B} \right) \right)^{-1} \quad 11$$

onde: os parâmetros  $A$ ,  $B$  e  $C$  são obtidos através de ajuste. E  $\tilde{p}$  é a diferença entre a pressão de trabalho e a pressão atmosférica ( $P - P_{atm}$ ).

Figura 10 - Esquema metodológico para obtenção da compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e incerteza expandida da propriedade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 3.5. Metodologia para a proposição do modelo para prever o efeito da pressão na densidade de misturas biodiesel + petro-diesel

Nesta Subsecção serão apresentadas diretrizes para a proposição do modelo desenvolvido nesta dissertação. Como mencionado na Seção 1 (Introdução) o método de previsão do efeito da pressão na densidade baseou-se no estudo desenvolvido por Daridon (2020).

#### 3.5.1 Representando o efeito da pressão na densidade da mistura biodiesel + petro-diesel.

O modelo de previsão da densidade, desenvolvido aqui, foi baseado na equação de estado de Murnaghan (1924), que descreve o efeito da pressão sobre a densidade, como dado pela equação 12:

$$\frac{\rho}{\rho_{atm}} = (1 + B\tilde{p})^{-C} \quad (12)$$

- $B$  e  $C$  são parâmetros ajustáveis dependentes da temperatura [equações 13 e 14];  $\tilde{p}$  é a diferença entre a pressão de trabalho e a pressão atmosférica ( $P - P_{atm}$ ).

$$B = b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 \quad (13)$$

$$C = c_0 + c_1 \cdot T \quad (14)$$

- $b_i$  e  $c_i$  são parâmetros ajustados da equação de estado de Murnaghan.
- $T$  é a temperatura do sistema.

Os parâmetros  $b_i$  e  $c_i$  foram obtidos através de uma regressão aos dados experimentais, que se referem a cada componente da mistura. Neste caso, foi feito um ajuste para o petro-diesel e um para o biodiesel, de tal forma que o conjunto de valores utilizados neste procedimento estão dispostos nas Tabelas 4 e 5, apresentadas abaixo:

Tabela 4 - Dados experimentais de densidade em alta pressão para diferentes petro-diesel, dados coletados na literatura e usados no conjunto de dados para correlacionar com o modelo.

Autores - Referências	Combustível	$T$ Range /K	$P$ Range /MPa	Número de pontos
ROWANE et al. (2019)	Petro-Diesel	298,15 - 532,60	3,80 – 299,90	405
AQUING et al. (2012)	Petro-Diesel	323,15 - 423,15	0,88 – 340,71	68
HADJI et al. (2012)	Petro-Diesel	283,15 - 403,15	0,10 – 200,00	189
SAFAROV et al. (2018)	Petro-Diesel	263,15 - 468,15	0,10 – 200,00	598
Faixa Final - Número total de pontos		263,15 – 532,60	0,88 - 340,71	1260

Tabela 5 - Dados experimentais de densidade em alta pressão para diferentes biodieseis, dados coletados na literatura e usados no conjunto de dados para correlacionar com o modelo.

Autores - Referências	Biodiesel	Éster majoritário	$T$ Range /K	$P$ Range /MPa	Número de pontos
PRIETO et al. (2015)	Semente de algodão	C18:2	288,15 - 358,15	0,10 - 30,00	120
PRATAS et al. (2011)	Soja	C18:2	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
PRATAS et al. (2011)	Palma	C18:1	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
PRATAS et al. (2011)	Colza	C16:0	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
PRATAS et al. (2011)	Soja + Colza	C18:1	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
PRATAS et al. (2011)	Palma + Colza	C18:1	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
PRATAS et al. (2011)	Soja + Colza + Palma	C18:1	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
PRATAS et al. (2011)	Soja + Palma	C18:1	283,15 - 333,15	0,10 - 45,00	84
TAT; VAN GERPEN (2003)	Banha	C18:1	293,15 - 373,15	0,10 - 34,50	30
TAT; VAN GERPEN (2003)	Sebo	C18:1	293,15 - 373,15	0,10 - 34,50	30
TAT; VAN GERPEN (2003)	Soja	C18:2	293,15 - 373,15	0,10 - 34,50	30
TAT; VAN GERPEN (2003)	Canola	C18:1	293,15 - 373,15	0,10 - 34,50	30
AITBELALE; ABALA; et al. (2019)	Óleos de cozinha	C14:0	298,15 - 393,15	0,10 - 140,00	136
AITBELALE; CHHITI; et al. (2019)	Soja	C18:2	298,15 - 393,15	0,10 - 140,00	136
HABRIOUX et al. (2013)	Colza	C18:1	293,15 - 393,15	0,10 - 100,00	231
HABRIOUX et al. (2013)	Soja	C18:2	293,15 - 393,15	0,10 - 100,00	231
BESSIÈRES et al. (2018)	Alga spirulina	C16:0	293,15 - 353,15	0,10 - 140,00	51
SCHEDEMANN et al. (2013)	Não especificado	C18:1	288,12 - 396,76	0,10 - 129,79	324
Este Trabalho ( <i>Bio100 - PD0</i> )	Linhaça	C18:2	293,15 - 413,15	0,10 - 100,00	84
Este Trabalho ( <i>Bio100 - PD0</i> )	Milho	C18:2	293,15 - 413,15	0,10 - 100,00	84
Este Trabalho ( <i>Bio100 - PD0</i> )	Semente de Uva	C18:2	293,15 - 413,15	0,10 - 100,00	84
Faixa final - Número total de pontos			283,15 - 413,15	0,10 - 140,00	2189

Como já mencionado acima, nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os dados que foram utilizados no ajuste, cujos valores foram obtidos por meio de coleta de dados na literatura. No entanto, para compor uma faixa de temperatura mais ampla para os dados de biodiesel, foi necessário utilizar alguns dados obtidos no presente trabalho, dada a escassez de dados em uma faixa de temperatura de até 413,15K. Assim, foram utilizados apenas os dados de biodiesel sem mistura (Bio100 – PD 0), como mostrado na Tabela 5. Outra informação essencial, que deve ser levada em consideração é o éster majoritário presente em cada biodiesel correlacionado. Pode-se observar uma predominância entre os ésteres C18:1 e C18:2 (metil oleato e metil linolato, respectivamente). Uma tabela mais detalhada com as composições éster de todos os biodieseis correlacionados pelo modelo são apresentadas em **Anexo**, na Tabela G1.

Devido a predominância entre os ésteres majoritários, uma tendência esperada para o modelo proposto nesta dissertação é obter resultados satisfatórios para estes tipos de

biodieseis. Porém, não descarta o alcance do modelo para biodieseis com predominância de ésteres diferente dos mencionados, como por exemplo o biodiesel de coco, que tem como éster majoritário o C12:0 (metil laurato).

Com o banco de dados experimental já definido, foram feitos dois ajustes, conforme já informado, nesta Seção, o ajuste para petro-diesel e para biodiesel seguiu a mesma função objetivo, mas cada ajuste com seus respectivos dados, petro-diesel (Tabela 4) e biodiesel (Tabela 5). A obtenção dos parâmetros  $b_i$  e  $c_i$  foram determinados minimizando a Equação 15 e os valores dos parâmetros para cada composto podem ser vistos na Tabela B1 no **Apêndice B**, disposto aqui neste trabalho.

$$f_{HP}(b_i, c_i) = \sum_k^{N_{exp}} \left[ (1 + B_i \cdot \tilde{p})^{c_i} - \left( \frac{\rho_{atm}}{\rho} \right)_{k,exp} \right]^2 \quad (15)$$

Para misturas de biodiesel + petro-diesel, foi utilizada a regra de mistura de Kay, para representar a parcela de cada composto presente na mistura (AHMED, 1989), conforme mostrado na equação 16, ou seja, o desenvolvimento da equação 12 para misturas de biodiesel + petro-diesel:

$$\begin{aligned} \rho^{Bio+PD}(P, T) = & (\%Bio/100) \cdot \left[ \rho_{atm}^{Bio100}(T) \cdot (1 + B_i^{Bio100} \cdot \tilde{p})^{-c_i^{Bio100}} \right] \\ & + (\%PD/100) \cdot \left[ \rho_{atm}^{PD100}(T) \cdot (1 + B_i^{PD100} \cdot \tilde{p})^{-c_i^{PD100}} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

onde:  $\rho^{Bio+PD}(P, T)$  é a densidade da mistura à pressão e temperatura requerida;  $(\%Bio/100)$  é a porcentagem volumétrica de biodiesel na mistura;  $(\%PD/100)$  é a porcentagem volumétrica de petro-diesel na mistura ;  $\rho_{atm}^{Bio100}(T)$  e  $\rho_{atm}^{PD100}(T)$  são respectivamente, as densidades do biodiesel e petro-diesel à temperatura solicitada e pressão atmosférica.

Vale salientar, que a equação de estado de Murnaghan (equação 12) foi selecionada por dois motivos principais: (I) a inclusão traz um termo que reflete o efeito da pressão sobre a densidade, como pode ser observado na função objetivo dada pelo equação 15, ou seja, uma relação entre a densidade de baixa pressão e alta pressão que afeta os parâmetros ajustáveis  $B_i$  e  $C_i$ ; (II) o modelo tem como dado de entrada a densidade do biodiesel e petro-diesel a uma pressão atmosférica o que corrige problemas, como o efeito da mudança de composição éster dos biodieseis ou possíveis variações nas frações do petróleo na composição do petro-diesel.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção está dividida em três partes. I) a primeira relata os dados experimentais de densidade HPHT obtidos neste, mostrando suas tendências e observações. II) na seção 4.1 são apresentados os resultados acerca da correlação dos dados à equação de Tammann-Tait e as propriedades derivadas, lá é descrita a explicação fenomenológica acerca da tendência das propriedades, além da interpretação das mesmas propriedades. III) Por fim, no último subtópico desta seção, é mostrado a validação do modelo, onde, são apresentados resultados estatísticos, que relatam a acurácia do modelo.

### 4.1 Análise dos dados experimentais de densidade HPHT

As densidades das misturas de biodiesel e petro-diesel são apresentadas no **Apêndice C**, dispostos nas Tabelas C1 - C4. Nestas tabelas os dados de densidade estão dispostos ao longo de faixas de  $P$  (0,10 – 100,00 MPa) e  $T$  (293,15 – 413,15 K) para as misturas de biodiesel + petro-diesel, estes valores também são apresentados ao longo das composições estudadas, que são: 20, 40, 60 e 80 %v/v. Ao todo, 1344 dados experimentais de densidade HPHT foram obtidos. As nomenclaturas utilizadas para as misturas entre os compostos estudados (petro-diesel e biodiesel) são as seguintes: Bio, refere-se ao biodiesel seguido de sua porcentagem na mistura, por exemplo Bio 20 (20 %v/v de biodiesel na mistura) e o PD, refere-se ao petro-diesel e depois à sua porcentagem na mistura, por exemplo PD 80 (80 %v/v de petro-diesel na mistura). Por exemplo, Bio 20 - PD 80 refere-se a uma mistura composta por 20 %v/v de biodiesel e 80 %v/v de petro-diesel.

A Figura 11 mostra uma análise gráfica da densidade em função da pressão. Como esperado, para líquidos regulares<sup>1</sup>, à medida que a pressão e a concentração de biodiesel (para misturas de biodiesel + petro-diesel) aumentam, a densidade aumenta a uma  $T$  constante. Analisando primeiramente o comportamento com a pressão (a  $T$  e composição volumétrica constante), a densidade de todos os sistemas estudados aumenta à medida que a pressão aumenta. A partir da definição algébrica da densidade (Equação 1), pode-se compreender melhor o fenômeno que ocorre. Assim, com o aumento da pressão, diminui-se o volume, ocasionando uma redução na distância média entre as moléculas, resultando no aumento da

---

<sup>1</sup> Líquidos regulares, termo proveniente do inglês *regular liquids*, que é associado a líquidos com comportamentos esperados, exemplo: densidade diminuir com o aumento da temperatura. Vale ressaltar que este termo não apresenta referências às soluções regulares.

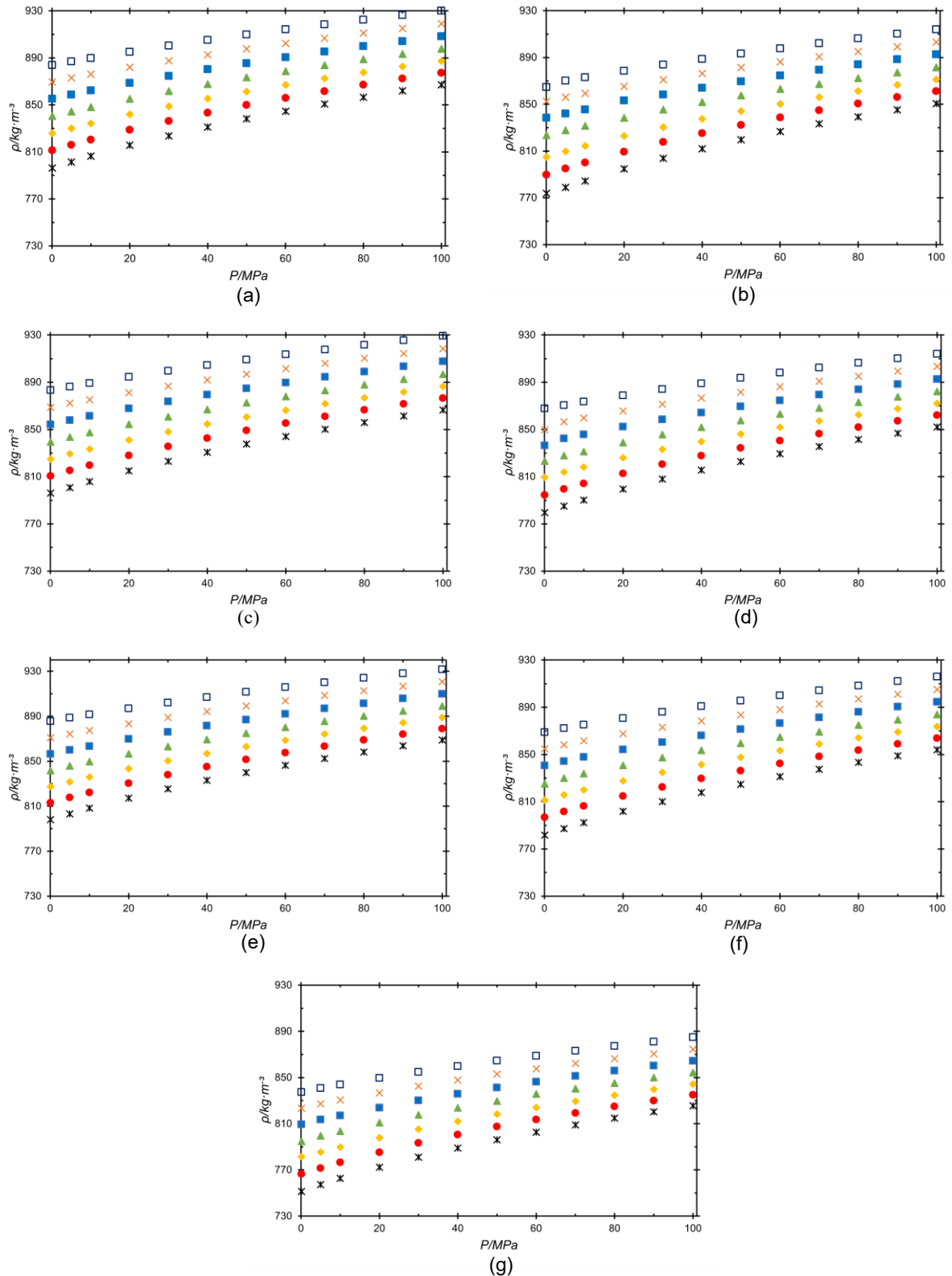
densidade. Por outro lado, à medida que a temperatura aumenta, a densidade diminui (analisando a  $P$  constante). Este efeito é observado devido à alta agitação molecular, causada pelo aquecimento da amostra, uma vez que o aumento de temperatura causa o aumento do volume por efeito da dilatação, a relação entre massa e o volume diminui. As densidades do biodiesel (Bio 100 - PD 0) de linhaça são as mais altas dentre as estudadas, onde seguem a seguinte ordem:  $\rho$  (Linhaça) >  $\rho$  (Semente de uva) >  $\rho$  (Milho). Desta forma, os sistemas com composições similares seguem a mesma ordem mencionada.

Após um levantamento na literatura sobre medidas experimentais em altas pressões para sistemas biodiesel + petro-diesel, apenas Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018), Dzida e Prusakiewicz (2008), e Ivaniš et al. (2016) relataram anteriormente dados destas misturas. Porém, com biodieseis e petro-dieses distintos ao deste estudo. Na faixa de pressão considerada neste trabalho, os valores experimentais de densidade da mistura mesmo considerando as distinções de biodiesel e petro-diesel, apresentam tendências semelhantes em relação a  $P$ ,  $T$  e composição volumétrica. As biomassas atribuídas aos biodieseis avaliados nas referências citadas são, respectivamente, óleo de cozinha residual, colza e girassol.

Na Figura 12 é apresentado uma análise entre os dados de densidade coletados experimentalmente neste trabalho e os dados apresentados pelas referências analisadas. São realizadas duas comparações a uma  $T$  fixa. O Gráfico (a): apresenta um comparativo entre as misturas biodiesel e petro-diesel estudada em cada trabalho, considerando misturas com porcentagens volumétricas de 5, 10 e 20 % de biodiesel no petro-diesel. Já o Gráfico (b): mostra um comparativo entre os diferentes petro-dieséis de cada literatura avaliada.

Os dados de densidade das misturas apresentadas no gráfico (a), como mencionado anteriormente, uma tendência em relação à  $P$  é observada, para todas as misturas. Além disso, analisando a adição de biodiesel no petro-diesel, para cada referência isoladamente, é possível observar um aumento na densidade à medida que é aumentada a porcentagem de biodiesel na mistura (resultados análogos aos observados neste trabalho, considerando as distinções nos materiais). Já os dados plotados no gráfico (b): para o petro-diesel (Bio 0 – PD 100) estudado nesta dissertação e nas referências: Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018), Dzida e Prusakiewicz (2008), e Ivaniš et al. (2016), foram observados desvios médios relativos absolutos de, respectivamente, 0,58%, 1,43% e 0,67% em relação ao petro-diesel estudado neste trabalho. O intervalo de pressão selecionado  $P = 0,10 - 60 \text{ MPa}$  foi escolhido pois, se trata do intervalo em comum entre as três referências submetidas a análise.

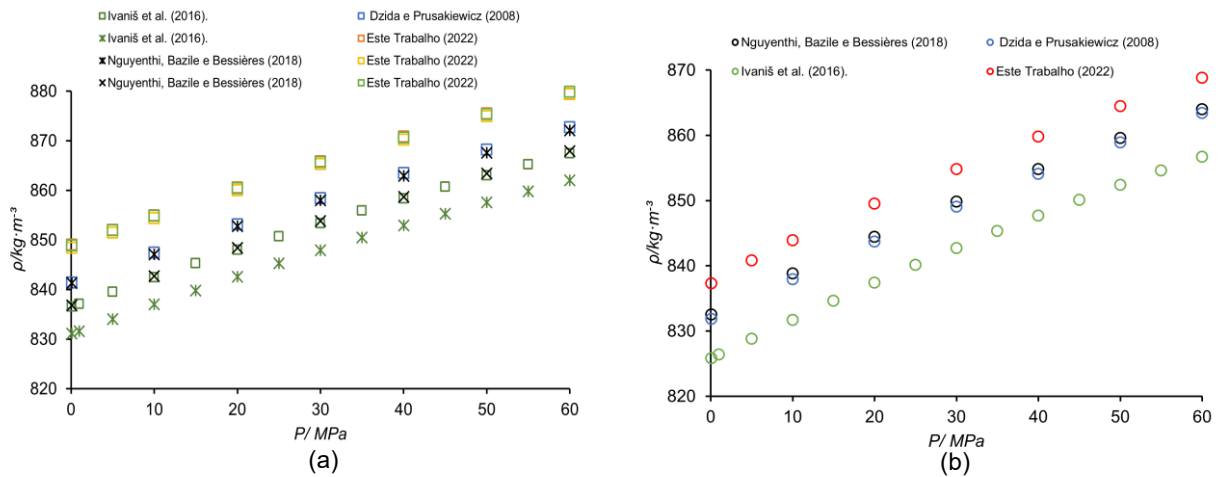
Figura 11 - Densidade em função da pressão para sistemas de biodieséis e petro-diesel estudados. Cada gráfico apresentado reporta dados para misturas biodieséis + petro-diesel. Onde: (a) Bio 100 – PD 0 (semente de uva), (b) Bio 60 – PD 40 representam o sistema de biodiesel de semente de uva. (c) Bio 100 – PD 0 (milho), (d) Bio 60 – PD 40 representam o sistema de biodiesel de milho. (e) Bio 100 – PD 0 (linhaça), (e) Bio 60 – PD 40 representam o sistema de biodiesel de linhaça. Por fim, (g) Bio 0 – PD 100. Para as temperaturas: (\*) 413,15 K, (●) 393,15 K, (◆) 373,15 K, (▲) 353,15 K, (■) 333,15 K, (×) 313,15 K, e (□) 293,15 K.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Figura 12 - Gráficos da densidade experimental em relação a pressão à temperatura constante  $T = 293,15\text{ K}$ . Gráfico (a): para as misturas biodiesel + petro-diesel. (x) Bio 5 – PD 95, (\*) Bio 10 – PD 90 e (□) Bio 20 – PD 80. Gráfico (b): para petro-diesel (○) Bio 0 – PD 100.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 4.2 Propriedades Derivadas

A equação de Tammann–Tait modificada foi aplicada para correlacionar os dados experimentais. Os parâmetros obtidos pelo ajuste são os coeficientes ( $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ ;  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$ ;  $C$ ) pelas Equações 1 – 3. Para tal, os ajustes dos dados foram realizados pelo algoritmo de Levenberg-Marquardt, inserido na ferramenta Matlab e pelo método GRG (Gradiente Reduzido Generalizado) não linear, onde este é inserido na ferramenta solver do MS-Excel, cujos valores são mostrados na Tabela 6. A escolha da pressão de referência deu-se a menor pressão de trabalho ( $P = 0,10\text{ MPa}$ ). Eles fornecem uma boa correlação com os dados experimentais, com um desvio relativo absoluto máximo de 0,05 %.

Tabela 6 – Parâmetros ajustáveis da equação de Tammann-Tait modificada para amostras de milho de semente de uva e biodiesel de linhaça aqui estudadas.

Parâmetros	Misturas (Bio % - PD %)					
	Bio 100 – PD 0	Bio 80 – PD 20	Bio 60 – PD 40	Bio 40 – PD 60	Bio 20 – PD 80	Bio 0 – PD 100
<i>Semente de uva</i>						
$a_0 (kg \cdot m^{-3})$	1081,2	1076,0	1022,1	1069,0	1056,8	1018,16
$a_1 (kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	-0,6319	-0,6452	-0,3388	-0,7168	-0,6996	-0,5500
$a_2 (kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-2})$	-1,40E-04	-1,21E-04	-6,29E-04	2,98E-06	-3,04E-05	-2,32E-04
$b_0 (MPa)$	429,7	425,6	578,1	452,1	443,8	357,10
$b_1 (MPa \cdot K^{-1})$	-1,3821	-1,3745	-1,8725	-1,5449	-1,5921	-1,1333
$b_2 (MPa \cdot K^{-2})$	1,20E-03	1,19E-03	1,57E-03	1,45E-03	1,56E-03	9,46E-04
C	0,0859	0,0856	0,1040	0,0878	0,0814	0,0800
<sup>a</sup> DMRA (%)	0,0077	0,0076	0,0448	0,0168	0,0175	0,0201
<sup>b</sup> DP ( $kg \cdot m^{-3}$ )	0,0856	0,0801	0,5319	0,1998	0,1795	0,2237
<i>Milho</i>						
$a_0 (kg \cdot m^{-3})$	1098,0	1099,3	1066,0	1061,0	1043,1	1018,2
$a_1 (kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	-0,7351	-0,7519	-0,6478	-0,6605	-0,6162	-0,5494
$a_2 (kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-2})$	1,11E-05	-2,86E-05	-9,87E-05	-8,87E-05	-1,68E-04	-2,32E-04
$b_0 (MPa)$	466,9	438,9	415,8	417,7	390,0	357,1
$b_1 (MPa \cdot K^{-1})$	-1,5680	-1,3791	-1,2329	-1,3950	-1,2453	-1,1333
$b_2 (MPa \cdot K^{-2})$	1,45E-03	1,11E-03	9,59E-04	1,26E-03	1,04E-03	9,46E-04
C	0,0877	0,0868	0,0937	0,0835	0,0836	0,0816
<sup>a</sup> DMRA(%)	0,0138	0,0439	0,0246	0,0114	0,0232	0,0201
<sup>b</sup> DP ( $kg \cdot m^{-3}$ )	0,1446	0,5015	0,2672	0,1165	0,2501	0,2237
<i>Linhaça</i>						
$a_0 (kg \cdot m^{-3})$	1097,0	1075,1	1066,0	1052,0	1039,0	1018,2
$a_1 (kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	-0,7179	-0,6224	-0,6315	-0,6081	-0,5976	-0,5494
$a_2 (kg \cdot m^{-3} \cdot K^{-2})$	-1,19E-05	-1,74E-04	-1,37E-04	-1,66E-04	-1,73E-04	-2,32E-04
$b_0 (MPa)$	433,2	403,8	377,3	397,7	401,1	357,1
$b_1 (MPa \cdot K^{-1})$	-1,4120	-1,2960	-1,1652	-1,2940	-1,3324	-1,1333
$b_2 (MPa \cdot K^{-2})$	1,25E-03	1,11E-03	9,41E-04	1,13E-03	1,19E-03	9,46E-04
C	0,0859	0,0830	0,0830	0,0833	0,0826	0,0816
<sup>a</sup> DMRA (%)	0,0110	0,0154	0,0146	0,0130	0,0090	0,0201
<sup>b</sup> DP ( $kg \cdot m^{-3}$ )	0,1242	0,1683	0,1764	0,1399	0,1045	0,2237

$$^a \%AARD = \frac{1}{N_{data}} \sum_{i=1}^{N_{data}} \left| \frac{\rho_i^{Calc} - \rho_i^{Exp}}{\rho_i^{Exp}} \right| \times 100; \quad ^b SD = \frac{\sqrt{\sum_i (\rho_i^{Calc} - \rho_i^{Exp})^2}}{N_{data}}$$

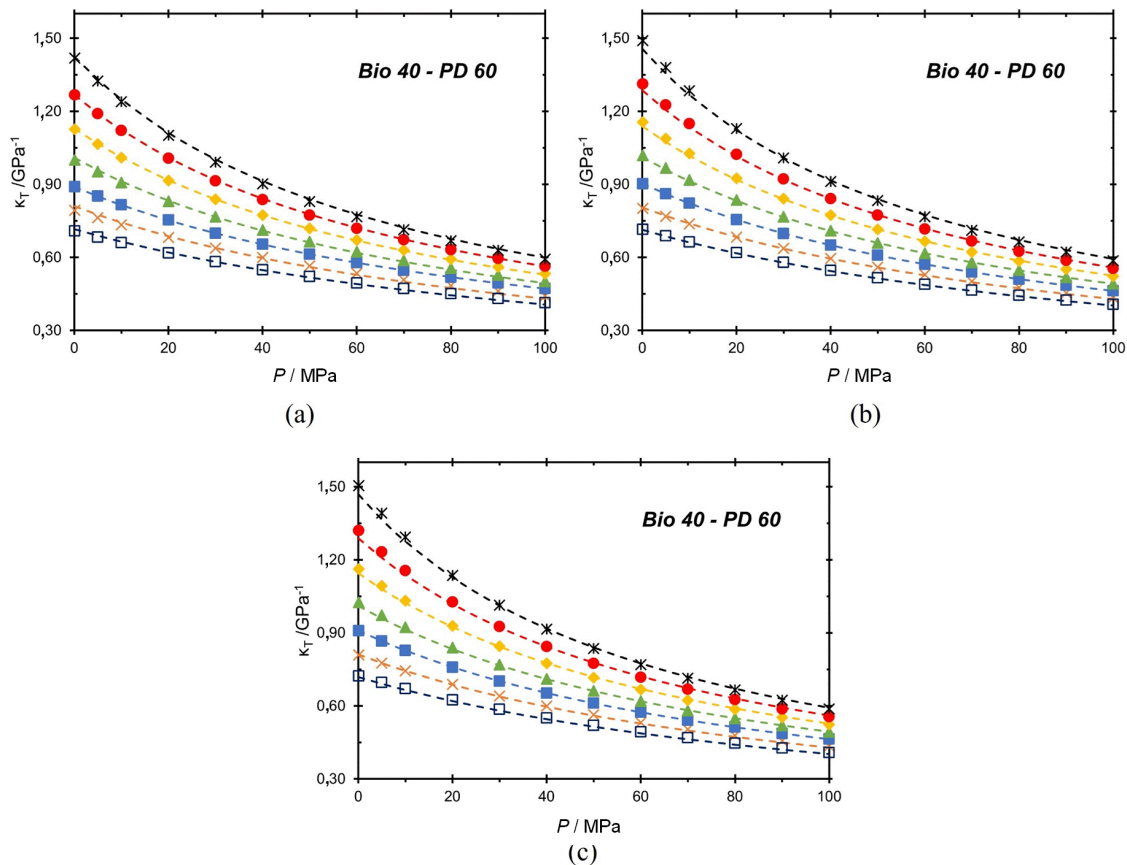
Como mencionado anteriormente, a partir da equação de Tammann–Tait modificada foi possível calcular as seguintes propriedades termodinâmicas derivadas: compressibilidade térmica ( $\kappa_T$ ), expansividade térmica isobárica ( $\alpha_P$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ), e diferença de capacidade calorífica de pressão e volume ( $c_p - c_v$ ). Todo o conjunto de dados experimentais ao longo de  $T$ ,  $P$ , e composição volumétrica é fornecido no **Apêndice D**.

Primeiramente, analisando o comportamento da compressibilidade térmica ( $\kappa_T$ ) para a mistura biodiesel + petro-diesel (Bio 40 – PD 60) na Figura 13, observa-se que para líquidos regulares,  $\kappa_T$  diminui com o aumento da pressão e com a diminuição da temperatura, resultado similar aos observados para os biodieseis e petro-diesel sem mistura (Bio 100 – PD 0 e Bio 0 – PD 100). O efeito da pressurização está relacionado a redução dos fenômenos de distância entre as moléculas, fazendo com que elas tenham menos volume livre, influenciando sua compressibilidade (DZIDA, 2007; PRATAS *et al.*, 2011b). Em relação à temperatura, seu aumento resulta em uma maior excitação molecular, o que gera um crescimento no volume livre e na distância molecular, resultando em fluidos mais compressíveis. O mesmo comportamento foi observado para todas as misturas estudadas.

A partir da Figura 13, pode-se observar que os valores de  $\kappa_T$  são praticamente os mesmos para todos os biodieseis aqui estudados. Esse comportamento pode ser atribuído à composição do metil éster dos biodieseis (rico em metil linolato e metil oleato), uma vez que todos os biodieseis analisados apresentam o mesmo composto majoritário, conforme apresentado na Tabela 2. Por esta razão, os valores de compressibilidade térmica são próximos para todas as amostras de biodiesel estudadas. Esta observação também pode ser atribuída as semelhanças entre as massas molares dos biodieseis, a saber: semente de uva (293,73 g/mol), milho (292,12 g/mol) e linhaça (294,29 g/mol).

Contudo, a semelhança entre estas propriedades rebate na atuação das forças intermoleculares presentes nos compostos, uma vez que, as forças que agem entre estas moléculas são conhecidas como forças de dispersão, e este tipo de interação depende da forma molecular das estruturas e são proporcionais às massas molares. Assim, devido a semelhança estrutural e mássica, estas propriedades obtiveram valores próximos.

Figura 13 – Compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) em função da pressão para três misturas de biodiesel e petro-diesel (40 % *vol* de biodiesel). Os símbolos representam a compressibilidade calculada pelo método de Tammann-Tait e as linhas pontilhadas por metodologia de Daridon e Bazile (2018). (a) biodiesel de semente de uva, (b) biodiesel de milho, e (c) biodiesel de linhaça. (\*, - - -) 413,15 K, (●, - - -) 393,15 K, (◆, - - -) 373,15 K, (▲, - - -) 353,15 K, (■, - - -) 333,15 K, (×, - - -) 313,15 K e (□, - - -) 293,15 K.



Fonte: Autoria própria.

A partir desses resultados, pode-se afirmar que ambas as metodologias para cálculo da compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ), Tammann-Tait e metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018) apresentam tendências semelhantes. Esta observação confirma a eficácia da metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018) para obtenção da compressibilidade isotérmica e sua incerteza combinada. Os resultados obtidos por esta metodologia podem ser vistos no **Apêndice E**, distribuídos nas Tabelas E1-E16. A semelhança entre os valores obtidos entre ambas as abordagens, além de provar a eficácia de ambas as metodologias para o cálculo do  $\kappa_T$ , corrobora também como informação acerca da qualidade dos ajustes realizados pela equação de Tammann-Tait, uma vez que, as formas de ajustar os dados experimentais são distintas e os resultados semelhantes.

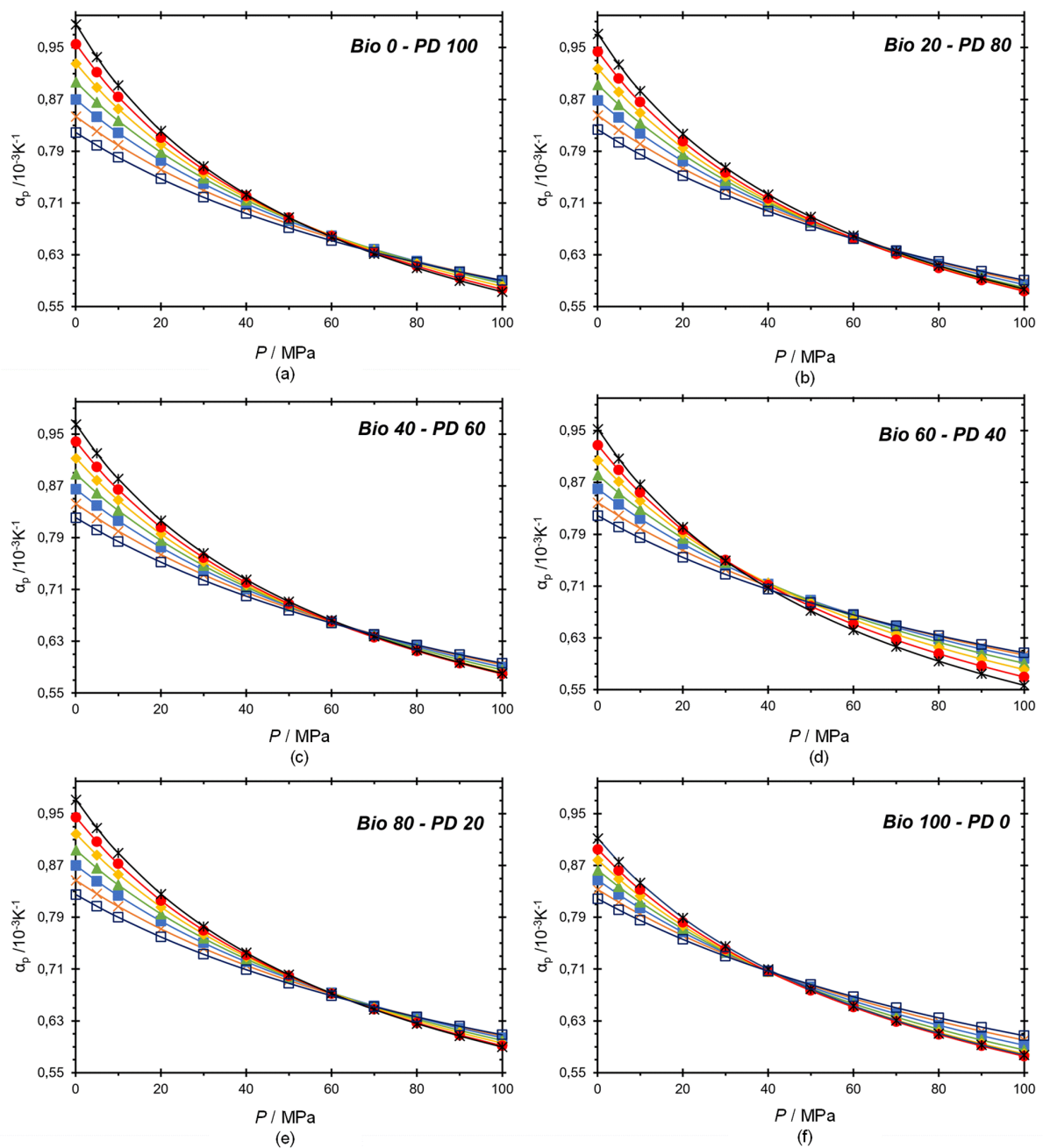
A Figura 14 apresenta os dados calculados para a expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ). Valores para esta propriedade já foram reportados em literaturas científicas, algumas com sistemas semelhantes (AISSA *et al.*, 2017; IVANIŠ *et al.*, 2016b; LIU *et al.*, 2017; VALERO *et al.*, 2021). Analisando a Figura 14, constatou-se que  $\alpha_p$  diminui com o aumento da pressão à temperatura constante para todos os sistemas biodiesel + petro-diesel estudados aqui. Além disso, pode-se observar um comportamento interessante, um ponto de inversão. Neste ponto, a expansividade térmica isobárica é independente da temperatura, ou seja,  $\left(\frac{\partial \alpha_p}{\partial T}\right) = 0$ . Este ponto ocorre em uma faixa de pressão entre 40 e 70 MPa e foi observado para todos os biodieseis (semente de uva, milho e linhaça) + petro-diesel estudados. Esse comportamento é bastante discutido na literatura, e os valores aqui calculados estão de acordo com os dados da literatura (DZIDA; PRUSAKIEWICZ, 2008; IVANIŠ *et al.*, 2016c; PRIETO *et al.*, 2015). Contudo, está observação pode estar associada ao efeito das forças intermoleculares presentes entre as moléculas de biodiesel e petro-diesel. Quando a pressão aumenta, a distância molecular diminui, conseqüentemente, predominam as forças repulsivas, que podem ser as responsáveis por esse ponto de interseção. Além disso, alguns estudos recentes revelaram que esse comportamento parece ser uma tendência geral para líquidos e que tais interseções ocorrem em pressões abaixo de 200 MPa (AITBELALE *et al.*, 2019a; MERCEDES TARAVILLO, VALENTÍN G BAONZA, 2003).

A partir dos dados da compressibilidade isotérmica ( $\kappa_T$ ) e da expansibilidade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ) obtidos acima, foi possível determinar a pressão interna ( $p_{int}$ ) e a diferença entre capacidade calorífica de pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ), a partir das relações descritas na Seção 2.5 (Equação do tipo Tait). Esses dados são fornecidos nas Tabelas D1-D32, no **Apêndice D**.

A  $p_{int}$  para líquidos está relacionada às forças de interação entre as moléculas, que é uma soma das forças de repulsão e atração, e em comparação com sistemas gasosos elas são muito menos afetados pela variação de  $T$  e  $P$  (DZIDA, 2007). Os resultados obtidos neste trabalho podem ser vistos na Figura 15, e estes, são semelhantes ao determinado por Ivaniš *et al.* (2016), ou seja, há a mesma tendência, onde a  $p_{int}$  diminui com o aumento da temperatura e apresenta um comportamento não linear em relação a pressão para todas as amostras estudadas. O comportamento em relação a pressão, observado na Figura 15, pode ser associado ao fenômeno de pressurização, onde, com o aumento da pressão ocorre a diminuição do livre caminho médio entre as moléculas. Por esse motivo, em pressões mais elevadas, a temperatura tende a inverter o comportamento (comportamento que ocorrer para alguns líquidos), já que

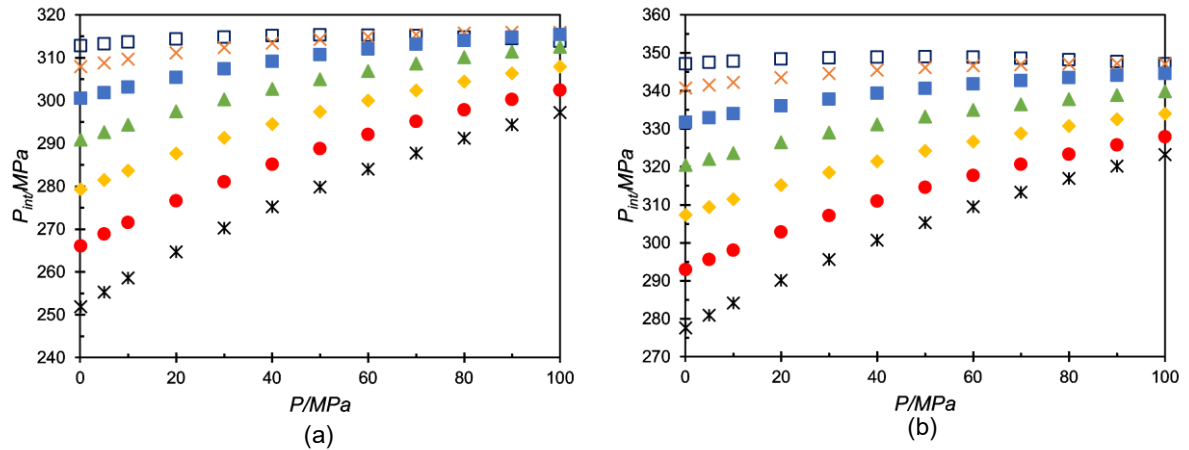
devido a aproximação as moléculas terão mais energia e ocorrerão mais interações entre elas, devido à proximidade.

Figura 14 - Expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ) em função da pressão para diferentes misturas de biodiesel e petro-diesel. Símbolos e linhas representam expansividades térmicas isobáricas. (a) Bio 0 – PD100, (b) Bio 20 – PD 80 (c) Bio 40 – PD 60, (d) Bio 60 – PD 40, (e) Bio 80 – PD 20, (f) Bio 100 – PD 0, para o biodiesel de linhaça. (\*) 413,15 K, (●) 393,15 K, (◆) 373,15 K, (▲) 353,15 K, (■) 333,15 K, (×) 313,15 K, e (□) 293,15 K. Linhas são para guiar visão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 15 - Pressão interna ( $P_{int}$ ) em função da pressão para as misturas (a) Bio 0 – PD 100 e (b) Bio 80 – PD 20, para o sistema de biodiesel de linhaça. Para as temperaturas: (\*) 413,15 K, (●) 393,15 K, (◆) 373,15 K, (▲) 353,15 K, (■) 333,15 K, (×) 313,15 K, e (□) 293,15 K.



Fonte: Autoria própria.

O conhecimento da diferença entre  $c_p$  e  $c_v$  ( $c_p - c_v$ ) é muito útil para fins industriais, uma vez que dados de  $c_v$  são raros na literatura. Desta forma, de posse dos dados de  $c_p$  e ( $c_p - c_v$ ), a obtenção torna-se trivial (IVANIŠ *et al.*, 2016<sup>a</sup>, 2016b). Os dados de capacidade calorífica de pressão constante ( $c_p$ ) são muito importante em engenharia de processos, por exemplo, para a simulação do sistema de injeção de biodiesel e para o projeto de equipamentos, como o trocador de calor (DO CARMO *et al.*, 2020; SANDLER, 2017). Como esperado para líquidos, ou seja, a diferença entre  $c_p$  e  $c_v$  aumenta com a diminuição na temperatura e diminui com o aumento da pressão.

#### 4.3 Validação de modelo para predição de densidade de misturas de biodiesel e petro-diesel

Para validar o modelo proposto foi utilizado um conjunto de dados da literatura juntamente com dados experimentais aqui determinados, conforme apresentado na Tabela 7. Vale lembrar que o número de dados experimentais para biodiesel + petro-diesel em condições de alta pressão e altas temperaturas, ainda é escasso na literatura e é limitado pela composição do biodiesel na mistura (geralmente, até 20 %  $v/v$  de biodiesel). Este banco de dados aqui utilizado abrange uma ampla faixa de temperatura ( $T = 293,15$  a  $413,15$  K) e pressões de até 140,00 MPa, em um total de 2.243 pontos de dados experimentais. Um resumo destes dados é apresentado na Tabela 8. Pode-se observar que os desvios médios relativos absolutos (DMRA%) são inferiores a 0,50 %. Este resultado evidencia uma boa concordância entre os

dados experimentais e os do modelo aqui proposto.

Tabela 7 - Dados da literatura, juntamente com os determinados neste trabalho, serviram para testar a capacidade preditiva do modelo aqui proposto.

Autores-Referência	Biodiesel	Mistura	$T$ Range /K	$P$ Range /MPa	Número de dados experimentais
DZIDA; PRUSAKIEWICZ (2008)	Colza	Bio0 - PD100	293,15 - 318,15	0,10 – 100,00	67
		Bio20 - PD80	293,15 - 318,15	0,10 – 100,00	67
		Bio100 - PD0	293,15 - 318,15	0,10 – 100,00	67
IVANIŠ et al. (2016b)	Girasol	Bio0 - PD100	293,15 - 413,15	0,10 – 60,00	154
		Bio10 - PD90	293,15 - 413,15	0,10 – 60,00	152
		Bio20 - PD80	293,15 - 413,15	0,10 – 60,00	152
NGUYENTHI; BAZILE; BESSIÈRES (2018)	Óleos de cozinha (residual)	Bio0 - PD100	293,15 - 353,15	0,10 – 140,00	60
		Bio05 - PD95	293,15 - 353,15	0,10 – 140,00	60
		Bio10 - PD90	293,15 - 353,15	0,10 – 140,00	60
		Bio100 - PD0	293,15 - 353,15	0,10 – 140,00	60
Este trabalho (2022)	Semente de uva	Bio0 - PD100	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio20 - PD80	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio40 - PD60	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio60 - PD40	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio80 - PD20	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
Este trabalho (2022)	Milho	Bio20 - PD80	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio40 - PD60	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio60 - PD40	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio80 - PD20	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
Este trabalho (2022)	linhaça	Bio20 - PD80	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio40 - PD60	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio60 - PD40	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84
		Bio80 - PD20	293,15 - 413,15	0,10 – 100,00	84

Os parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 8 foram utilizados para avaliar o novo modelo. O desvio padrão (DP) é usado para estimar a dispersão dos dados em torno de seu valor médio. Enquanto o desvio relativo absoluto (DRA) mede o desvio entre um valor previsto e um valor experimental. Já o desvio médio relativo absoluto (%DMRA) é uma média aritmética geral de todos os desvios relativos expressos no módulo. Por fim, o bias informa sobre a simetria da distribuição do desvio (PINTO, 2007).



Tabela 8 - Análises estatísticas (DP, DRA, %DMRA, bias) para previsão do efeito da pressão na densidade de misturas de biodiesel + petro-diesel.

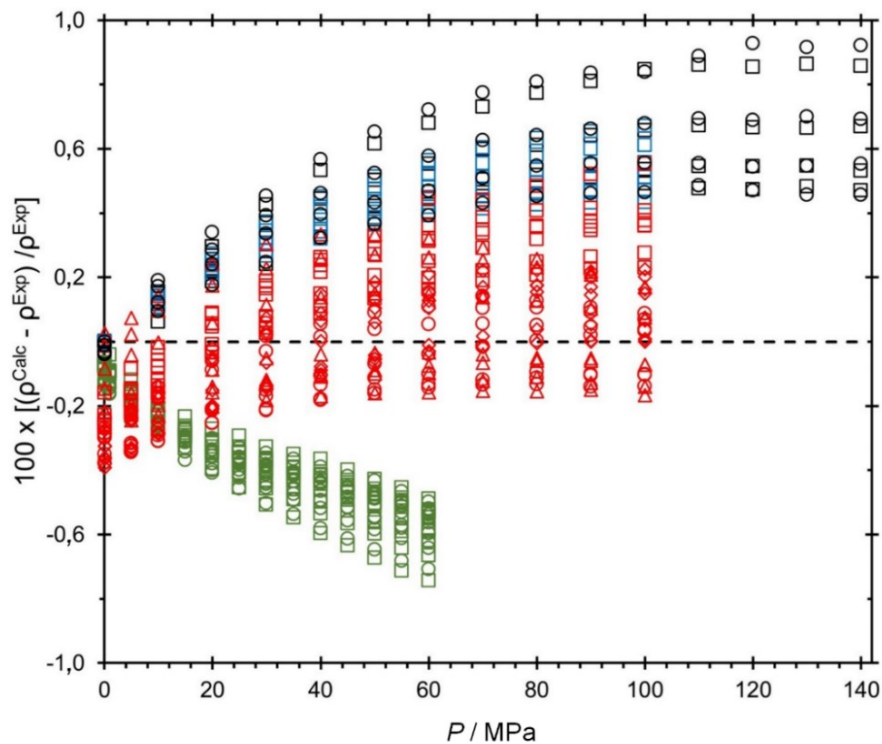
Autores-Referência	Mistura	DP <sup>a</sup>	DRA <sup>b</sup>	%DMRA <sup>c</sup>	bias <sup>d</sup>
DZIDA; PRUSAKIEWICZ (2008)	Bio0 - PD100	0,5667	4,1173	0,4798	4,1173
	Bio20 - PD80	0,4401	3,1995	0,3689	3,1966
	Bio100 - PD0	0,0967	0,6110	0,0674	-0,6110
IVANIŠ et al. (2016b)	Bio0 - PD100	0,2433	2,5611	0,3095	2,5565
	Bio10 - PD90	0,2673	2,9764	0,3630	2,9764
	Bio20 - PD80	0,2787	3,1884	0,3872	3,1884
NGUYENTHI; BAZILE; BESSIÈRES (2018)	Bio0 - PD100	0,6157	4,2483	0,4937	4,2483
	Bio05 - PD95	0,6091	4,2253	0,4889	4,2025
	Bio10 - PD90	0,5906	4,1140	0,4739	4,0650
Este trabalho (2022)	Bio100 - PD0	0,5462	3,7470	0,4012	3,7470
	Bio0 - PD100	0,4717	3,6816	0,4400	3,6816
	Bio20 - PD80	0,2246	1,8028	0,2138	1,0399
	Bio40 - PD60	0,1670	1,2102	0,1449	-0,4306
	Bio60 - PD40	0,2744	1,8876	0,2280	1,4187
Este trabalho (2022)	Bio80 - PD20	0,1094	0,8825	0,1026	-0,5180
	Bio20 - PD80	0,3231	2,6027	0,3092	2,4048
	Bio40 - PD60	0,2157	1,5291	0,1831	-1,3001
	Bio60 - PD40	0,1253	0,9728	0,1148	-0,3222
Este trabalho (2022)	Bio80 - PD20	0,2497	2,0519	0,2417	1,6848
	Bio20 - PD80	0,2434	1,9464	0,2307	1,2597
	Bio40 - PD60	0,1670	1,2474	0,1488	-0,3198
	Bio60 - PD40	0,1634	1,2601	0,1482	-0,8763
	Bio80 - PD20	0,1561	1,2613	0,1466	-0,0698

$$\mathbf{a}: DP = \frac{\sqrt{\sum_i (\rho_i^{Calc} - \rho_i^{Exp})^2}}{N_{data}}; \mathbf{b}: DMA = \frac{1}{N_{data}} \sum_i |\rho_i^{Calc} - \rho_i^{Exp}|; \mathbf{c}: \%DMRA = \frac{1}{N_{data}} \sum_{i=1}^{N_{data}} \left| \frac{\rho_i^{Calc} - \rho_i^{Exp}}{\rho_i^{Exp}} \right| \times 100; \mathbf{d}: bias = \frac{1}{N_{data}} \sum_i (\rho_i^{Calc} - \rho_i^{Exp}).$$

A Figura 16 descrita abaixo mostra o desvio relativo versus a pressão experimental para todos os conjuntos de dados descritos nas Tabela 7 e 8. A partir desses resultados, pode-se observar domínios de desvios positivos e negativos. Isso significa que não há viés/erro sistemático no método de predição proposto (DARIDON, 2020). Embora tenha sido observado um desvio próximo a 1,00 % em relação aos dados obtidos por Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018), o provável motivo para estes dados apresentarem os maiores valores de desvios dentre os testados aqui, é por apresentarem a maior faixa de pressão testada ( $P = 0,10 - 140,00 MPa$ ), como apresentado na Tabela 8, onde, mesmo com desvios nesta ordem de 1,00 % o seus %DMRA (parâmetro estatístico que considera todos os valores experimentais) foram inferiores a 0,50 %. Para Dzida e Prusakiewicz (2008) foi observado um desvio próximo a

0,60 % com um %DMRA máximo de 0,48 %, e para os dados obtidos por Ivaniš *et. al* (2016) 0,70 %, com %DMRA máximo de 0,39 %, conforme observado na Tabela 8. Além disso, é possível observar um desvio sistemático em relação a pressão, onde, com o aumento da pressão os desvios relativos seguiram uma tendência crescente, esta irregularidade em relação a pressão é observada também em outros modelos capazes de prever os efeitos da pressão.

Figura 16 - Desvios relativo em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto e os valores experimentais coletados da literatura e determinados experimentalmente neste trabalho. Símbolos pretos ( $\square, \circ$ ) refere-se ao Bio 05 - PD 95 e Bio 10 - PD 90 para Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018), símbolos azul ( $\square$ ) refere-se ao Bio 20 - PD 80 para Dzida e Prusakiewicz (2008), símbolos verdes ( $\square, \circ$ ) refere-se ao Bio 10 - PD 90 e Bio 20 - PD 80 para Ivaniš *et al.*(2016); e símbolos vermelhos ( $\square, \diamond, \circ, \triangle$ ) refere-se ao Bio 20 – PD 80, Bio 40 – PD 60, Bio 60 – PD 40, e Bio 80 – PD 20 para os dados coletados neste trabalho, para o biodiesel de linhaça.



**Fonte:** Autoria própria.

Outro teste realizado é mostrado na Figura 17. Neste caso, foram considerados apenas os dados experimentais coletados neste trabalho, pois apresentam uma melhor distribuição da mistura estudada. Esta Figura é subdividida em seis gráficos, onde os gráficos da esquerda (a, c e e) são os desvios relativos em função dos dados experimentais obtidos. E os gráficos à direita (b, d e f) são os dados de densidade obtidos pelo modelo proposto em função dos dados experimentais. O objetivo principal deste estudo é evidenciar os desvios obtidos pelo

modelo proposto, informando se há maior tendência a superestimar ou subestimar. Além disso, a partir da análise da Figura 17 também é possível observar o quanto o modelo proposto se desviou de um erro adotado de 0,50 %.

A partir desses resultados, pôde-se perceber que o modelo aqui proposto não superestima ou subestima, com desvios inferiores ao limite estabelecido, ou seja,  $\pm 0,50\%$  (linhas pontilhadas vermelhas), conforme mostrado na Tabela 8.

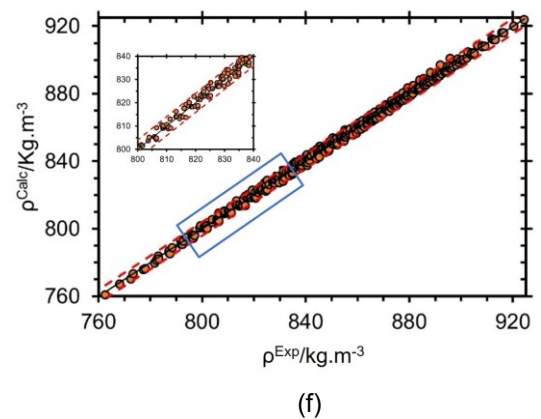
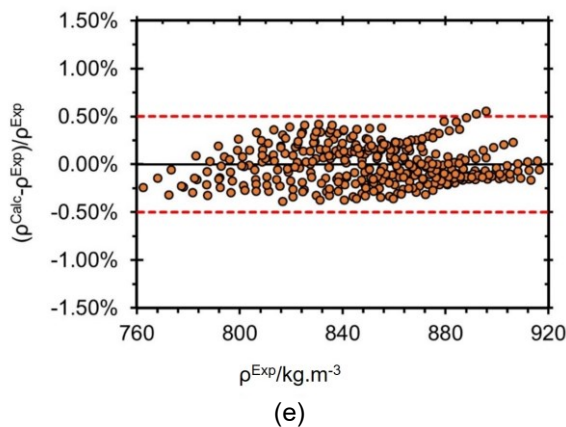
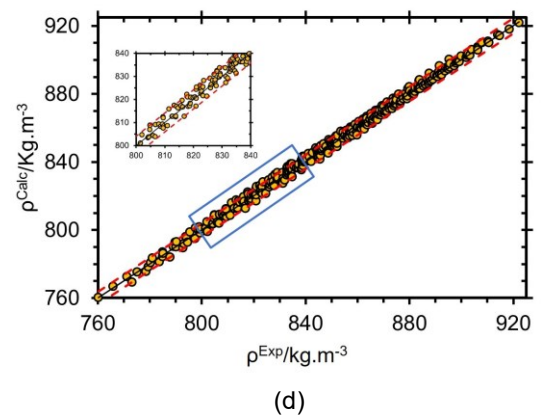
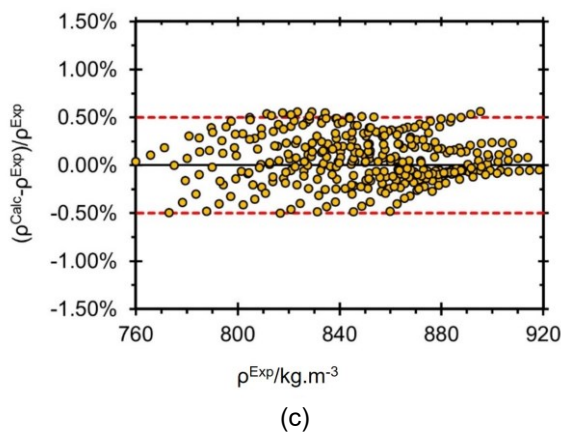
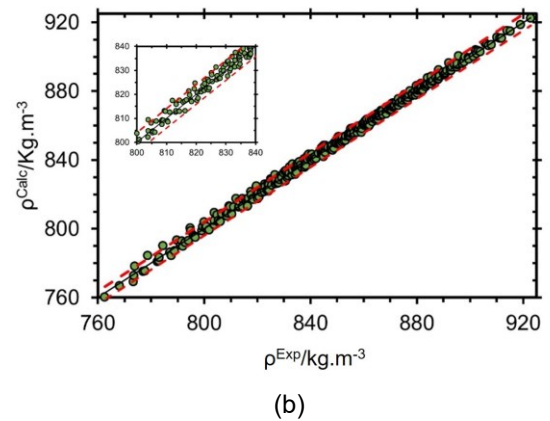
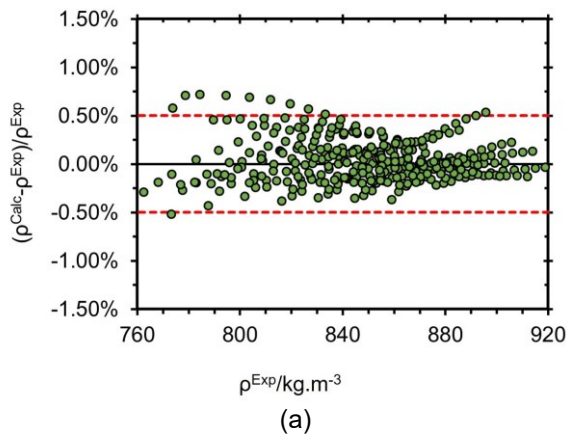
A obtenção do %DMRA abaixo de 0,50 % corrobora com o valor obtido para incerteza na medição da densidade, onde o valor da incerteza máximo para estas medições foi de  $U(\rho) = 3.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , este valor, relacionando-o com as medidas e transformando-o para porcentagem dá o valor de aproximadamente 0,46 %. Este resultado comprova a acurácia do modelo, uma vez que, os resultados obtidos pelo modelo estão próximos ao erro da medida experimental. Todas as incertezas calculadas estão dispostas no **Apêndice F**.

A acurácia do modelo proposto nesta dissertação, observado na Figura 16 (considerando apenas os dados experimentais obtidos), pode ser atribuída ao fato de que o biodiesel de semente de uva, milho e linhaça apresentam o C18:1 e C18:2 como ésteres majoritários na sua composição. Onde, a grande maioria dos biodieseis correlacionados para o modelo, também, apresentam estes mesmos ésteres em maior quantidade em suas composições. As composições dos biodieseis utilizados no conjunto de correlação podem ser vistas no **Apêndice G**.

Outro teste submetido ao modelo, este, com finalidade de avaliar a consistência do método para previsão do efeito da pressão até condições extremas de pressão, é apresentado na Figura 18. Como mostrado anteriormente, o modelo prediz com precisão próxima ao valor da incerteza experimental da medida de densidade, se mostrando como um modelo preciso para os sistemas testado. No entanto, o efeito da pressão foi verificado apenas para os valores dos dados experimentais empregados na validação do modelo (dados apresentados na Tabela 7). Assim, o intuito deste teste é observar se ocorre alguma inconsistência termodinâmica na extrapolação do modelo para pressões além das testadas.

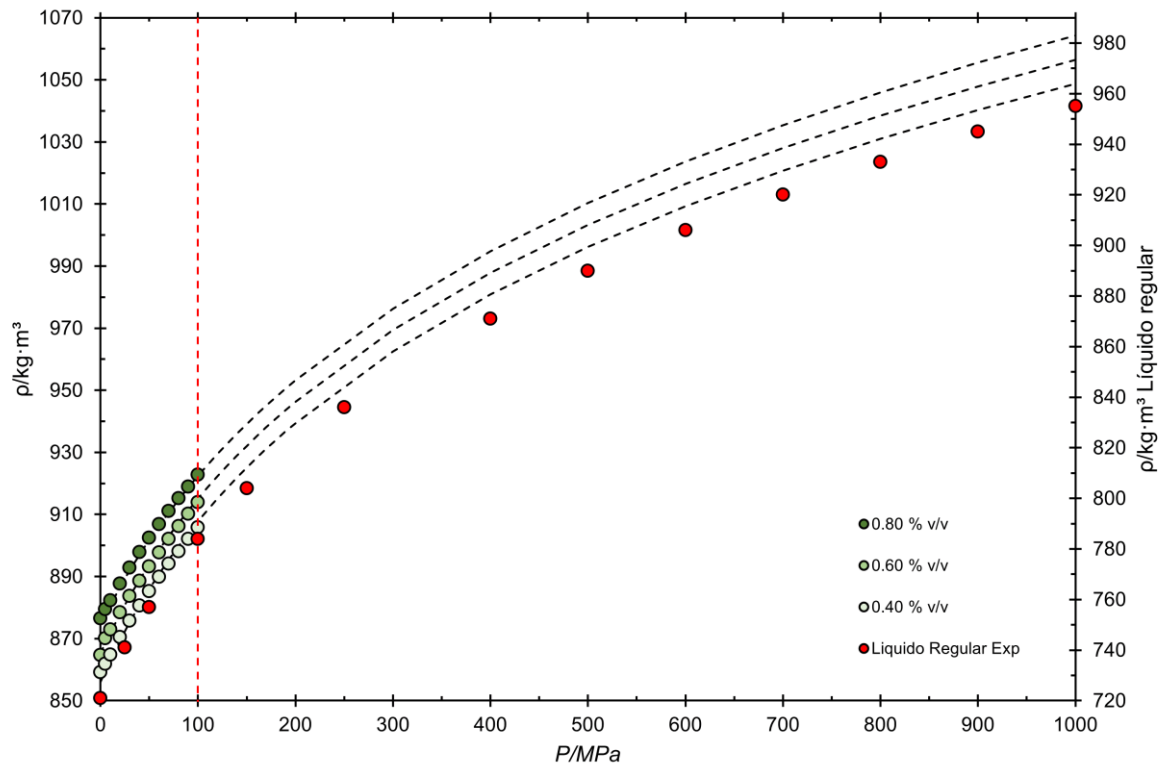
A Figura 18 mostra que o comportamento do modelo para pressões acima das testadas apresentam a tendência esperada, ou seja, de aumento não linear com a pressão. Este comportamento consistente é confirmado quando comparado com o líquido regular mostrado na Figura 18, onde, os círculos vermelhos apresentam dados experimentais de densidade até a pressões de  $1000 \text{ MPa}$  para o 2,2,4-Trimetilhexano (líquido com comportamento regular, assim como os estudados nesta dissertação).

Figura 17 - Gráficos da densidade experimental ( $\rho^{Exp}$ ) versus densidade calculada ( $\rho^{Calc}$ ) para dados experimentais de misturas de petro-diesel e biodiesel obtidos neste trabalho, calculados pelo modelo proposto. Gráficos à esquerda (a, c e e) representam erros relativos para Bio 20 – PD 80, Bio 40 – PD 60, Bio 60 – PD 40 e Bio 80 – PD 20. Gráficos à direita (b, d e f) mostram como as densidades calculadas são distribuídas aleatoriamente ao longo da diagonal  $\rho^{Calc} = \rho^{Exp}$ . Linhas vermelhas pontilhadas (- - -) corresponde a  $\pm 0.50\%$  desvio relativo. Círculos verdes (●) representa o biodiesel de semente de uva, círculos amarelos (●) representa o biodiesel de milho, círculos marrons (●) representa o biodiesel de linhaça.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - Teste de predição do modelo à altas pressões. Gráficos para sistema do biodiesel de semente de uva, círculos representam dados experimentais (●) composição Bio 80 – PD 20; (◐) composição Bio 60 – PD 40; (○) composição Bio 40 – PD 60; (●) densidade experimental para um líquido regular qualquer. Linhas contínuas pontilhadas (---) representam dados preditos pelo modelo proposto nesta dissertação.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.1 Comparativo entre modelos com diferentes abordagens. Modelo proposto nesta dissertação e modelo desenvolvido por Do Carmo et al. (2015)

O modelo proposto neste trabalho foi submetido a um comparativo com uma abordagem de modelo preditiva, onde esta abordagem faz uso da equação de Rackett-Soave, adicionada a uma equação do tipo Tait. O modelo empregado foi proposto por Do Carmo et al. (2015), e é indicado para predição de densidades em altas pressões de ésteres puros e biodieseis. A Equação (17), descrita abaixo, se trata da função algébrica geral para aplicação do modelo descrito e as Equações (18) e (19) são parâmetros ajustáveis dependentes de temperatura.

$$\rho = \frac{\rho_0(T, P_{ref})}{1 - C(T) \cdot \ln \left( \frac{B(T) + P}{B(T) + P_{ref}} \right)} \quad (17)$$

$$B(T) = b_0 + b_1 \cdot \left( \frac{T}{E} \right) + b_2 \cdot \left( \frac{T}{E} \right)^2 + b_3 \cdot \left( \frac{T}{E} \right)^3 + b_4 \cdot \left( \frac{T}{E} \right)^4 \quad (18)$$

$$C(T) = c_0 + c_1 \cdot \left( \frac{T}{E} \right) \quad (19)$$

onde:  $\rho$  é a densidades em altas pressões (propriedade estimada),  $\rho_0(T, P_{ref})$  é a densidade em função da temperatura à uma pressão de referência (0,10 MPa). O  $\rho_0$  foi obtido pela equação de Rackett-Soave, equação preditiva para determinação da densidade a uma pressão atmosférica. Este modelo tem como entrada as propriedades críticas do composto ( $T_c, P_c$  e  $\omega$ ) e a massa molar do composto (RACKETT, 1970; SOAVE, 1995).

Para a aplicação do modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) foram utilizados os parâmetros obtidos no trabalho do método, a saber:  $b_0 = 8,35115 \text{ MPa}$ ;  $b_1 = 11,3489 \text{ MPa}$ ;  $b_2 = -2,24591$ ;  $b_3 = 0,0000 \text{ MPa}$ ;  $b_4 = 0,0000 \text{ MPa}$ ;  $c_0 = 3,9388 \times 10^{-2}$ ;  $c_1 = 5,4591 \times 10^{-5}$ ;  $E = 100 \text{ K}$ ;  $P_{ref} = 0,10 \text{ MPa}$ . Os dados utilizados para a estimativa dos parâmetros foram restringidos entre os compostos mais presentes em perfis ésteres de biodieseis, para isto foram utilizados os seguintes componentes: metil miristato (ME-C14:0), metil oleato (ME-C18:1) e metil linoleato (ME-C18:2) (DO CARMO *et al.*, 2015).

O modelo apresentado foi utilizado para estimar a densidade HPHT dos biodieseis coletados experimentalmente neste trabalho. Os valores utilizados para este teste foram apenas os biodieseis sem misturas (Bio 100 - PD 0), pois os dados regredidos são de ésteres componentes do biodiesel. Os dados de entrada para a estimativa do modelo são apresentados na Tabela 9. Para obtenção das propriedades críticas dos biodieseis estudados nesta dissertação foi aplicado uma regra de mistura de Kay, onde foram considerados os perfis ésteres descritos na Tabela 2 e as propriedades críticas de cada éster puro.

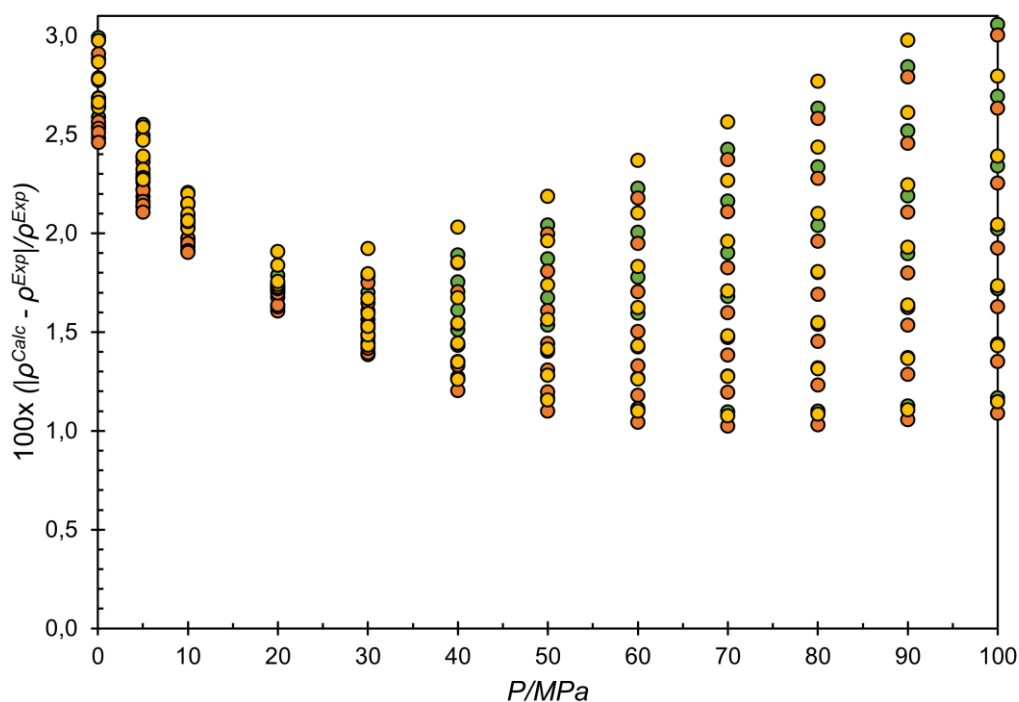
Tabela 9 - Propriedades críticas e massa molar dos biodieseis estudados nesta dissertação, valores aplicados na estimativa da densidade HPHT pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015).

Biodiesel	Propriedades			
	Massa molar <sup>a</sup> / $g \cdot mol^{-1}$	$T_c/K^b$	$P_c/bar^b$	$\omega^b$
Semente de uva	293,730	776,836	12,204	0,907
Milho	292,120	769,111	12,117	0,894
Linhaça	294,290	776,813	12,242	0,910

**a** - Massas molares obtidas pelo método do UNIFAC; **b** - Propriedade críticas calculadas a partir da regra de Kay, com os dados obtidos por Evangelista, Do Carmo e De Sant'Ana (2018).

Aplicando na Equação (17) os parâmetros ajustados por Do Carmo *et al.* (2015), juntamente com os valores de propriedades críticas e massa molar apresentados na Tabela 9, foi possível obter as densidades preditas pelo modelo para os biodieseis de semente de uva, milho e linhaça. A Figura 19 reporta um gráfico do desvio relativo absoluto (análise entre os dados experimentais e os valores de densidades preditos pelo modelo) em relação as pressões experimentais.

Figura 19 - Desvios relativos absolutos em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) para os valores de Bio 100 – PD 0 determinados experimentalmente neste trabalho. Círculos verdes (●) representa o biodiesel de semente de uva, círculos amarelos (●) representa o biodiesel de milho, círculos marrons (●) representa o biodiesel de linhaça.



Fonte: Autoria própria.

O %DMRA para o método de Rackett-Soave com a equação de Tait na predição dos biodieséis de semente de uva, milho e linhaça, respectivamente, foram: 1,89 %, 1,93 % e 1,82 %. Contudo, como visto, bons resultados foram obtidos para este modelo. Uma observação que deve ser considerada é a sensibilidade na precisão da densidade obtida por este modelo, onde, a precisão do cálculo da densidade utilizando as equações de Rackett e suas modificações está fortemente ligada à metodologia utilizada para se calcular as propriedades críticas e, no caso de misturas (biodiesel), também à regra de mistura utilizada.

Para realizar um comparativo entre o modelo proposto nesta dissertação e o modelo sugerido por Do Carmo *et al.* (2015) é necessário um biodiesel diferente dos correlacionados (Tabela 5). Por esta razão, os dados dispostos na Figura 19 não serviram para realizar esta comparação. Contudo, o biodiesel de óleo de cozinha residual foi utilizado para este procedimento comparativo, pois apenas esta literatura (Nguyenthi, Bazile e Bessièeres (2018)), dentre as avaliadas, apresentava os valores composicionais do biodiesel (perfil éster). A necessidade do perfil éster está atrelada à obtenção das propriedades críticas da mistura. Na Tabela 10, são expostas as informações do biodiesel utilizado no teste.

Tabela 10 - Informações do biodiesel de óleo de cozinha residual, coletados por Nguyenthi, Bazile e Bessièeres (2018).

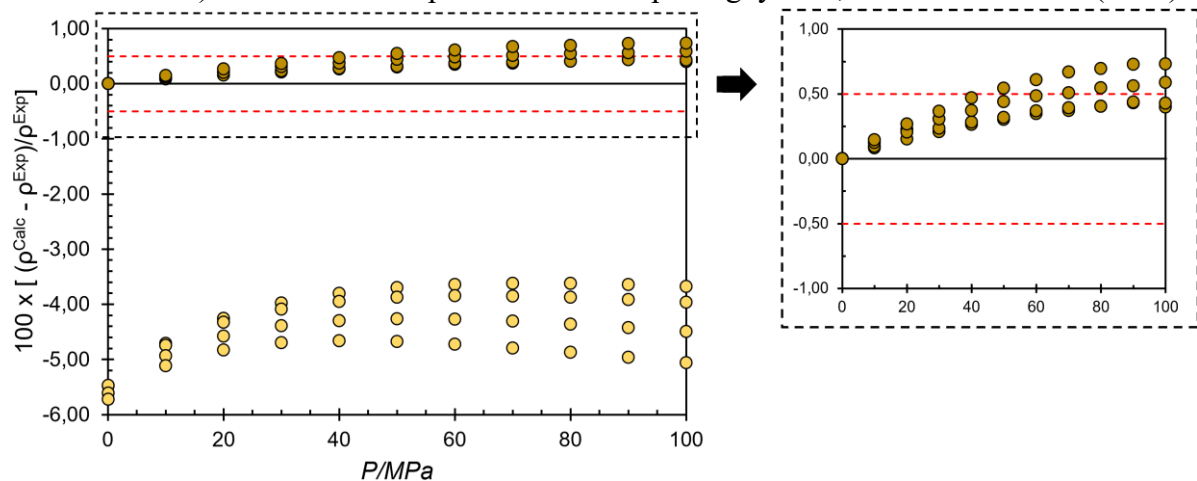
Informações dos compostos <sup>a</sup>				Propriedades <sup>b</sup>			Perfil éster <sup>c</sup>
Composto	Acrônimo	Fórmula molecular	Número CAS	$T_c/K$	$P_c/bar$	$\omega$	$m/m$
Metil miristato	ME-C14:0	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	124-10-7	730,00	13,20	0,7765	0,0322
Metil palmitato	ME-C16:0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	112-39-0	760,00	11,70	0,7982	0,0716
Metil palmitoleato	ME-C16:1	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	10030-74-7	764,03	12,82	0,8803	0,2514
Metil stearato	ME-C18:0	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	112-61-8	785,00	10,80	0,8529	0,0976
Metil oleato	ME-C18:1	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	112-62-9	777,00	12,10	0,9068	0,3759
Metil linolato	ME-C18:2	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	112-63-0	778,00	12,40	0,9220	0,1318
Metil arachidato	ME-C20:0	C <sub>21</sub> H <sub>42</sub> O <sub>2</sub>	1120-28-1	802,27	9,59	1,0499	0,0053
Metil eicosenoato	ME-C20:1	C <sub>21</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	3946-08-5	805,38	9,91	1,0361	0,0177
Metil eicosanoato	ME-C20:2	C <sub>21</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	2463-02-7	808,45	10,24	1,0222	0,0062
Informações obtidas para o biodiesel de óleo de cozinha residual				$T_c/K$	$P_c/bar$	$\omega$	$MM/g.mol^{-1}$
				764,75	12,02	0,8793	285,5039

**a** - Dados coletados no NIST (National Institute of Standards and Technology); **b** - Dados coletados na referência Evangelista, Do Carmo e De Sant'Ana (2018); **c** - Dados coletados na referência Nguyenthi, Bazile e Bessièeres (2018).



Como informado anteriormente, para a predição da densidade HPHT pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) são requeridos dados de massa molar e propriedades críticas do biodiesel. A aquisição destes valores foi realizada de forma análoga a obtenção dos dados para os biodieseis de semente de uva, linhaça e milho. Assim, a Figura 20 reporta os desvios relativos em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) e pelo modelo obtido nesta dissertação, ambos em relação aos valores de densidade experimentais de Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018). Para esta análise foram obtidos %DMRA para o modelo proposto e modelo comparado de 4,43 % e 0,40 %, respectivamente.

Figura 20 - Desvios relativos em relação a pressão para valores de densidade calculados pelo modelo proposto por Do Carmo *et al.* (2015) (metodologia de Rackett-Soave-Tait) (○) e para o modelo proposto nesta dissertação (●). Para os dados de biodiesel de óleo de cozinha residual (Bio 100 – PD 0) determinados experimentalmente por Nguyenthi, Bazile e Bessières (2018).



**Fonte:** Autoria própria.

Na Figura 19, tem-se o comportamento dos desvios da densidade frente a variações na pressão. Apesar do método de Rackett-Soave-Tait ter apresentado o maior %DMRA dentre os modelos, esta metodologia ainda deve ser considerado, pois, como mencionado anteriormente, a precisão do cálculo da densidade utilizando equações de Rackett e suas modificações estão fortemente ligadas as propriedades críticas e as regras de misturas utilizadas. Além disso, vale ressaltar que não foi realizado uma nova estimativa dos valores da equação de Tait e o modelo é de um cunho preditivo, podendo ser utilizado sem dispor de qualquer resultado experimental. Estes são prováveis motivos para os maiores desvios deste modelo. Uma outra informação que deve ser ressaltada é o fato dos modelos serem de diferentes abordagens.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, novos dados experimentais de densidade HPHT para misturas binárias de biodieseis (semente de uva, milho e linhaça) + petro-diesel foram determinados para pressão e temperatura abaixo de 100,00 MPa e 413,15 K, respectivamente. Informações destes sistemas são importantes para uma melhor compreensão do comportamento das propriedades volumétrica em condições de operação, para motores de combustão interna.

Os valores experimentais obtidos, foram correlacionados a equação de Tammann-Tait modificada, obtendo desvios médios relativos absolutos (%DMRA) inferiores a 0,05%, mostrando que esta equação pode descrever o comportamento volumétrico do sistema. A partir dos parâmetros obtidos pelo ajuste desta equação (Tammann-Tait), foi possível obter as seguintes propriedades: compressibilidade térmica ( $\kappa_T$ ), expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ), pressão interna ( $p_{int}$ ) e diferença de capacidade térmica de pressão e volume ( $c_p - c_v$ ). De posse destas propriedades, juntamente com a densidade HPHT pode-se afirmar que os sistemas estudados se comportam como um líquido regular.

Além disso, com o conjunto de dados obtidos neste trabalho, juntamente com dados experimentais da literatura, foi proposto um novo modelo para prever o efeito da pressão sobre a densidade, com base na equação de estado proposta por Murnaghan, com desvio médio relativo absoluto inferior a 0,50%, obtendo resultados próximos a incerteza na medida da densidade. Desta forma, o método é proposto para a estimativa do comportamento ( $T, P, \rho, \% v/v$ ) de misturas biodiesel + petro-diesel desde que as temperaturas e pressões pertençam ao intervalo correlacionado de, a saber:  $P = 0,10$  a 140,00 MPa e  $T = 283,15$  a 413,15 K. A grande vantagem do método de previsão sugerido é ter como parâmetro de entrada a densidade dos compostos presentes na mistura, uma vez que, a partir disso, pode-se cobrir uma faixa de compostos (biodiesel e petro-diesel) que não estejam correlacionados no banco de dados deste trabalho.

## 6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 798/2019**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 05 dez.2021

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 30/2016**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 05 dez.2021

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 45/2014**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 05 dez.2021

CHIAPPINI, Gabriel. Combustíveis, Meio ambiente, Transição energética: RenovaBio movimentou grandes grupos em busca da emissão de créditos de descarbonização. 2019. Disponível em:< <https://epbr.com.br/renovabio-movimentou-grandes-grupos-em-busca-da-emissao-de-creditos-de-descarbonizacao/>>. Acesso em: 19 de fev. 2022.

AHMED, T. H. **Hydrocarbon Phase Behavior**. [S. l.]: Gulf Pub Co, 1989.

AISSA, M. A.; IVANIŠ, G. R.; RADOVIĆ, I. R.; KIJEVČANIN, M. L. Experimental Investigation and Modeling of Thermophysical Properties of Pure Methyl and Ethyl Esters at High Pressures. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 7, p. 7110–7122, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00561>

AITBELALE, R.; ABALA, I.; M’HAMDI ALAOUI, F. E.; EDDINE, A. S.; RUJAS, N. M.; AGUILAR, F. Characterization and determination of thermodynamic properties of waste cooking oil biodiesel: Experimental, correlation and modeling density over a wide temperature range up to 393.15 and pressure up to 140 MPa. **Fluid Phase Equilibria**, v. 497, p. 87–96, 2019 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2019.06.003>

AITBELALE, R.; CHHITI, Y.; ALAOUI, F. E. M. hamd.; SAHIB EDDINE, A.; MUNÓZ RUJAS, N.; AGUILAR, F. High-Pressure Soybean Oil Biodiesel Density: Experimental Measurements, Correlation by Tait Equation, and Perturbed Chain SAFT (PC-SAFT) Modeling. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 64, n. 9, p. 3994–4004, 2019 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00391>

ALAOUI, F. E. M. **Investigación experimental de propiedades termodinámicas de entalpía de mezcla y densidad en sistemas multicomponentes de aditivos oxigenados e hidrocarburos en biocombustibles de bajo impacto ambiental.** 2011. - UNIVERSIDAD DE BURGOS, [s. l.], 2011.

ALEME, H. G. **DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO ÓLEO DIESEL A PARTIR DE CURVAS DE DESTILAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICAS QUIMIOMÉTRICAS.** 2011. - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, [s. l.], 2011.

ALPTEKIN, E.; CANAKCI, M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. **Renewable Energy**, v. 33, n. 12, p. 2623–2630, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.020>

AQUING, M.; CIOTTA, F.; CRETON, B.; FÉJEAN, C.; PINA, A.; DARTIGUELONGUE, C.; TRUSLER, J. P. M.; VIGNAIS, R.; LUGO, R.; UNGERER, P.; NIETO-DRAGHI, C. Composition Analysis and Viscosity Prediction of Complex Fuel Mixtures Using a Molecular-Based Approach. **Energy & Fuels**, v. 26, n. 4, p. 2220–2230, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef300106z>

ATABANI, A. E.; SILITONGA, A. S.; BADRUDDIN, I. A.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H.; MEKHILEF, S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2070–2093, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>

ATKINS, P.; PAULA, J. de. **Físico-química.** Rio de Janeiro: LTC, 2012.

BARABÁS, I.; TODORUȚ, A. I. Key Fuel Properties of Biodiesel-diesel Fuel-ethanol Blends. *In*: 2009, **Anais [...]**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2009-01-1810>

BARKER, C. **Organic geochemistry in petroleum exploration.** United States: [s. n.], 1979.

BAZILE, J.-P.; NASRI, D.; SALEY HAMANI, A. W.; GALLIERO, G.; DARIDON, J.-L. Excess volume, isothermal compressibility, isentropic compressibility and speed of sound of carbon dioxide + n-heptane binary mixture under pressure up to 70 MPa. I Experimental Measurements. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 140, n. May, p. 218–232, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.028>

BESSIÈRES, D.; BAZILE, J.-P.; TANH, X. N. T.; GARCÍA-CUADRA, F.; ACIEN, F. G. Thermophysical behavior of three algal biodiesels over wide ranges of pressure and temperature. **Fuel**, v. 233, n. March, p. 497–503, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.091>

BOUDY, F.; SEERS, P. Impact of physical properties of biodiesel on the injection process in a common-rail direct injection system. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 12, p. 2905–2912, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.07.005>

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 472–482, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422004000300018>

COMUÑAS, M. J. P.; BAZILE, J.; BAYLAUCQ, A.; BONED, C. Density of Diethyl Adipate using a New Vibrating Tube Densimeter from (293.15 to 403.15) K and up to 140 MPa. Calibration and Measurements. **J. Chem. Eng. Data**, v. 53, p. 986–994, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je700737c>

CRUZ, Y. R. **COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS: MISTURA DE ETANOL ANIDRO AO ÓLEO DIESEL PARA MOTORES DE CICLO DIESEL COM SISTEMA DE INJEÇÃO DE BOMBA ROTATIVA**. 2009. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, [s. l.], 2009.

DARIDON, J.-L.; BAZILE, J.-P. Computation of Liquid Isothermal Compressibility from Density Measurements: An Application to Toluene. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 63, n. 6, p. 2162–2178, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00148>

DARIDON, J. Predicting the effect of pressure on biodiesel density at pressures of up to 200 MPa based on fatty acid alkyl ester profiles and density values at atmospheric pressure. **Fuel**, v. 281, n. March, p. 118767, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118767>

DAS, M.; SARKAR, M.; DATTA, A.; SANTRA, A. K. Study on viscosity and surface tension properties of biodiesel-diesel blends and their effects on spray parameters for CI engines. **Fuel**, v. 220, n. January, p. 769–779, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.021>

DE PAULA, R. R. **Método de Monte Carlo e Aplicações**. 2014. - Universidade Federal

Fluminense, [s. l.], 2014.

DEMIRBAS, A. H.; DEMIRBAS, I. Importance of rural bioenergy for developing countries. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 8, p. 2386–2398, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.03.005>

DO CARMO, F. R.; DA SILVA, M. R. L.; ALVES, A. A. A.; EVANGELISTA, N. S. **A new method for predicting the isobaric heat capacity of biodiesel-related esters based on the corresponding states principle**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2020. v. 521E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2020.112734>

DO CARMO, F. R.; EVANGELISTA, N. S.; FERNANDES, F. A. N.; DE SANT'ANA, H. B. Evaluation of Optimal Methods for Critical Properties and Acentric Factor of Biodiesel Compounds with Their Application on Soave-Redlich-Kwong and Peng-Robinson Equations of State. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 60, n. 11, p. 3358–3381, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00638>

DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C. Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição. **REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA**, v. 13, p. 5–15, 2005.

DYMOND, J. H.; MALHOTRA, R. The Tait equation: 100 years on. **International Journal of Thermophysics**, v. 9, n. 6, p. 941–951, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01133262>

DZIDA, M. Speeds of Sound, Densities, Isobaric Thermal Expansion, Compressibilities, and Internal Pressures of Heptan-1-ol, Octan-1-ol, Nonan-1-ol, and Decan-1-ol at Temperatures from (293 to 318) K and Pressures up to 100 MPa. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 52, n. 2, p. 521–531, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je0604378>

DZIDA, M.; PRUSAKIEWICZ, P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. **Fuel**, v. 87, n. 10–11, p. 1941–1948, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.10.010>

EVANGELISTA, N. S.; DO CARMO, F. R.; DE SANT'ANA, H. B. Estimation of Physical Constants of Biodiesel-Related Fatty Acid Alkyl Esters: Normal Boiling Point, Critical Temperature, Critical Pressure, and Acentric Factor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 57, n. 25, p. 8552–8565, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b01310>

F. D. MURNAGHAN. The Compressibility of Media under Extreme Pressures. **Journal of the Franklin Institute**, v. 197, n. 1, p. 98, 1924. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.30.9.244>

FERNANDO, S.; HANNA, M. Development of a novel biofuel blend using ethanol-biodiesel-diesel microemulsions: EB-diesel. **Energy and Fuels**, v. 18, n. 6, p. 1695–1703, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef049865e>

FERREIRA, A. G. M.; SANTOS, J. B.; BAPTISTA, J.; KHALIGHI, S.; BRITO, R. M. M.; CRUZ, P. F. Effect of Isobutanol Addition on the Biodiesel Density. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 66, n. 12, p. 4542–4562, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.1c00588>

GAYLARDE, C. C.; BENTO, F. M.; KELLEY, J. Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control. **Revista de Microbiologia**, v. 30, n. 1, p. 1–10, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0001-37141999000100001>

GMEHLING, J.; KLEIBER, M.; KOLBE, B.; RAREY, J. **Chemical Thermodynamics for Process Simulation**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527809479>

GROSS, M. Closing the carbon cycle. **Current Biology**, v. 24, n. 13, p. R583–R585, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.06.051>

GUPTA, R. B.; DEMIRBAS, A. **Gasoline, Diesel, and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants**. Illustrate ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2010.

HABRIOUX, M.; FREITAS, S. V. D.; COUTINHO, J. A. P.; DARIDON, J. L. High Pressure Density and Speed of Sound in Two Biodiesel Fuels. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 58, n. 12, p. 3392–3398, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je4006129>

HAMANI, A. W. S.; BAZILE, J.-P.; HOANG, H.; LUC, H. T.; DARIDON, J.-L.; GALLIERO, G. Thermophysical properties of simple molecular liquid mixtures: On the limitations of some force fields. **Journal of Molecular Liquids**, v. 303, p. 112663, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112663>

HERRMANN, R.; JUMBE, C.; BRUENTRUP, M.; OSABUOHIEN, E. Competition between biofuel feedstock and food production: Empirical evidence from sugarcane outgrower settings in Malawi. **Biomass and Bioenergy**, v. 114, p. 100–111, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.002>

HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; KHANALI, M.; DEMIRBAS, A. A comprehensive review on the environmental impacts of diesel/biodiesel additives. **Energy Conversion and Management**, v. 174, n. June, p. 579–614, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.050>

IHMELS, E. C.; GMEHLING, J. Extension and revision of the group contribution method GCVOL for the prediction of pure compound liquid densities. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 2, p. 408–412, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie020492j>

ILIĆ PAJIĆ, J.; IVANIŠ, G.; RADOVIĆ, I.; GRUJIĆ, A.; STAJIĆ-TROŠIĆ, J.; STIJEPOVIĆ, M.; KIJEVČANIN, M. Experimental densities and derived thermodynamic properties of pure p-cymene,  $\alpha$ -pinene, limonene and citral under high pressure conditions. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 144, p. 106065, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106065>

IVANIŠ, G. R.; RADOVIĆ, I. R.; VELJKOVIĆ, V. B.; KIJEVČANIN, M. L. Thermodynamic properties of biodiesel and petro-diesel blends at high pressures and temperatures. Experimental and modeling. **Fuel**, v. 184, p. 277–288, 2016 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.023>

IVANIŠ, G. R.; RADOVIĆ, I. R.; VELJKOVIĆ, V. B.; KIJEVČANIN, M. L. Biodiesel density and derived thermodynamic properties at high pressures and moderate temperatures. **Fuel**, v. 165, p. 244–251, 2016 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.050>

IVANIŠ, G. R.; RADOVIĆ, I. R.; VELJKOVIĆ, V. B.; KIJEVČANIN, M. L. Thermodynamic properties of biodiesel and petro-diesel blends at high pressures and temperatures. Experimental and modeling. **Fuel**, v. 184, p. 277–288, 2016 c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.023>

KINAST, J. A. Production of biodiesels from multiple feedstocks and properties of biodiesels



and biodiesel/diesel blends. Final report. Report 1 in a series of 6. Subcontractor report. **National Renewable Energy Laboratory**, n. March, p. 57, 2003. Disponible em: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/31460.pdf>

KNOTHE, G.; GERPEN, J. Van; KRAHL, J. **The Biodiesel Handbook**. 2. ed. Illinois: Elsevier, 2005.

KNOTHE, G.; KRAHL, J.; GERPEN, J. Van. **The Biodiesel Handbook**. [S. l.]: Elsevier, 2010. *E-book*. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02453-4>

LI, D. G.; ZHEN, H.; XINGCAI, L.; WU-GAO, Z.; JIAN-GUANG, Y. Physico-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. **Renewable Energy**, v. 30, n. 6, p. 967–976, 2005. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.07.010>

LI, H.; SHEN, B. X.; YU, P. H. The cold temperature fluidities of biodiesel prepared from vegetable oil. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 32, n. 13, p. 1195–1200, 2010. Disponible em: <https://doi.org/10.1080/15567030903059673>

LIFI, M.; BAZILE, J. P.; MUÑOZ-RUJAS, N.; GALLIERO, G.; AGUILAR, F.; DARIDON, J. L. Density, Viscosity, and Derivative Properties of Diethylene Glycol Monoethyl Ether Under High Pressure and Temperature. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 66, n. 3, p. 1457–1465, 2021. Disponible em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c01055>

LIU, X.; LAI, T.; GUO, X.; HE, M.; DONG, W.; SHANG, T.; YANG, W. Densities and Viscosities of Ethyl Heptanoate and Ethyl Octanoate at Temperatures from 303 to 353 K and at Pressures up to 15 MPa. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 62, n. 8, p. 2454–2460, 2017. Disponible em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00386>

MALIK, S.; DAROLIA, P. J.; GARG, S. K.; SHARMA, V. K. Densities and excess molar volumes of mixtures containing diesel, biodiesel and alkanols at temperatures from 288.15 to 313.15 K. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 34, p. 198–207, 2021. Disponible em: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.065>

MERCEDES TARAVILLO, VALENTÍN G BAONZA, M. C. and J. N. Thermodynamic regularities in compressed liquids: I. The thermal expansion coefficient. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 15, 2003. Disponible em: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/19/302>

MESQUITA, F. M. R.; FEITOSA, F. X.; SANTIAGO-AGUIAR, R. S. de; SANT'ANA, H. B. de. Experimental density data and excess molar volumes of coconut biodiesel + n-hexadecane and coconut biodiesel + diesel at different temperatures. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 543–551, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140312s00002600>

MUÑOZ RUJAS, N. **Investigación sobre propiedades de nuevos fluidos industriales de bajo impacto ambiental como sustitutivos de gases fluorados para reducción del cambio climático**. 2018. [s. l.], 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10259/5069>

NAPOLEÃO, A. **Estudos em Densimetria de Tubo Vibrante: Compatibilidade Metrológica com Refratometria e Efeito da Viscoelasticidade**. 2018. - UNIVERSIDADE DE LISBOA, [s. l.], 2018.

NDIAYE, E. H. I.; BAZILE, J.; NASRI, D.; BONED, C.; DARIDON, J. L. High pressure thermophysical characterization of fuel used for testing and calibrating diesel injection systems. **Fuel**, v. 98, p. 288–294, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.005>

NGUYENTHI, T.; BAZILE, J.-P.; BESSIÈRES, D. Density Measurements of Waste Cooking Oil Biodiesel and Diesel Blends Over Extended Pressure and Temperature Ranges. **Energies**, v. 11, n. 5, p. 1212, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11051212>

NOGUEIRA, C. A.; CARMO, F. R.; SANTIAGO, D. F.; NOGUEIRA, V. M.; FERNANDES, F. A. N.; AGUIAR, R. S. S.; DE SANT'ANA, H. B. Viscosities and Densities of Ternary Blends of Diesel + Soybean Biodiesel + Soybean Oil. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 57, n. 11, p. 3233–3241, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je300838n>

NOGUEIRA, C. A.; FEITOSA, F. X.; FERNANDES, F. A. N.; SANTIAGO, R. S.; DE SANT'ANA, H. B. Densities and Viscosities of Binary Mixtures of Babassu Biodiesel + Cotton Seed or Soybean Biodiesel at Different Temperatures. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 55, n. 11, p. 5305–5310, 2010 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je1003862>

NOGUEIRA, C. A.; FEITOSA, F. X.; FERNANDES, F. A. N.; SANTIAGO, R. S.; DE SANT'ANA, H. B. Densities and Viscosities of Binary Mixtures of Babassu Biodiesel + Cotton Seed or Soybean Biodiesel at Different Temperatures. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 55, n. 11, p. 5305–5310, 2010 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je1003862>

NOGUEIRA, C. A.; NOGUEIRA, V. M.; SANTIAGO, D. F.; MACHADO, F. A.; FERNANDES, F. A. N.; SANTIAGO-AGUIAR, R. S.; DE SANT'ANA, H. B. Density and Viscosity of Binary Systems Containing (Linseed or Corn) Oil, (Linseed or Corn) Biodiesel and Diesel. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 60, n. 11, p. 3120–3131, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00289>

PAGEL, U. R.; CAMPOS, A. F.; CAROLINO, J. **ANÁLISE DOS DESDOBRAMENTOS DA POLÍTICA NACIONAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS (RENOVABIO) NO CENÁRIO BRASILEIRO**. Natal, RN: [s. n.], 2019. Disponível em: [http://www.portalabpg.org.br/site\\_portugues/anais/anais9/repositorio/trabalho/242810170820178438.pdf](http://www.portalabpg.org.br/site_portugues/anais/anais9/repositorio/trabalho/242810170820178438.pdf).

PEDERSEN, K. S.; PEDERSEN, K. S.; CHRISTENSEN, P. L.; SHAIKH, J. A.; CHRISTENSEN, P. L. **Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids**. 2nd ed. ed. [S. l.]: CRC Press, 2006. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781420018257>

PETROBRAS, D. **ÓLEO DIESEL - Informações Técnicas: 1.3**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/>.

PINTO, A. A. G. **Análise de Dados Experimentais 1. Fundamentos de Estatística e Estimção de Parâmetros**. 1ª edição ed. [S. l.]: E-Papers, 2007.

PINTO, A. C.; GUARIEIRO, L. L. N.; REZENDE, M. J. C.; RIBEIRO, N. M.; TORRES, E. A.; LOPES, W. A.; DE PEREIRA, P. A. P.; DE ANDRADE, J. B. Biodiesel: An overview. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 16, n. 6 B, p. 1313–1330, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532005000800003>

PONTES, A. S. G. C.; SANTOS, I. M. G. dos; CARVALHO, J. R. de; FILHO; SOUSA, A. G. de. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES DAS BLENDS DIESEL/BIODIESEL DE ÓLEO DE PEIXE**. João Pessoa, PB: I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, 2010.

PRATAS, M. J.; FREITAS, S.; OLIVEIRA, M. B.; MONTEIRO, S. C.; LIMA, A. S.; COUTINHO, J. A. P. Densities and Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 55, n. 9, p. 3983–3990, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/je100042c>

PRATAS, M. J.; FREITAS, S. V.D.; OLIVEIRA, M. B.; MONTEIRO, S. C.; LIMA, Á. S.; COUTINHO, J. A. P. Biodiesel density: Experimental measurements and prediction models. **Energy and Fuels**, v. 25, n. 5, p. 2333–2340, 2011 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef2002124>

PRATAS, M. J.; OLIVEIRA, M. B.; PASTORIZA-GALLEGO, M. J.; QUEIMADA, A. J.; PIÑEIRO, M. M.; COUTINHO, J. A. P. High-Pressure Biodiesel Density: Experimental Measurements, Correlation, and Cubic-Plus-Association Equation of State (CPA EoS) Modeling. **Energy & Fuels**, v. 25, n. 8, p. 3806–3814, 2011 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef200807m>

PRIETO, N. M. C. T.; FERREIRA, A. G. M.; PORTUGAL, A. T. G.; MOREIRA, R. J.; SANTOS, J. B. Correlation and prediction of biodiesel density for extended ranges of temperature and pressure. **Fuel**, v. 141, p. 23–38, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.113>

RACKETT, H. G. Equation of state for saturated liquids. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 15, n. 4, p. 514–517, 1970. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jc60047a012>

RIAZI, M. R. **Characterization and Properties of Petroleum Fractions**. [S. l.]: ASTM international, 2005.

ROWANE, A. J.; MAHESH BABU, V.; ROKNI, H. B.; MOORE, J. D.; GAVAISES, M.; WENSING, M.; GUPTA, A.; MCHUGH, M. A. Effect of Composition, Temperature, and Pressure on the Viscosities and Densities of Three Diesel Fuels. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 64, n. 12, p. 5529–5547, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00652>

SAFAROV, J.; ASHUROVA, U.; AHMADOV, B.; ABDULLAYEV, E.; SHAHVERDIYEV, A.; HASSEL, E. Thermophysical properties of Diesel fuel over a wide range of temperatures and pressures. **Fuel**, v. 216, n. October 2017, p. 870–889, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.125>

SANDLER, S. I. **Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics**. 5ed. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2017.

SAS, O. G.; IVANIŠ, G. R.; KIJEVČANIN, M. L.; GONZÁLEZ, B.; DOMÍNGUEZ, A.;

RADOVIĆ, I. R. High pressure densities and derived thermodynamic properties of deep eutectic solvents with menthol and saturated fatty acids. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 162, p. 106578, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2021.106578>

SCHEDEMANN, A.; WALLEK, T.; ZEYMER, M.; MALY, M.; GMEHLING, J. Measurement and correlation of biodiesel densities at pressures up to 130 MPa. **Fuel**, v. 107, p. 483–492, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.084>

SILVA, P. R. F. da; FREITAS, T. F. S. de. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 843–851, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000300044>

SILVA, T. E. P.; CARVALHO, D. O.; SILVA, M. J. P.; SANTOS, N. E. S.; R, C. P. P. Enxofre : Um Poluente Em Potencial Na Composição Do Óleo Diesel Brasileiro . **Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, p. 1–6, 2013.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. LTC; 7<sup>a</sup> ed ed. [*S. l.: s. n.*].

SOAVE, G. S. A Noncubic Equation of State for the Treatment of Hydrocarbon Fluids at Reservoir Conditions. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 34, n. 11, p. 3981–3994, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie00038a039>

TAT, M. E.; VAN GERPEN, J. H. The specific gravity of biodiesel and its blends with diesel fuel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 77, n. 2, p. 115–119, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11746-000-0019-3>

TAT, M. E.; VAN GERPEN, J. H. **Measurement of Biodiesel Speed of Sound and Its Impact on Injection Timing**. Golden, CO: [*s. n.*], 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/15003584>.

THANGAMANI, S.; SUNDARESAN, S. N.; KANNAPPAN S., S.; BARAWKAR, V. T.; JEYASEELAN, T. Impact of biodiesel and diesel blends on the fuel filter: A combined experimental and simulation study. **Energy**, v. 227, p. 120526, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120526>

TORRES-JIMENEZ, E.; JERMAN, M. S.; GREGORC, A.; LISEC, I.; DORADO, M. P.; KEGL, B. Physical and chemical properties of ethanol-diesel fuel blends. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 795–802, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.045>

TRINDADE, M. A. G.; STRADIOTTO, N. R.; ZANONI, M. V. B. Dyes markers of fuels: Legislation and analytical methods for detection. **Química Nova**, v. 34, n. 10, p. 1683–1691, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422011001000002>

VALERO, A. M. C.; ALVES, C. A.; FEITOSA, F. X.; DE SANT'ANA, H. B. Density and Volumetric Behavior of Ternary CO<sub>2</sub> + n-Decane + cis-Decalin (or + trans-Decalin) Mixtures at High Pressure and High Temperature. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 66, n. 4, p. 1684–1693, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00989>

VALERO, A. M. C.; FEITOSA, F. X.; DE SANT'ANA, H. B. Density and Volumetric Behavior of Binary CO<sub>2</sub> + n-Decane and Ternary CO<sub>2</sub> + n-Decane + Naphthalene Systems at High Pressure and High Temperature. **Journal of Chemical & Engineering Data**, v. 65, n. 7, p. 3499–3509, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00090>

VAN GERPEN, J. Biodiesel processing and production. **Fuel Processing Technology**, v. 86, n. 10, p. 1097–1107, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>

VENY, H.; BAROUTIAN, S.; AROUA, M. K.; HASAN, M.; RAMAN, A. A.; SULAIMAN, N. M. N. Density of jatropha curcas seed oil and its methyl esters: Measurement and estimations. **International Journal of Thermophysics**, v. 30, n. 2, p. 529–541, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10765-009-0569-3>

ZHANG, Q.; XIA, J.; WANG, J.; HE, Z.; ZHAO, W.; QIAN, Y.; ZHENG, L.; LIU, R.; LU, X. Experimental study on ignition and combustion characteristics of biodiesel-butanol blends at different injection pressures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, p. 112289, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112289>

ZORĘBSKI, E.; MUSIAŁ, M.; DZIDA, M. Relation between temperature–pressure dependence of internal pressure and intermolecular interactions in ionic liquids – Comparison with molecular liquids. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 131, p. 347–359, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.11.007>

ZVIRIN, Y.; GUTMAN, M.; TARTAKOVSKY, L. **Fuel Effects on Emissions**. [S. l.]:

Woodhead Publishing Limited, 1998. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-012639855-7/50055-7>

## APÊNDICE A – ESPECIFICAÇÕES PARA DIESEL

### 1. Aspecto e cor

O aspecto visual para combustíveis é um parâmetro indicativo de qualidade. Especificamente o diesel deve apresentar-se límpido e isento de materiais em suspensão como poeira, ferrugem, água etc. Isto pois, alterações na cor dos combustíveis podem ocorrer devido à presença de contaminantes ou por causa da oxidação de compostos instáveis nela presentes (olefinas e compostos nitrogenados) ou, ainda, pela adulteração criminosa visando ampliação de lucros. E, quando presentes, problemas como estes, podem reduzir a vida útil dos filtros dos veículos e equipamentos e prejudicar o funcionamento dos motores (PETROBRAS, 2020; TRINDADE; STRADIOTTO; ZANONI, 2011; ZVIRIN; GUTMAN; TARTAKOVSKY, 1998).

### 2. Teor de enxofre

O teor de enxofre é uma característica importantíssima para especificação e utilização de óleos combustíveis, o enxofre ocasiona a formação de SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e SO<sub>3</sub> (trióxido de enxofre) que são gases tóxicos, e a reação destes com a água dos produtos de combustão formam ácido sulfúrico que é altamente corrosivo para as partes metálicas dos equipamentos, além de ser poluente. Contudo o enxofre é um elemento natural em óleos crus e por esse motivo nos últimos anos, o grau de especificidade destes combustíveis estão menores, para evitar problemas como os reportados (SILVA *et al.*, 2013).

### 3. Massa específica

Os sistemas de injeção do motor (bomba e injetores) são configurados para fornecer um volume predeterminado de combustível, enquanto, na câmara de combustão, o parâmetro determinante é a relação ar: massa combustível (VENY *et al.*, 2009). E como a massa específica se trata de uma quantidade de massa por unidade de volume do combustível que é injetada no motor, variações muito altas nessa propriedade podem causar problemas de enriquecimento na mistura ar/combustível, podendo provocar, caso o valor seja mais alto que o especificado, aumento das emissões de particulados, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos. Por outro lado, variações muito baixas resultam perda de potência e problemas de dirigibilidade. Portanto, é importante controlar a especificação da faixa de densidade do diesel para não causar variações no funcionamento dos motores (TORRES-JIMENEZ *et al.*, 2011).



#### **4. Viscosidade**

A viscosidade em motores do tipo diesel, um dos efeitos que esta propriedade afeta é se dá quando o combustível líquido é pulverizado em ar comprimido e atomizado em pequenas gotas próximas à saída do bico, o combustível líquido, geralmente, forma um spray em formato de cone na saída do bico e a viscosidade afeta este fenômeno, ou seja, ela influencia diretamente na penetração do combustível para a realização da combustão (LI; SHEN; YU, 2010). Outra interferência que a viscosidade pode causar em motores é quando o combustível possui um alto valor da propriedade, que como já abordado gera uma fraca atomização gerando assim um acúmulo de depósitos no motor afetando assim os requisitos de energia gerando desgaste da bomba de combustível e injetores (KINAST, 2003). Esta alta viscosidade também pode causar mais problemas no clima frio, porque a viscosidade aumenta com a diminuição da temperatura (ALPTEKIN; CANAKCI, 2008).

#### **5. Ponto de fulgor**

O ponto de fulgor se trata da menor temperatura do fluido na qual há a liberação de vapores suficientes para que em contato com o oxigênio do ar atmosférico forme-se uma mistura que exposta a uma fonte de ignição se inflame sem a sustentação do fogo, ou seja, em uma visão superficial o ponto de fulgor mede a volatilidade, a tendência à evaporação do fluido. Quanto mais baixo for o ponto de fulgor, maior é a formação de vapores e maior será o risco de incêndio e explosão no sistema. Diante disso, esse parâmetro é importante principalmente para o manuseio/transporte destes materiais. A temperatura vai de 52°C – 66°C para o diesel, já para a gasolina chega abaixo de -40°C mostrando assim a alta volatilidade do combustível (FERNANDO; HANNA, 2004; LI *et al.*, 2005).

#### **6. Número de cetano (NC)**

A medida universalmente aceita que relata a qualidade da ignição do combustível diesel, é o número de cetano: quanto maior o número, mais fácil é para acender, ou seja, quanto maior o NC melhor a qualidade da combustão. A importância de números mais altos de cetano está ligada ao desempenho e a benefícios fornecidos em termos de melhor partida a frio, redução da emissão de fumaça durante o aquecimento, redução do ruído, redução do consumo de combustível e emissão de gases de escape. A utilização de correlações para obter os valores do índice de cetano (IC) é bastante viável, devido ao alto custo de se obter esses parâmetros. Essas correlações levam em consideração, na grande maioria das vezes, a gravidade API e a

temperatura de ebulição intermediária (ZVIRIN; GUTMAN; TARTAKOVSKY, 1998).

## **7. Capacidade calorífica**

A capacidade calorífica está entre as propriedades mais importantes do combustível na fase líquida. Uma descrição correta desta propriedade em função da temperatura é necessária para simular sistemas de injeção (DO CARMO *et al.*, 2020). Combustíveis com o poder calorífico mal especificado, pode causar problemas de desempenho e quanto mais alto o poder calórico de um combustível, maior será sua energia contida.

## **8. Percentagem de água e sedimentos**

A medida do teor de água e sedimentos em linhas gerais é explicada como contaminantes que se encontram em suspensão no produto e que se sedimentam durante o consumo. A presença destes contaminantes em níveis superiores àqueles especificados pela ANP, são altamente prejudiciais ao diesel pois prejudicam sua combustão, devido a presença de matérias diferentes dos desejados na câmara de combustão, além de acelerar a saturação dos filtros e provocar danos ao sistema de combustível (CRUZ, 2009). No sistema de armazenagem estes contaminantes tendem a se depositar no fundo dos tanques gerando assim certas incrustações e, se a água estiver presente, favorecer a deterioração do diesel pelo desenvolvimento de colônias de bactérias, interferindo também no sistema de injeção do motor e conseqüentemente na eficiência do processo (GAYLARDE; BENTO; KELLEY, 1999).

## **9. Ponto de entupimento de filtro a frio**

O teste, de acordo com a norma ASTM D 6371-99, consiste no resfriamento do combustível até uma temperatura em que ele cesse de correr através do filtro dentro de 60 segundos ou pelo fato de não retornar ao frasco de teste (PONTES *et al.*, 2010). Contudo, é uma característica importante do combustível, já que influencia diretamente a operação do combustível no motor em temperaturas baixas.

**APÊNDICE B** – PARÂMETROS OBTIDOS PELO AJUSTE DA EQUAÇÃO DE MURNAGHAN PARA OS COMPONENTES DA MISTURA (PETRO-DIESEL E BIODIESEL) QUE FORAM UTILIZADOS NA EQUAÇÃO (17) ONDE AS UNIDADES SÃO  $K$  PARA TEMPERATURA ( $T$ ),  $MPa$  PARA PRESSÃO ( $P$ ) E  $kg \cdot m^{-3}$  PARA DENSIDADE ( $\rho$ ).

Tabela B 1: Parâmetros obtidos usando a função objetivo (mostrados na equação 16).

Compostos	Parâmetros				
	$b_0 \times 10^2$	$b_1 \times 10^4$	$b_2 \times 10^7$	$c_0 \times 10^2$	$c_1 \times 10^4$
Petro-diesel	4.3200	-2.2500	4.0400	-5.1000	-0.0106
Biodiesel	4.1300	-2.6900	5.2400	-11.6000	0.0090

### APÊNDICE C – DADOS EXPERIMENTAIS DE DENSIDADE HPHT PARA AS MISTURAS BIODIESEL + PETRO-DIESEL

Tabela C1- Dados experimentais de densidade ( $\rho$ ) de misturas de biodiesel de semente de uva + petro-diesel com 20, 40, 60 e 80 %vol de biodiesel, em altas pressões e altas temperaturas.

$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15	$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15
$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$							$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$						
<i>Bio20 – PD80 (semente de uva)</i>								<i>Bio40 – PD60 (semente de uva)</i>							
0,10	848,91	834,78	820,63	805,32	791,16	776,95	762,63	0,10	859,13	844,84	830,57	816,26	801,90	787,69	773,38
5,00	851,93	838,24	824,41	810,48	796,56	782,43	768,18	5,00	861,94	848,29	834,28	820,25	806,12	792,03	777,68
10,00	854,84	841,47	828,03	814,36	800,57	787,18	773,52	10,00	864,88	851,50	837,80	824,13	810,28	796,68	782,91
20,00	860,44	847,61	834,70	821,70	808,92	795,96	783,06	20,00	870,46	857,56	844,44	831,31	818,21	805,44	792,91
30,00	865,71	853,31	840,87	828,43	816,15	803,84	791,68	30,00	875,75	863,25	850,57	837,95	825,46	813,16	800,90
40,00	870,66	858,63	846,67	834,60	822,90	811,09	799,42	40,00	880,64	868,53	856,33	844,17	832,07	820,31	808,57
50,00	875,36	863,66	852,07	840,46	829,13	817,79	806,56	50,00	885,33	873,60	861,73	849,99	838,32	827,04	815,68
60,00	879,87	868,53	857,19	845,92	834,94	823,99	813,24	60,00	889,89	878,35	866,82	855,37	844,07	833,15	822,28
70,00	884,09	873,00	862,07	851,09	840,42	829,84	819,39	70,00	894,12	882,85	871,63	860,52	849,51	839,00	828,38
80,00	888,12	877,34	866,62	855,98	845,65	835,31	825,22	80,00	898,18	887,10	876,26	865,43	854,80	844,46	834,26
90,00	892,01	881,51	871,03	860,57	850,49	840,58	830,77	90,00	902,04	891,30	880,61	870,10	859,68	849,67	839,75
100,00	895,72	885,39	875,15	864,97	855,21	845,45	835,89	100,00	905,79	895,23	884,86	874,49	864,35	854,63	844,94
<i>Bio60 – PD40 (semente de uva)</i>								<i>Bio80 – PD40 (semente de uva)</i>							
0,10	864,72	852,47	838,35	823,62	804,85	789,64	773,81	0,10	876,49	862,21	847,72	833,05	818,45	803,78	788,84
5,00	870,11	856,11	842,01	827,69	809,66	795,00	778,84	5,00	879,43	865,42	851,21	836,94	822,67	808,50	794,09
10,00	872,99	859,30	845,53	831,62	814,40	800,06	784,47	10,00	882,31	868,56	854,73	840,74	826,85	813,10	799,19
20,00	878,51	865,36	853,15	838,35	822,86	809,33	794,72	20,00	887,77	874,52	861,22	847,77	834,55	821,57	808,39
30,00	883,68	871,00	858,32	845,53	830,49	817,57	803,84	30,00	892,90	880,11	867,28	854,35	841,67	829,27	816,76
40,00	888,62	876,35	864,03	851,75	837,54	825,12	812,02	40,00	897,82	885,37	872,92	860,41	848,20	836,34	824,31
50,00	893,25	881,39	869,46	857,49	844,11	832,13	819,62	50,00	902,47	890,32	878,31	866,13	854,30	842,89	831,37
60,00	897,78	886,16	874,57	863,01	850,20	838,70	826,65	60,00	906,90	895,06	883,30	871,48	860,17	849,06	837,92
70,00	902,16	890,73	879,29	867,18	855,95	844,78	833,20	70,00	911,12	899,53	888,14	876,69	865,58	854,87	844,08
80,00	906,24	895,11	883,96	872,30	861,31	850,52	839,30	80,00	915,15	903,84	892,67	881,50	870,68	860,25	849,83
90,00	910,18	899,25	888,37	877,10	866,49	855,92	845,13	90,00	918,99	907,95	897,04	886,15	875,63	865,44	855,25
100,00	913,92	903,22	892,62	881,67	871,29	861,10	850,60	100,00	922,73	911,92	901,24	890,65	880,29	870,45	860,41

Tabela C2 - Dados experimentais de densidade ( $\rho$ ) de misturas de petro-diesel com biodiesel de milho, 20, 40, 60 e 80 %vol de biodiesel, em altas pressões e altas temperaturas.

$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15	$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15
$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$							$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$						
	<i>Bio20 – PD80 (milho)</i>								<i>Bio40 – PD60 (milho)</i>						
0,10	848,39	834,52	818,91	804,38	788,98	775,17	760,09	0,10	859,84	845,61	831,33	816,77	802,22	787,78	773,11
5,00	851,45	837,13	822,60	808,53	794,28	780,27	765,87	5,00	862,70	848,83	834,90	820,89	806,70	792,73	778,48
10,00	854,40	839,93	826,24	812,52	798,69	785,11	771,24	10,00	865,62	852,08	838,42	824,68	810,96	797,39	783,69
20,00	860,01	846,04	832,95	819,91	806,78	793,93	780,96	20,00	871,20	858,08	845,01	831,92	818,76	805,98	793,10
30,00	865,26	851,75	839,24	826,68	814,14	802,01	789,69	30,00	876,41	863,82	851,16	838,55	826,01	813,83	801,52
40,00	870,24	857,06	845,01	832,95	820,96	809,36	797,54	40,00	881,32	869,12	856,88	844,77	832,64	820,95	809,20
50,00	874,95	862,12	850,50	838,84	827,23	816,09	804,83	50,00	886,01	874,15	862,27	850,45	838,82	827,47	816,30
60,00	879,40	866,91	855,65	844,41	833,13	822,31	811,46	60,00	890,47	878,86	867,36	855,86	844,65	833,73	822,90
70,00	883,64	871,46	860,48	849,53	838,70	828,22	817,74	70,00	894,69	883,41	872,21	861,07	850,10	839,50	829,05
80,00	887,70	875,80	865,14	854,42	843,90	833,79	823,60	80,00	898,74	887,70	876,71	865,91	855,24	844,99	834,89
90,00	891,58	879,91	869,51	859,12	848,86	839,03	829,15	90,00	902,59	891,77	881,08	870,55	860,17	850,21	840,35
100,00	895,31	883,94	873,67	863,54	853,61	844,00	834,40	100,00	906,31	895,69	885,25	874,95	864,86	855,10	845,53
	<i>Bio60 – PD40 (milho)</i>								<i>Bio80 – PD20 (milho)</i>						
0,10	867,65	849,64	836,38	823,30	809,47	794,48	779,44	0,10	876,45	861,60	842,64	829,41	814,65	799,07	784,86
5,00	870,47	856,45	842,19	827,92	813,80	799,39	785,01	5,00	878,99	863,46	847,86	833,44	819,06	804,78	790,31
10,00	873,38	859,61	845,67	831,27	818,14	804,10	790,12	10,00	881,81	866,56	851,31	837,29	823,30	809,44	795,46
20,00	878,85	865,64	852,22	838,93	825,99	812,64	799,44	20,00	887,28	872,18	857,84	844,48	831,16	818,00	804,88
30,00	884,02	871,28	858,34	845,58	833,21	820,49	807,91	30,00	892,47	877,40	863,59	851,11	838,36	825,75	813,30
40,00	888,98	876,56	864,05	851,80	839,79	827,62	815,68	40,00	897,32	882,33	869,58	857,29	845,04	832,92	821,04
50,00	893,61	881,52	869,37	857,57	846,09	834,25	822,72	50,00	901,96	886,97	875,01	863,05	851,27	839,60	828,21
60,00	898,04	886,27	874,47	862,97	851,76	840,48	829,31	60,00	906,39	891,42	880,15	868,53	857,09	845,88	834,86
70,00	902,28	890,86	879,32	868,16	857,20	846,35	835,51	70,00	910,60	895,73	885,03	873,74	862,63	851,75	841,15
80,00	906,35	895,14	883,92	873,06	862,45	851,86	841,37	80,00	914,67	899,92	889,66	878,69	867,84	857,26	846,93
90,00	910,20	899,29	888,25	877,71	867,41	857,04	846,82	90,00	918,54	903,96	894,07	883,34	872,86	862,64	852,28
100,00	913,93	903,24	892,46	882,18	872,00	861,94	852,03	100,00	922,23	907,93	898,31	887,80	877,52	867,65	857,80

Tabela C3 - Dados experimentais de densidade ( $\rho$ ) de misturas de petro-diesel com biodiesel de linhaça, 20, 40, 60 e 80 %vol de biodiesel, em altas pressões e altas temperaturas.

$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15	$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15
$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$							$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$						
	<i>Bio20 – PD80 (linhaça)</i>								<i>Bio40 – PD60 (linhaça)</i>						
0,10	849,05	834,99	820,84	806,46	791,94	777,45	762,62	0,10	859,69	845,99	831,23	816,76	802,08	787,56	772,59
5,00	852,00	838,30	824,44	810,55	796,44	782,49	768,22	5,00	862,80	848,88	834,86	820,79	806,51	792,48	778,16
10,00	854,93	841,55	828,07	814,48	800,76	787,32	773,51	10,00	865,70	852,08	838,40	824,64	810,65	797,20	783,40
20,00	860,57	847,66	834,75	821,58	808,80	796,08	783,10	20,00	871,26	858,14	845,03	831,84	818,65	805,82	792,79
30,00	865,82	853,39	840,95	828,46	816,10	803,96	791,70	30,00	876,47	863,85	851,15	838,50	825,88	813,60	801,27
40,00	870,81	858,76	846,71	834,71	822,82	811,20	799,52	40,00	881,40	869,12	856,93	844,70	832,63	820,79	808,91
50,00	875,48	863,82	852,11	840,52	829,05	817,87	806,60	50,00	886,06	874,20	862,31	850,49	838,82	827,41	816,06
60,00	879,46	868,61	857,23	846,05	834,90	824,06	813,30	60,00	890,52	878,97	867,33	855,94	844,65	833,64	822,66
70,00	884,21	873,12	862,13	851,19	840,38	829,91	819,49	70,00	894,76	883,48	872,20	861,11	850,15	839,45	828,84
80,00	888,26	877,46	866,68	856,09	845,61	835,39	825,26	80,00	898,81	887,77	876,81	865,97	855,27	844,93	834,64
90,00	892,14	881,56	871,08	860,68	850,51	840,64	830,74	90,00	902,69	891,89	881,20	870,61	860,27	850,16	840,09
100,00	895,85	885,53	875,26	865,14	855,19	845,59	836,00	100,00	906,39	895,84	885,38	875,04	864,89	855,10	845,31
	<i>Bio60 – PD20 (linhaça)</i>								<i>Bio80 – PD20 (linhaça)</i>						
0,10	868,75	854,84	840,66	825,17	811,37	796,72	781,74	0,10	877,72	863,66	842,72	830,54	815,92	800,75	786,53
5,00	872,26	858,29	844,24	829,93	815,74	801,54	787,21	5,00	880,82	866,82	852,24	837,80	823,26	808,76	794,12
10,00	875,15	861,48	847,70	833,80	819,93	806,20	792,36	10,00	883,71	869,96	855,61	841,62	827,44	813,21	799,18
20,00	880,69	867,48	854,25	840,85	827,69	814,74	801,71	20,00	889,16	875,91	862,11	848,65	835,20	821,70	808,41
30,00	885,87	873,12	860,36	847,48	834,85	822,43	810,07	30,00	894,32	881,48	868,15	855,17	842,17	829,39	816,73
40,00	890,78	878,41	866,05	853,61	841,44	829,62	817,71	40,00	899,19	886,75	873,84	861,33	848,78	836,47	824,34
50,00	895,44	883,38	871,42	859,38	847,62	836,17	824,77	50,00	903,85	891,73	879,17	867,10	854,93	843,07	831,43
60,00	899,88	888,14	876,47	864,82	853,41	842,30	831,29	60,00	908,27	896,46	884,22	872,51	860,74	849,28	838,02
70,00	904,12	892,66	881,28	869,26	858,90	848,16	837,50	70,00	912,51	900,94	889,22	877,65	866,21	855,06	844,22
80,00	908,18	896,99	885,89	874,83	864,10	853,58	843,29	80,00	916,57	905,23	893,62	882,53	871,36	860,54	850,05
90,00	912,05	901,10	890,32	879,49	868,99	858,77	848,77	90,00	920,51	909,28	898,08	887,06	876,33	865,71	855,54
100,00	915,78	905,05	894,47	883,88	873,62	863,74	853,88	100,00	924,38	913,33	902,27	891,52	881,06	870,71	860,78

Tabela C4 - Dados de densidade experimental de ( $\rho$ ) do petro-diesel e ( $\rho$ ) para o biodiesel de em alta pressão e alta temperatura.

$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15	$T/K$	293,15	313,15	333,15	353,15	373,15	393,15	413,15
$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$							$P/MPa$	$\rho/kg \cdot m^{-3}$						
	<i>Bio0 – PD100 (petro-diesel)</i>								<i>Bio100 – PD0 (milho)</i>						
0,10	837,31	823,32	809,28	794,80	781,50	766,33	751,44	0,10	883,20	868,71	854,24	839,46	824,98	810,48	795,97
5,00	840,83	827,29	813,45	799,48	785,46	771,52	757,33	5,00	886,17	872,13	857,85	843,53	829,27	815,14	800,81
10,00	843,89	830,56	817,07	803,50	789,83	776,41	762,62	10,00	889,06	875,23	861,28	847,37	833,28	819,70	805,74
20,00	849,53	836,69	823,85	810,84	797,92	785,22	772,37	20,00	894,40	881,12	867,72	854,35	840,91	827,96	814,85
30,00	854,83	842,44	830,03	817,58	805,29	793,17	781,06	30,00	899,53	886,68	873,68	860,80	847,96	835,51	823,05
40,00	859,79	847,83	835,78	823,81	812,04	800,54	788,88	40,00	904,43	891,88	879,35	866,83	854,48	842,55	830,58
50,00	864,48	852,92	841,24	829,75	818,33	807,32	796,08	50,00	909,05	896,83	884,61	872,50	860,59	849,05	837,55
60,00	868,81	857,53	846,31	835,81	824,06	813,45	802,71	60,00	913,44	901,51	889,62	877,88	866,27	855,16	844,03
70,00	873,06	862,09	851,22	840,31	829,55	819,29	808,97	70,00	917,61	905,99	894,40	882,97	871,72	860,95	850,09
80,00	877,12	866,33	855,74	845,23	834,76	824,80	814,77	80,00	921,66	910,29	898,94	887,76	876,90	866,36	855,84
90,00	881,02	870,48	860,15	849,87	839,63	829,98	820,22	90,00	925,49	914,39	903,34	892,47	881,76	871,52	861,28
100,00	884,75	874,39	864,29	854,34	844,33	834,92	825,45	100,00	929,23	918,30	907,54	896,81	886,38	876,46	866,41
	<i>Bio100 – PD0 (linhaça)</i>								<i>Bio100 – PD0 (semente de uva)</i>						
0,10	885,44	870,87	856,28	841,70	827,42	812,99	798,06	0,10	883,90	869,57	855,19	840,56	825,77	811,16	796,18
5,00	888,64	874,15	859,82	845,88	831,66	817,60	803,24	5,00	886,83	872,88	858,67	844,41	830,04	815,85	801,38
10,00	891,44	877,35	863,33	849,65	835,77	822,06	808,22	10,00	889,67	875,99	862,08	848,13	834,15	820,34	806,37
20,00	896,89	883,30	869,81	856,67	843,37	830,42	817,22	20,00	895,08	881,95	868,52	855,15	841,81	828,67	815,58
30,00	902,01	888,89	875,87	863,11	850,35	837,95	825,46	30,00	900,22	887,43	874,51	861,64	848,74	836,22	823,61
40,00	906,84	894,15	881,56	869,19	856,87	844,97	832,95	40,00	905,09	892,64	880,18	867,63	855,26	843,22	831,16
50,00	911,47	899,12	886,88	874,82	863,00	851,47	839,85	50,00	909,72	897,57	885,44	873,37	861,34	849,81	838,09
60,00	915,87	903,86	891,95	880,22	868,71	857,58	846,36	60,00	914,14	902,31	890,48	878,77	867,12	855,88	844,60
70,00	920,09	908,36	896,78	885,41	874,13	863,35	852,44	70,00	918,36	906,77	895,27	883,86	872,55	861,61	850,69
80,00	924,13	912,66	901,34	890,17	879,26	868,78	858,22	80,00	922,38	911,09	899,81	888,86	877,70	867,06	856,46
90,00	928,01	916,78	905,70	894,75	884,16	873,96	863,68	90,00	926,26	915,17	904,16	893,32	882,62	872,27	861,92
100,00	931,68	920,72	909,87	899,20	888,80	878,87	868,88	100,00	929,99	919,14	908,35	897,76	887,30	877,14	867,14

## APÊNDICE D - DADOS DAS PROPRIEDADES DERIVATIVAS

Tabela D1- Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 0 - PD 100 (semente de uva).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,7671	0,8186	0,3059	312,7598	0,8577	0,8436	0,3156	307,9014
5,00	0,7360	0,7989	0,3026	313,2181	0,8191	0,8207	0,3115	308,7824
10,00	0,7069	0,7804	0,2995	313,6324	0,7832	0,7994	0,3078	309,6160
20,00	0,6553	0,7473	0,2943	314,3083	0,7205	0,7618	0,3016	311,0973
30,00	0,6111	0,7188	0,2900	314,7939	0,6675	0,7297	0,2966	312,3487
40,00	0,5727	0,6937	0,2866	315,1033	0,6220	0,7020	0,2927	313,3885
50,00	0,5390	0,6716	0,2838	315,2484	0,5826	0,6777	0,2895	314,2325
60,00	0,5093	0,6519	0,2815	315,2399	0,5481	0,6562	0,2869	314,8943
70,00	0,4828	0,6342	0,2797	315,0870	0,5177	0,6371	0,2848	315,3855
80,00	0,4590	0,6182	0,2782	314,7978	0,4906	0,6199	0,2831	315,7165
90,00	0,4376	0,6036	0,2770	314,3797	0,4663	0,6044	0,2818	315,8965
100,00	0,4182	0,5903	0,2760	313,8394	0,4444	0,5902	0,2807	315,9336
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,9638	0,8696	0,3230	300,4968	1,0886	0,8968	0,3281	290,8315
5,00	0,9153	0,8429	0,3181	301,8099	1,0271	0,8655	0,3222	292,5939
10,00	0,8708	0,8183	0,3137	303,0697	0,9714	0,8370	0,3170	294,2942
20,00	0,7941	0,7755	0,3064	305,3633	0,8771	0,7883	0,3086	297,4198
30,00	0,7303	0,7395	0,3007	307,3794	0,8001	0,7481	0,3021	300,2109
40,00	0,6764	0,7088	0,2961	309,1422	0,7360	0,7143	0,2971	302,6995
50,00	0,6302	0,6823	0,2925	310,6722	0,6819	0,6853	0,2931	304,9120
60,00	0,5902	0,6590	0,2896	311,9866	0,6355	0,6602	0,2900	306,8706
70,00	0,5552	0,6384	0,2873	313,1005	0,5953	0,6382	0,2875	308,5941
80,00	0,5243	0,6201	0,2855	314,0267	0,5601	0,6187	0,2855	310,0987
90,00	0,4968	0,6036	0,2840	314,7768	0,5290	0,6012	0,2840	311,3987
100,00	0,4721	0,5886	0,2829	315,3609	0,5013	0,5855	0,2827	312,5065
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,2359	0,9252	0,3310	279,2353	1,4102	0,9548	0,3317	266,0872
5,00	1,1573	0,8885	0,3240	281,4787	1,3088	0,9117	0,3237	268,8681
10,00	1,0871	0,8555	0,3180	283,6474	1,2199	0,8737	0,3169	271,5576
20,00	0,9705	0,8001	0,3085	287,6506	1,0753	0,8110	0,3062	276,5304
30,00	0,8774	0,7553	0,3013	291,2510	0,9625	0,7614	0,2985	281,0190
40,00	0,8012	0,7182	0,2958	294,4909	0,8720	0,7210	0,2928	285,0789
50,00	0,7378	0,6869	0,2915	297,4044	0,7977	0,6873	0,2884	288,7542
60,00	0,6840	0,6599	0,2882	300,0196	0,7355	0,6587	0,2851	292,0806
70,00	0,6379	0,6365	0,2856	302,3604	0,6828	0,6340	0,2825	295,0878
80,00	0,5978	0,6159	0,2836	304,4470	0,6374	0,6125	0,2806	297,8008
90,00	0,5628	0,5977	0,2820	306,2968	0,5979	0,5935	0,2791	300,2412
100,00	0,5317	0,5813	0,2808	307,9251	0,5633	0,5766	0,2780	302,4273



Tabela D2 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 0 - PD 100 (semente de uva), temperatura de 413,15 K.

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,6168	0,9859	0,3304	251,8209
5,00	1,4850	0,9354	0,3214	255,2373
10,00	1,3717	0,8916	0,3139	258,5412
20,00	1,1919	0,8212	0,3026	264,6553
30,00	1,0553	0,7668	0,2946	270,1885
40,00	0,9480	0,7233	0,2889	275,2136
50,00	0,8613	0,6875	0,2847	279,7870
60,00	0,7897	0,6574	0,2817	283,9538
70,00	0,7296	0,6318	0,2794	287,7511
80,00	0,6784	0,6095	0,2777	291,2097
90,00	0,6342	0,5900	0,2765	294,3554
100,00	0,5957	0,5727	0,2757	297,2108

Tabela D3 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 20 - PD 80 (semente de uva).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,7335	0,8450	0,3361	337,5967	0,8304	0,8610	0,3348	324,5630
5,00	0,7050	0,8238	0,3313	337,5783	0,7941	0,8365	0,3292	324,8852
10,00	0,6782	0,8039	0,3268	337,5067	0,7602	0,8136	0,3241	325,1492
20,00	0,6305	0,7682	0,3189	337,2117	0,7009	0,7733	0,3152	325,4925
30,00	0,5893	0,7372	0,3123	336,7273	0,6505	0,7387	0,3078	325,6069
40,00	0,5534	0,7099	0,3066	336,0670	0,6071	0,7086	0,3017	325,5104
50,00	0,5218	0,6857	0,3018	335,2424	0,5694	0,6823	0,2964	325,2182
60,00	0,4938	0,6641	0,2976	334,2637	0,5363	0,6589	0,2919	324,7437
70,00	0,4687	0,6446	0,2939	333,1400	0,5070	0,6381	0,2880	324,0983
80,00	0,4462	0,6269	0,2907	331,8793	0,4809	0,6193	0,2847	323,2923
90,00	0,4258	0,6108	0,2879	330,4888	0,4574	0,6023	0,2817	322,3347
100,00	0,4073	0,5961	0,2855	328,9749	0,4363	0,5869	0,2792	321,2336
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,9431	0,8776	0,3315	309,9041	1,0731	0,8948	0,3270	294,3476
5,00	0,8965	0,8494	0,3252	310,6455	1,0132	0,8626	0,3200	295,6456
10,00	0,8536	0,8233	0,3195	311,3227	0,9588	0,8332	0,3140	296,8731
20,00	0,7796	0,7779	0,3098	312,4528	0,8666	0,7829	0,3040	299,0569
30,00	0,7179	0,7397	0,3020	313,3073	0,7912	0,7413	0,2961	300,9101
40,00	0,6656	0,7070	0,2955	313,9100	0,7283	0,7063	0,2898	302,4641
50,00	0,6207	0,6787	0,2902	314,2808	0,6751	0,6763	0,2846	303,7449
60,00	0,5817	0,6538	0,2856	314,4368	0,6295	0,6502	0,2804	304,7741
70,00	0,5476	0,6318	0,2817	314,3927	0,5899	0,6274	0,2768	305,5703
80,00	0,5174	0,6121	0,2784	314,1614	0,5552	0,6071	0,2739	306,1497
90,00	0,4905	0,5944	0,2755	313,7541	0,5245	0,5890	0,2714	306,5260
100,00	0,4664	0,5784	0,2731	313,1808	0,4972	0,5726	0,2693	306,7116
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,2215	0,9126	0,3215	278,6794	1,3875	0,9312	0,3162	263,7497
5,00	1,1445	0,8765	0,3144	280,7580	1,2890	0,8916	0,3099	266,9538
10,00	1,0757	0,8440	0,3086	282,7611	1,2024	0,8566	0,3048	270,0808
20,00	0,9611	0,7893	0,2990	286,4403	1,0613	0,7989	0,2970	275,9432
30,00	0,8695	0,7450	0,2919	289,7251	0,9510	0,7531	0,2917	281,3385
40,00	0,7945	0,7082	0,2863	292,6566	0,8623	0,7157	0,2880	286,3195
50,00	0,7319	0,6772	0,2820	295,2681	0,7894	0,6845	0,2854	290,9286
60,00	0,6788	0,6505	0,2786	297,5870	0,7283	0,6580	0,2837	295,2000
70,00	0,6332	0,6273	0,2759	299,6365	0,6764	0,6351	0,2825	299,1624
80,00	0,5936	0,6068	0,2737	301,4364	0,6317	0,6151	0,2819	302,8397
90,00	0,5589	0,5887	0,2720	303,0037	0,5928	0,5975	0,2817	306,2527
100,00	0,5282	0,5724	0,2706	304,3534	0,5586	0,5817	0,2817	309,4190

Tabela D4 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 20 - PD 80 (semente de uva), temperatura de 413,15 K.

$T = 413,15 K$				
$P/MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,6168	0,9859	0,3304	251,8209
5,00	1,4850	0,9354	0,3214	255,2373
10,00	1,3717	0,8916	0,3139	258,5412
20,00	1,1919	0,8212	0,3026	264,6553
30,00	1,0553	0,7668	0,2946	270,1885
40,00	0,9480	0,7233	0,2889	275,2136
50,00	0,8613	0,6875	0,2847	279,7870
60,00	0,7897	0,6574	0,2817	283,9538
70,00	0,7296	0,6318	0,2794	287,7511
80,00	0,6784	0,6095	0,2777	291,2097
90,00	0,6342	0,5900	0,2765	294,3554
100,00	0,5957	0,5727	0,2757	297,2108

Tabela D5 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 40 - PD 60 (semente de uva).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,7075	0,8192	0,3237	339,3703	0,7922	0,8393	0,3296	331,6644
5,00	0,6829	0,8010	0,3195	338,8418	0,7615	0,8182	0,3245	331,4584
10,00	0,6597	0,7837	0,3156	338,2658	0,7328	0,7984	0,3199	331,2018
20,00	0,6178	0,7524	0,3086	337,0052	0,6815	0,7629	0,3119	330,5532
30,00	0,5812	0,7248	0,3026	335,6052	0,6373	0,7321	0,3051	329,7316
40,00	0,5488	0,7003	0,2975	334,0716	0,5987	0,7050	0,2993	328,7460
50,00	0,5201	0,6784	0,2930	332,4103	0,5647	0,6810	0,2943	327,6048
60,00	0,4943	0,6587	0,2891	330,6269	0,5346	0,6595	0,2901	326,3158
70,00	0,4711	0,6408	0,2857	328,7265	0,5077	0,6402	0,2863	324,8862
80,00	0,4501	0,6244	0,2828	326,7140	0,4834	0,6227	0,2831	323,3225
90,00	0,4309	0,6095	0,2801	324,5939	0,4615	0,6067	0,2802	321,6308
100,00	0,4135	0,5957	0,2778	322,3705	0,4416	0,5921	0,2776	319,8168
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,8894	0,8601	0,3336	322,0845	1,0003	0,8817	0,3363	311,1967
5,00	0,8509	0,8358	0,3278	322,2115	0,9520	0,8536	0,3296	311,6763
10,00	0,8152	0,8131	0,3225	322,2841	0,9075	0,8277	0,3235	312,0974
20,00	0,7523	0,7729	0,3133	322,2631	0,8304	0,7824	0,3132	312,7413
30,00	0,6989	0,7385	0,3057	322,0316	0,7659	0,7442	0,3047	313,1348
40,00	0,6529	0,7087	0,2992	321,6021	0,7112	0,7115	0,2978	313,2940
50,00	0,6128	0,6824	0,2938	320,9859	0,6641	0,6830	0,2919	313,2332
60,00	0,5776	0,6592	0,2891	320,1935	0,6231	0,6581	0,2869	312,9657
70,00	0,5465	0,6384	0,2851	319,2343	0,5871	0,6359	0,2827	312,5036
80,00	0,5186	0,6198	0,2816	318,1170	0,5553	0,6161	0,2790	311,8574
90,00	0,4936	0,6028	0,2785	316,8494	0,5269	0,5983	0,2758	311,0371
100,00	0,4710	0,5874	0,2758	315,4386	0,5014	0,5822	0,2730	310,0514
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,1258	0,9043	0,3380	299,6279	1,2658	0,9278	0,3394	288,0716
5,00	1,0650	0,8719	0,3304	300,4950	1,1894	0,8906	0,3310	289,3872
10,00	1,0096	0,8423	0,3236	301,3014	1,1209	0,8571	0,3235	290,6454
20,00	0,9153	0,7915	0,3122	302,6857	1,0060	0,8007	0,3111	292,9115
30,00	0,8378	0,7494	0,3030	303,7810	0,9134	0,7547	0,3015	294,8563
40,00	0,7729	0,7138	0,2956	304,6053	0,8371	0,7164	0,2939	296,4975
50,00	0,7178	0,6832	0,2895	305,1761	0,7731	0,6840	0,2877	297,8529
60,00	0,6704	0,6567	0,2844	305,5089	0,7186	0,6561	0,2827	298,9400
70,00	0,6291	0,6333	0,2800	305,6180	0,6717	0,6317	0,2784	299,7745
80,00	0,5929	0,6126	0,2763	305,5164	0,6308	0,6103	0,2749	300,3713
90,00	0,5608	0,5940	0,2731	305,2155	0,5948	0,5912	0,2719	300,7436
100,00	0,5322	0,5772	0,2703	304,7261	0,5629	0,5740	0,2693	300,9035

Tabela D6 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 40 - PD 60 (semente de uva), temperatura de 413,15 K.

$T = 413,15 K$				
$P/MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4184	0,9523	0,3416	277,2955
5,00	1,3232	0,9101	0,3326	279,1644
10,00	1,2390	0,8727	0,3244	280,9906
20,00	1,1004	0,8107	0,3112	284,3886
30,00	0,9908	0,7613	0,3018	287,4477
40,00	0,9020	0,7208	0,2944	290,1781
50,00	0,8285	0,6870	0,2885	292,5954
60,00	0,7665	0,6581	0,2839	294,7163
70,00	0,7136	0,6332	0,2802	296,5573
80,00	0,6679	0,6113	0,2771	298,1341
90,00	0,6280	0,5920	0,2745	299,4612
100,00	0,5928	0,5747	0,2724	300,5521

Tabela D7- Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 60 - PD 40 (semente de uva).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,6969	0,8141	0,3209	342,3305	0,7839	0,8572	0,3436	342,3367
5,00	0,6727	0,7967	0,3174	342,2003	0,7533	0,8367	0,3394	342,7989
10,00	0,6496	0,7798	0,3139	341,8867	0,7246	0,8169	0,3353	343,0444
20,00	0,6083	0,7485	0,3071	340,7611	0,6736	0,7806	0,3272	342,9189
30,00	0,5720	0,7201	0,3006	339,0419	0,6295	0,7480	0,3194	342,0677
40,00	0,5401	0,6942	0,2943	336,8002	0,5911	0,7184	0,3120	340,5860
50,00	0,5117	0,6704	0,2882	334,0946	0,5574	0,6916	0,3049	338,5506
60,00	0,4862	0,6485	0,2824	330,9740	0,5274	0,6670	0,2981	336,0243
70,00	0,4633	0,6282	0,2768	327,4792	0,5007	0,6444	0,2917	333,0592
80,00	0,4426	0,6094	0,2715	323,6453	0,4767	0,6236	0,2855	329,6989
90,00	0,4237	0,5919	0,2663	319,5018	0,4549	0,6043	0,2796	325,9802
100,00	0,4065	0,5755	0,2614	315,0747	0,4352	0,5864	0,2739	321,9345
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,8885	0,9024	0,3637	338,2690	1,0158	0,9498	0,3806	330,1121
5,00	0,8494	0,8780	0,3588	339,3689	0,9650	0,9207	0,3747	331,9087
10,00	0,8131	0,8547	0,3538	340,2070	0,9185	0,8931	0,3689	333,3826
20,00	0,7494	0,8124	0,3442	341,1183	0,8382	0,8435	0,3576	335,3774
30,00	0,6954	0,7747	0,3351	341,1419	0,7714	0,8001	0,3469	336,2846
40,00	0,6490	0,7411	0,3264	340,4054	0,7149	0,7617	0,3368	336,2761
50,00	0,6087	0,7108	0,3181	339,0096	0,6665	0,7275	0,3273	335,4840
60,00	0,5733	0,6832	0,3103	337,0354	0,6245	0,6967	0,3184	334,0123
70,00	0,5420	0,6581	0,3029	334,5485	0,5877	0,6689	0,3099	331,9439
80,00	0,5141	0,6351	0,2958	331,6033	0,5552	0,6435	0,3019	329,3462
90,00	0,4890	0,6139	0,2891	328,2450	0,5263	0,6203	0,2943	326,2744
100,00	0,4664	0,5943	0,2826	324,5117	0,5004	0,5990	0,2871	322,7745
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,1729	0,9996	0,3933	317,9023	1,3703	1,0521	0,4011	301,7326
5,00	1,1058	0,9646	0,3865	320,4793	1,2797	1,0097	0,3933	305,2155
10,00	1,0452	0,9318	0,3797	322,6505	1,1993	0,9706	0,3856	308,1791
20,00	0,9427	0,8736	0,3666	325,7999	1,0665	0,9023	0,3707	312,6026
30,00	0,8593	0,8235	0,3543	327,6133	0,9614	0,8446	0,3568	315,3799
40,00	0,7900	0,7798	0,3428	328,3233	0,8759	0,7950	0,3439	316,8273
50,00	0,7316	0,7413	0,3320	328,1038	0,8050	0,7518	0,3319	317,1737
60,00	0,6815	0,7070	0,3219	327,0880	0,7453	0,7139	0,3207	316,5897
70,00	0,6382	0,6762	0,3124	325,3801	0,6941	0,6801	0,3102	315,2055
80,00	0,6003	0,6485	0,3034	323,0632	0,6499	0,6499	0,3005	313,1231
90,00	0,5669	0,6232	0,2950	320,2044	0,6112	0,6225	0,2912	310,4237
100,00	0,5372	0,6001	0,2870	316,8590	0,5771	0,5977	0,2826	307,1732

Tabela D8 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 60 - PD 40 (semente de uva), temperatura de 413,15 K.

$T = 413,15 K$				
$P/MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,6233	1,1075	0,4028	281,7592
5,00	1,4977	1,0561	0,3944	286,3430
10,00	1,3889	1,0094	0,3859	290,2511
20,00	1,2145	0,9293	0,3697	296,1577
30,00	1,0805	0,8631	0,3545	300,0285
40,00	0,9743	0,8072	0,3404	302,2963
50,00	0,8880	0,7593	0,3274	303,2623
60,00	0,8164	0,7176	0,3153	303,1440
70,00	0,7560	0,6809	0,3041	302,1039
80,00	0,7043	0,6482	0,2937	300,2663
90,00	0,6595	0,6189	0,2839	297,7288
100,00	0,6204	0,5925	0,2747	294,5691

Tabela D9 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 80 - PD 20 (semente de uva).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,6846	0,8168	0,3259	349,6778	0,7645	0,8360	0,3321	342,3577
5,00	0,6609	0,7993	0,3222	349,5140	0,7351	0,8158	0,3276	342,5109
10,00	0,6385	0,7826	0,3187	349,3011	0,7075	0,7966	0,3235	342,6118
20,00	0,5981	0,7523	0,3125	348,7439	0,6583	0,7624	0,3162	342,6544
30,00	0,5627	0,7257	0,3072	348,0212	0,6158	0,7325	0,3101	342,4983
40,00	0,5315	0,7019	0,3027	347,1438	0,5787	0,7062	0,3049	342,1574
50,00	0,5037	0,6807	0,2988	346,1212	0,5460	0,6828	0,3004	341,6440
60,00	0,4788	0,6615	0,2954	344,9615	0,5169	0,6619	0,2965	340,9687
70,00	0,4564	0,6440	0,2924	343,6723	0,4910	0,6430	0,2932	340,1409
80,00	0,4360	0,6281	0,2898	342,2601	0,4676	0,6259	0,2903	339,1691
90,00	0,4175	0,6135	0,2875	340,7311	0,4465	0,6103	0,2877	338,0607
100,00	0,4006	0,6000	0,2855	339,0905	0,4273	0,5960	0,2855	336,8225
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,8572	0,8560	0,3359	332,5632	0,9652	0,8768	0,3376	320,7052
5,00	0,8205	0,8326	0,3307	333,0476	0,9188	0,8496	0,3315	321,5506
10,00	0,7863	0,8106	0,3258	333,4744	0,8761	0,8245	0,3259	322,3314
20,00	0,7260	0,7718	0,3174	334,1359	0,8021	0,7806	0,3164	323,6610
30,00	0,6748	0,7384	0,3104	334,5590	0,7401	0,7434	0,3086	324,7050
40,00	0,6306	0,7093	0,3046	334,7619	0,6875	0,7115	0,3022	325,4875
50,00	0,5921	0,6838	0,2996	334,7606	0,6421	0,6837	0,2968	326,0288
60,00	0,5582	0,6611	0,2953	334,5686	0,6026	0,6592	0,2922	326,3466
70,00	0,5282	0,6408	0,2917	334,1980	0,5679	0,6375	0,2883	326,4557
80,00	0,5013	0,6225	0,2885	333,6592	0,5372	0,6181	0,2849	326,3694
90,00	0,4772	0,6059	0,2857	332,9617	0,5097	0,6006	0,2820	326,0993
100,00	0,4555	0,5908	0,2833	332,1138	0,4851	0,5847	0,2794	325,6557
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,0908	0,8984	0,3373	307,2377	1,2367	0,9209	0,3355	292,6627
5,00	1,0320	0,8670	0,3304	308,4997	1,1617	0,8848	0,3277	294,4366
10,00	0,9785	0,8383	0,3241	309,6879	1,0944	0,8522	0,3209	296,1257
20,00	0,8872	0,7889	0,3136	311,7846	0,9817	0,7970	0,3096	299,1673
30,00	0,8122	0,7477	0,3052	313,5398	0,8909	0,7519	0,3009	301,8015
40,00	0,7494	0,7129	0,2983	314,9852	0,8162	0,7143	0,2939	304,0697
50,00	0,6960	0,6829	0,2926	316,1470	0,7535	0,6823	0,2882	306,0055
60,00	0,6500	0,6568	0,2879	317,0473	0,7002	0,6548	0,2835	307,6369
70,00	0,6101	0,6338	0,2839	317,7050	0,6543	0,6307	0,2796	308,9876
80,00	0,5749	0,6134	0,2805	318,1366	0,6143	0,6095	0,2764	310,0777
90,00	0,5438	0,5951	0,2775	318,3564	0,5791	0,5906	0,2736	310,9248
100,00	0,5160	0,5786	0,2750	318,3769	0,5479	0,5736	0,2712	311,5442



Tabela D10 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 80 - PD 20 (semente de uva), temperatura de 413,15 K.

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4054	0,9444	0,3324	277,5351
5,00	1,3094	0,9032	0,3241	279,9767
10,00	1,2246	0,8665	0,3169	282,3211
20,00	1,0855	0,8055	0,3055	286,6054
30,00	0,9759	0,7568	0,2969	290,4055
40,00	0,8873	0,7168	0,2902	293,7748
50,00	0,8141	0,6832	0,2849	296,7563
60,00	0,7525	0,6546	0,2807	299,3851
70,00	0,7000	0,6298	0,2773	301,6904
80,00	0,6547	0,6081	0,2745	303,6971
90,00	0,6152	0,5888	0,2722	305,4264
100,00	0,5804	0,5716	0,2703	306,8968

Tabela D11 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 100 - PD 0 (semente de uva).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,6740	0,8079	0,3212	351,3299	0,7514	0,8277	0,3283	344,8445
5,00	0,6511	0,7909	0,3176	351,0857	0,7231	0,8081	0,3240	344,9376
10,00	0,6294	0,7747	0,3141	350,7923	0,6965	0,7895	0,3199	344,9788
20,00	0,5903	0,7452	0,3081	350,0776	0,6489	0,7562	0,3129	344,9067
30,00	0,5559	0,7191	0,3029	349,2020	0,6077	0,7271	0,3069	344,6412
40,00	0,5256	0,6959	0,2985	348,1758	0,5717	0,7014	0,3019	344,1959
50,00	0,4985	0,6751	0,2946	347,0080	0,5399	0,6785	0,2975	343,5823
60,00	0,4742	0,6562	0,2912	345,7066	0,5116	0,6580	0,2938	342,8108
70,00	0,4522	0,6391	0,2883	344,2786	0,4862	0,6395	0,2905	341,8904
80,00	0,4323	0,6234	0,2857	342,7306	0,4634	0,6227	0,2876	340,8293
90,00	0,4142	0,6090	0,2834	341,0684	0,4427	0,6073	0,2851	339,6346
100,00	0,3976	0,5958	0,2814	339,2971	0,4238	0,5932	0,2829	338,3130
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,8410	0,8483	0,3333	335,9098	0,9449	0,8696	0,3363	324,9287
5,00	0,8058	0,8256	0,3282	336,3613	0,9006	0,8436	0,3304	325,7767
10,00	0,7729	0,8044	0,3236	336,7567	0,8597	0,8193	0,3251	326,5626
20,00	0,7148	0,7668	0,3155	337,3608	0,7886	0,7769	0,3161	327,9096
30,00	0,6652	0,7343	0,3088	337,7331	0,7288	0,7408	0,3087	328,9789
40,00	0,6224	0,7060	0,3031	337,8911	0,6778	0,7098	0,3025	329,7938
50,00	0,5850	0,6810	0,2983	337,8500	0,6338	0,6827	0,2973	330,3736
60,00	0,5520	0,6588	0,2942	337,6229	0,5955	0,6588	0,2929	330,7351
70,00	0,5227	0,6389	0,2906	337,2212	0,5617	0,6376	0,2892	330,8928
80,00	0,4965	0,6210	0,2875	336,6552	0,5317	0,6186	0,2859	330,8594
90,00	0,4729	0,6047	0,2848	335,9338	0,5049	0,6014	0,2832	330,6461
100,00	0,4516	0,5898	0,2825	335,0652	0,4808	0,5858	0,2807	330,2628
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,0652	0,8919	0,3375	312,3484	1,2043	0,9152	0,3371	298,6659
5,00	1,0093	0,8619	0,3309	313,6577	1,1333	0,8808	0,3299	300,5419
10,00	0,9583	0,8343	0,3250	314,8975	1,0694	0,8496	0,3235	302,3394
20,00	0,8709	0,7867	0,3151	317,1059	0,9619	0,7966	0,3130	305,6084
30,00	0,7987	0,7470	0,3071	318,9827	0,8748	0,7532	0,3049	308,4821
40,00	0,7381	0,7132	0,3007	320,5580	0,8029	0,7168	0,2984	310,9998
50,00	0,6864	0,6840	0,2953	321,8568	0,7424	0,6858	0,2931	313,1936
60,00	0,6418	0,6586	0,2908	322,9004	0,6907	0,6590	0,2888	315,0903
70,00	0,6029	0,6361	0,2870	323,7070	0,6461	0,6355	0,2852	316,7125
80,00	0,5687	0,6161	0,2838	324,2923	0,6072	0,6148	0,2823	318,0797
90,00	0,5383	0,5982	0,2810	324,6702	0,5729	0,5963	0,2797	319,2088
100,00	0,5111	0,5820	0,2787	324,8528	0,5424	0,5796	0,2776	320,1146

Tabela D12 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 100 - PD 0 (semente de uva), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,3640	0,9394	0,3357	284,4325
5,00	1,2737	0,9004	0,3281	287,0408
10,00	1,1937	0,8655	0,3215	289,5608
20,00	1,0615	0,8073	0,3110	294,2095
30,00	0,9568	0,7605	0,3032	298,3887
40,00	0,8717	0,7219	0,2972	302,1492
50,00	0,8011	0,6894	0,2925	305,5319
60,00	0,7416	0,6616	0,2887	308,5702
70,00	0,6907	0,6375	0,2857	311,2923
80,00	0,6467	0,6163	0,2833	313,7220
90,00	0,6082	0,5975	0,2814	315,8798
100,00	0,5742	0,5807	0,2798	317,7836

Tabela D13 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 20 - PD 80 (milho).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,7333	0,8426	0,3347	336,7310	0,8225	0,8652	0,3418	329,3067
5,00	0,7056	0,8233	0,3308	337,0299	0,7878	0,8425	0,3371	329,9164
10,00	0,6795	0,8049	0,3273	337,2835	0,7553	0,8213	0,3328	330,4756
20,00	0,6329	0,7721	0,3212	337,6429	0,6982	0,7836	0,3253	331,4143
30,00	0,5925	0,7434	0,3161	337,8177	0,6495	0,7511	0,3192	332,1298
40,00	0,5572	0,7181	0,3119	337,8207	0,6074	0,7228	0,3141	332,6392
50,00	0,5260	0,6956	0,3083	337,6631	0,5707	0,6979	0,3099	332,9569
60,00	0,4983	0,6754	0,3053	337,3546	0,5383	0,6758	0,3063	333,0957
70,00	0,4735	0,6572	0,3027	336,9040	0,5096	0,6559	0,3032	333,0667
80,00	0,4512	0,6407	0,3006	336,3190	0,4839	0,6381	0,3007	332,8797
90,00	0,4309	0,6256	0,2987	335,6065	0,4608	0,6218	0,2985	332,5433
100,00	0,4125	0,6118	0,2971	334,7729	0,4399	0,6070	0,2966	332,0654
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,9277	0,8887	0,3462	319,0430	1,0527	0,9132	0,3477	306,2588
5,00	0,8838	0,8620	0,3404	319,9436	0,9965	0,8816	0,3406	307,4309
10,00	0,8432	0,8372	0,3351	320,7855	0,9453	0,8526	0,3342	308,5322
20,00	0,7728	0,7939	0,3261	322,2507	0,8578	0,8027	0,3235	310,4686
30,00	0,7136	0,7571	0,3188	323,4464	0,7857	0,7611	0,3149	312,0798
40,00	0,6633	0,7255	0,3128	324,3951	0,7253	0,7258	0,3079	313,3955
50,00	0,6199	0,6980	0,3078	325,1158	0,6739	0,6955	0,3022	314,4405
60,00	0,5820	0,6737	0,3036	325,6249	0,6296	0,6690	0,2973	315,2360
70,00	0,5488	0,6522	0,3001	325,9364	0,5910	0,6457	0,2933	315,7997
80,00	0,5192	0,6329	0,2970	326,0628	0,5571	0,6250	0,2898	316,1472
90,00	0,4929	0,6155	0,2945	326,0150	0,5271	0,6064	0,2868	316,2922
100,00	0,4692	0,5997	0,2923	325,8026	0,5002	0,5896	0,2843	316,2466
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,2021	0,9388	0,3464	291,3143	1,3817	0,9655	0,3423	274,6151
5,00	1,1294	0,9011	0,3378	292,7428	1,2866	0,9205	0,3320	276,2972
10,00	1,0641	0,8671	0,3301	294,0839	1,2026	0,8806	0,3230	277,8699
20,00	0,9547	0,8096	0,3175	296,4417	1,0650	0,8144	0,3084	280,6196
30,00	0,8665	0,7626	0,3076	298,4071	0,9568	0,7615	0,2971	282,8959
40,00	0,7939	0,7234	0,2996	300,0196	0,8694	0,7181	0,2882	284,7514
50,00	0,7330	0,6901	0,2931	301,3115	0,7973	0,6818	0,2810	286,2282
60,00	0,6812	0,6614	0,2876	302,3099	0,7367	0,6509	0,2750	287,3608
70,00	0,6365	0,6363	0,2830	303,0373	0,6850	0,6241	0,2699	288,1777
80,00	0,5976	0,6142	0,2791	303,5132	0,6404	0,6006	0,2657	288,7032
90,00	0,5633	0,5945	0,2758	303,7546	0,6016	0,5799	0,2620	288,9581
100,00	0,5330	0,5768	0,2729	303,7762	0,5674	0,5613	0,2588	288,9605

Tabela D 14 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 20 - PD 80 (milho), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,5988	0,9934	0,3356	256,6179
5,00	1,4728	0,9396	0,3235	258,5765
10,00	1,3640	0,8927	0,3130	260,3974
20,00	1,1901	0,8168	0,2966	263,5559
30,00	1,0571	0,7577	0,2841	266,1440
40,00	0,9519	0,7102	0,2744	268,2315
50,00	0,8666	0,6709	0,2666	269,8729
60,00	0,7959	0,6379	0,2602	271,1119
70,00	0,7364	0,6095	0,2548	271,9846
80,00	0,6855	0,5849	0,2503	272,5211
90,00	0,6415	0,5633	0,2464	272,7467
100,00	0,6031	0,5441	0,2430	272,6834

Tabela D 15 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 40 - PD 60 (milho).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,7141	0,8287	0,3279	340,1175	0,8008	0,8469	0,3317	331,0869
5,00	0,6877	0,8098	0,3240	340,1787	0,7678	0,8250	0,3270	331,4804
10,00	0,6628	0,7918	0,3203	340,1917	0,7369	0,8044	0,3227	331,8219
20,00	0,6183	0,7595	0,3139	340,0758	0,6824	0,7677	0,3152	332,3329
30,00	0,5796	0,7312	0,3085	339,7822	0,6357	0,7361	0,3090	332,6300
40,00	0,5457	0,7061	0,3039	339,3229	0,5952	0,7084	0,3038	332,7292
50,00	0,5157	0,6838	0,3000	338,7085	0,5598	0,6840	0,2994	332,6442
60,00	0,4890	0,6638	0,2967	337,9484	0,5286	0,6623	0,2957	332,3869
70,00	0,4650	0,6457	0,2938	337,0507	0,5008	0,6428	0,2925	331,9680
80,00	0,4434	0,6293	0,2913	336,0230	0,4759	0,6252	0,2897	331,3967
90,00	0,4238	0,6142	0,2891	334,8717	0,4535	0,6092	0,2874	330,6813
100,00	0,4059	0,6004	0,2873	333,6029	0,4332	0,5946	0,2853	329,8292
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,9016	0,8658	0,3332	319,8299	1,0188	0,8855	0,3328	306,8398
5,00	0,8600	0,8404	0,3277	320,5841	0,9660	0,8562	0,3265	308,0084
10,00	0,8215	0,8168	0,3228	321,2804	0,9177	0,8292	0,3209	309,1117
20,00	0,7543	0,7754	0,3143	322,4650	0,8348	0,7826	0,3114	311,0672
30,00	0,6978	0,7402	0,3073	323,3929	0,7663	0,7436	0,3039	312,7151
40,00	0,6495	0,7098	0,3016	324,0849	0,7086	0,7104	0,2978	314,0830
50,00	0,6077	0,6832	0,2968	324,5590	0,6593	0,6818	0,2928	315,1939
60,00	0,5712	0,6598	0,2927	324,8305	0,6167	0,6568	0,2886	316,0674
70,00	0,5390	0,6389	0,2893	324,9126	0,5796	0,6347	0,2850	316,7202
80,00	0,5104	0,6202	0,2864	324,8171	0,5468	0,6150	0,2821	317,1668
90,00	0,4849	0,6033	0,2839	324,5543	0,5177	0,5973	0,2795	317,4202
100,00	0,4618	0,5880	0,2817	324,1332	0,4917	0,5813	0,2774	317,4914
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,1547	0,9059	0,3306	292,6568	1,3113	0,9271	0,3272	277,8732
5,00	1,0873	0,8722	0,3236	294,3338	1,2252	0,8888	0,3198	280,2131
10,00	1,0266	0,8416	0,3175	295,9367	1,1487	0,8545	0,3134	282,4691
20,00	0,9241	0,7896	0,3075	298,8397	1,0222	0,7972	0,3033	286,6170
30,00	0,8411	0,7469	0,2996	301,3752	0,9218	0,7511	0,2956	290,3275
40,00	0,7723	0,7111	0,2934	303,5794	0,8401	0,7130	0,2898	293,6477
50,00	0,7144	0,6806	0,2884	305,4819	0,7723	0,6809	0,2852	296,6153
60,00	0,6649	0,6541	0,2843	307,1074	0,7151	0,6535	0,2816	299,2614
70,00	0,6221	0,6310	0,2809	308,4769	0,6662	0,6297	0,2787	301,6122
80,00	0,5848	0,6106	0,2781	309,6085	0,6238	0,6087	0,2764	303,6898
90,00	0,5518	0,5923	0,2758	310,5178	0,5867	0,5902	0,2746	305,5132
100,00	0,5226	0,5759	0,2738	311,2185	0,5539	0,5736	0,2731	307,0991

Tabela D 16 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 40 - PD 60 (milho), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4899	0,9493	0,3232	263,1389
5,00	1,3797	0,9063	0,3159	266,3838
10,00	1,2836	0,8685	0,3098	269,5355
20,00	1,1280	0,8065	0,3004	275,4028
30,00	1,0074	0,7577	0,2938	280,7519
40,00	0,9110	0,7181	0,2890	285,6435
50,00	0,8322	0,6851	0,2855	290,1255
60,00	0,7665	0,6572	0,2829	294,2366
70,00	0,7109	0,6332	0,2811	298,0089
80,00	0,6631	0,6123	0,2797	301,4695
90,00	0,6216	0,5938	0,2789	304,6412
100,00	0,5853	0,5773	0,2783	307,5439

Tabela D17 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 60 - PD 40 (milho).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,7101	0,8257	0,3245	340,7489	0,7961	0,8457	0,3298	332,5405
5,00	0,6839	0,8069	0,3207	340,8665	0,7633	0,8239	0,3253	333,0239
10,00	0,6591	0,7891	0,3171	340,9373	0,7326	0,8035	0,3211	333,4571
20,00	0,6148	0,7570	0,3110	340,9374	0,6783	0,7672	0,3139	334,1519
30,00	0,5764	0,7289	0,3058	340,7605	0,6319	0,7358	0,3080	334,6332
40,00	0,5426	0,7042	0,3014	340,4184	0,5917	0,7084	0,3030	334,9169
50,00	0,5128	0,6821	0,2976	339,9219	0,5565	0,6842	0,2988	335,0167
60,00	0,4862	0,6622	0,2944	339,2801	0,5254	0,6626	0,2953	334,9446
70,00	0,4623	0,6443	0,2917	338,5013	0,4978	0,6433	0,2923	334,7110
80,00	0,4408	0,6280	0,2893	337,5929	0,4730	0,6259	0,2897	334,3253
90,00	0,4213	0,6131	0,2873	336,5614	0,4507	0,6100	0,2875	333,7957
100,00	0,4035	0,5994	0,2855	335,4128	0,4305	0,5955	0,2856	333,1297
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,8961	0,8665	0,3329	322,0343	1,0124	0,8881	0,3340	309,7037
5,00	0,8547	0,8413	0,3276	322,9151	0,9599	0,8590	0,3280	311,0385
10,00	0,8164	0,8179	0,3228	323,7407	0,9119	0,8323	0,3225	312,3111
20,00	0,7497	0,7768	0,3147	325,1838	0,8296	0,7860	0,3135	314,6047
30,00	0,6935	0,7418	0,3080	326,3699	0,7614	0,7473	0,3063	316,5899
40,00	0,6455	0,7117	0,3025	327,3203	0,7041	0,7144	0,3005	318,2945
50,00	0,6039	0,6853	0,2980	328,0525	0,6551	0,6859	0,2957	319,7414
60,00	0,5677	0,6621	0,2942	328,5821	0,6128	0,6611	0,2918	320,9502
70,00	0,5357	0,6414	0,2910	328,9222	0,5759	0,6392	0,2885	321,9378
80,00	0,5073	0,6229	0,2882	329,0846	0,5434	0,6196	0,2858	322,7188
90,00	0,4818	0,6061	0,2859	329,0796	0,5145	0,6021	0,2835	323,3059
100,00	0,4590	0,5909	0,2839	328,9164	0,4886	0,5862	0,2816	323,7104
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,1473	0,9106	0,3333	296,0730	1,3031	0,9341	0,3314	281,7229
5,00	1,0804	0,8772	0,3266	297,9570	1,2175	0,8959	0,3243	284,3100
10,00	1,0200	0,8468	0,3207	299,7706	1,1415	0,8618	0,3182	286,8174
20,00	0,9183	0,7951	0,3111	303,0936	1,0158	0,8047	0,3084	291,4655
30,00	0,8358	0,7527	0,3036	306,0474	0,9160	0,7588	0,3012	295,6732
40,00	0,7674	0,7171	0,2977	308,6683	0,8349	0,7209	0,2957	299,4877
50,00	0,7098	0,6867	0,2930	310,9861	0,7675	0,6890	0,2914	302,9472
60,00	0,6607	0,6605	0,2892	313,0256	0,7106	0,6617	0,2882	306,0829
70,00	0,6182	0,6375	0,2862	314,8079	0,6619	0,6380	0,2856	308,9211
80,00	0,5810	0,6172	0,2836	316,3510	0,6198	0,6172	0,2837	311,4842
90,00	0,5483	0,5990	0,2816	317,6708	0,5829	0,5987	0,2821	313,7913
100,00	0,5192	0,5827	0,2799	318,7811	0,5504	0,5822	0,2809	315,8591



Tabela D18 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 60 - PD 40 (milho), temperatura de 413,15 K

$T = 413,15 K$				
$P/MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4811	0,9586	0,3289	267,2966
5,00	1,3716	0,9157	0,3218	270,8261
10,00	1,2760	0,8779	0,3159	274,2666
20,00	1,1212	0,8161	0,3069	280,7075
30,00	1,0013	0,7674	0,3007	286,6252
40,00	0,9055	0,7278	0,2963	292,0810
50,00	0,8272	0,6950	0,2931	297,1232
60,00	0,7618	0,6671	0,2910	301,7909
70,00	0,7065	0,6432	0,2895	306,1166
80,00	0,6590	0,6223	0,2886	310,1275
90,00	0,6178	0,6039	0,2880	313,8468
100,00	0,5816	0,5875	0,2878	317,2945

Tabela D19 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 80 - PD 20 (milho).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,6685	0,8770	0,3849	384,4955	0,7502	0,8940	0,3875	373,0695
5,00	0,6463	0,8593	0,3814	384,7526	0,7224	0,8731	0,3827	373,4827
10,00	0,6251	0,8423	0,3773	384,9678	0,6961	0,8532	0,3779	373,8469
20,00	0,5870	0,8114	0,3706	385,2617	0,6491	0,8175	0,3697	374,4103
30,00	0,5534	0,7841	0,3649	385,3839	0,6083	0,7863	0,3619	374,7670
40,00	0,5236	0,7597	0,3601	385,3450	0,5726	0,7587	0,3560	374,9314
50,00	0,4970	0,7377	0,3559	385,1546	0,5411	0,7342	0,3509	374,9157
60,00	0,4731	0,7178	0,3523	384,8211	0,5129	0,7121	0,3465	374,7309
70,00	0,4515	0,6997	0,3491	384,3520	0,4877	0,6921	0,3422	374,3866
80,00	0,4319	0,6832	0,3464	383,7543	0,4650	0,6740	0,3388	373,8914
90,00	0,4140	0,6680	0,3440	383,0339	0,4444	0,6574	0,3358	373,2530
100,00	0,3976	0,6539	0,3419	382,1964	0,4257	0,6422	0,3331	372,4784
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,8474	0,9117	0,3864	358,3374	0,9638	0,9300	0,3816	340,6705
5,00	0,8120	0,8868	0,3805	358,8428	0,9183	0,9002	0,3739	341,1917
10,00	0,7789	0,8634	0,3745	359,2885	0,8763	0,8725	0,3664	341,6380
20,00	0,7207	0,8220	0,3641	359,9800	0,8033	0,8241	0,3536	342,2880
30,00	0,6709	0,7862	0,3554	360,4230	0,7421	0,7830	0,3428	342,6389
40,00	0,6278	0,7550	0,3478	360,6363	0,6899	0,7477	0,3338	342,7158
50,00	0,5902	0,7274	0,3414	360,6361	0,6449	0,7168	0,3260	342,5397
60,00	0,5570	0,7029	0,3358	360,4364	0,6057	0,6897	0,3193	342,1289
70,00	0,5275	0,6810	0,3309	360,0495	0,5712	0,6655	0,3134	341,4989
80,00	0,5012	0,6612	0,3266	359,4863	0,5406	0,6439	0,3083	340,6635
90,00	0,4775	0,6431	0,3228	358,7565	0,5132	0,6244	0,3037	339,6348
100,00	0,4560	0,6267	0,3194	357,8687	0,4887	0,6066	0,2996	338,4234
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,1047	0,9490	0,3735	320,4714	1,2770	0,9689	0,3616	298,1764
5,00	1,0454	0,9130	0,3633	320,9182	1,1984	0,9250	0,3488	298,4448
10,00	0,9913	0,8801	0,3541	321,2692	1,1280	0,8854	0,3375	298,5893
20,00	0,8991	0,8233	0,3384	321,6763	1,0104	0,8186	0,3187	298,5187
30,00	0,8233	0,7760	0,3256	321,7232	0,9159	0,7642	0,3036	298,0137
40,00	0,7598	0,7360	0,3148	321,4432	0,8384	0,7189	0,2910	297,1189
50,00	0,7058	0,7015	0,3056	320,8640	0,7734	0,6804	0,2803	295,8705
60,00	0,6593	0,6715	0,2977	320,0089	0,7183	0,6473	0,2711	294,2987
70,00	0,6189	0,6450	0,2908	318,8979	0,6708	0,6184	0,2631	292,4287
80,00	0,5833	0,6215	0,2847	317,5482	0,6296	0,5929	0,2561	290,2822
90,00	0,5518	0,6004	0,2792	315,9750	0,5933	0,5702	0,2498	287,8779
100,00	0,5237	0,5813	0,2744	314,1914	0,5612	0,5499	0,2441	285,2323

Tabela D 20 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 80 - PD 20 (milho), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4900	0,9895	0,3463	274,2601
5,00	1,3841	0,9355	0,3305	274,2335
10,00	1,2912	0,8877	0,3170	274,0462
20,00	1,1398	0,8089	0,2947	273,2316
30,00	1,0214	0,7464	0,2771	271,8926
40,00	0,9264	0,6953	0,2626	270,0889
50,00	0,8482	0,6526	0,2505	267,8681
60,00	0,7828	0,6163	0,2401	265,2689
70,00	0,7272	0,5849	0,2311	262,3233
80,00	0,6793	0,5575	0,2232	259,0584
90,00	0,6376	0,5332	0,2162	255,4973
100,00	0,6010	0,5116	0,2097	251,6602

Tabela D21 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 100 - PD 0 (milho).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,6666	0,8247	0,3386	362,5894	0,7450	0,8380	0,3398	352,1674
5,00	0,6447	0,8074	0,3344	362,1232	0,7178	0,8182	0,3350	351,9779
10,00	0,6239	0,7909	0,3305	361,6036	0,6921	0,7994	0,3305	351,7317
20,00	0,5862	0,7608	0,3236	360,4376	0,6461	0,7656	0,3225	351,0867
30,00	0,5531	0,7341	0,3175	359,1118	0,6061	0,7359	0,3157	350,2509
40,00	0,5236	0,7102	0,3122	357,6362	0,5710	0,7097	0,3098	349,2371
50,00	0,4973	0,6887	0,3076	356,0194	0,5399	0,6863	0,3046	348,0567
60,00	0,4736	0,6692	0,3035	354,2693	0,5122	0,6652	0,3001	346,7196
70,00	0,4522	0,6515	0,2999	352,3929	0,4873	0,6461	0,2962	345,2346
80,00	0,4327	0,6353	0,2966	350,3964	0,4648	0,6288	0,2926	343,6097
90,00	0,4149	0,6203	0,2937	348,2854	0,4445	0,6129	0,2895	341,8518
100,00	0,3986	0,6065	0,2911	346,0653	0,4259	0,5983	0,2867	339,9675
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,8350	0,8518	0,3389	339,7704	0,9379	0,8660	0,3363	325,9843
5,00	0,8009	0,8292	0,3334	339,8995	0,8952	0,8403	0,3302	326,5071
10,00	0,7691	0,8079	0,3283	339,9675	0,8556	0,8164	0,3247	326,9636
20,00	0,7128	0,7700	0,3195	339,9206	0,7866	0,7744	0,3151	327,6581
30,00	0,6645	0,7373	0,3120	339,6462	0,7283	0,7385	0,3072	328,0824
40,00	0,6226	0,7086	0,3056	339,1613	0,6785	0,7075	0,3006	328,2586
50,00	0,5860	0,6833	0,3001	338,4804	0,6353	0,6804	0,2949	328,2053
60,00	0,5536	0,6607	0,2953	337,6162	0,5976	0,6564	0,2901	327,9385
70,00	0,5247	0,6404	0,2911	336,5798	0,5642	0,6351	0,2859	327,4721
80,00	0,4989	0,6220	0,2874	335,3811	0,5346	0,6159	0,2822	326,8184
90,00	0,4756	0,6054	0,2842	334,0288	0,5081	0,5985	0,2790	325,9882
100,00	0,4545	0,5901	0,2812	332,5308	0,4842	0,5827	0,2761	324,9911
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,0549	0,8807	0,3325	311,4348	1,1865	0,8960	0,3281	296,7906
5,00	1,0012	0,8518	0,3261	312,4746	1,1190	0,8639	0,3217	298,5391
10,00	0,9520	0,8252	0,3202	313,4433	1,0580	0,8348	0,3159	300,2126
20,00	0,8675	0,7791	0,3104	315,1199	0,9547	0,7850	0,3064	303,2501
30,00	0,7973	0,7403	0,3024	316,4769	0,8706	0,7439	0,2990	305,9113
40,00	0,7381	0,7072	0,2959	317,5427	0,8008	0,7093	0,2931	308,2325
50,00	0,6875	0,6786	0,2904	318,3411	0,7418	0,6797	0,2884	310,2438
60,00	0,6437	0,6536	0,2858	318,8921	0,6913	0,6540	0,2845	311,9702
70,00	0,6054	0,6314	0,2819	319,2131	0,6475	0,6315	0,2812	313,4331
80,00	0,5716	0,6117	0,2785	319,3192	0,6092	0,6115	0,2786	314,6508
90,00	0,5416	0,5939	0,2756	319,2235	0,5754	0,5937	0,2763	315,6393
100,00	0,5147	0,5778	0,2730	318,9377	0,5454	0,5776	0,2744	316,4125

Tabela D22 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 100 - PD 0 (milho), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,3317	0,9118	0,3239	282,7677
5,00	1,2473	0,8771	0,3180	285,5082
10,00	1,1720	0,8459	0,3129	288,1728
20,00	1,0468	0,7934	0,3048	293,1363
30,00	0,9469	0,7509	0,2989	297,6595
40,00	0,8651	0,7157	0,2945	301,7884
50,00	0,7969	0,6859	0,2911	305,5606
60,00	0,7392	0,6602	0,2886	309,0068
70,00	0,6897	0,6379	0,2868	312,1531
80,00	0,6466	0,6183	0,2854	315,0216
90,00	0,6089	0,6008	0,2844	317,6315
100,00	0,5756	0,5851	0,2837	319,9993

Tabela D 23 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 20 - PD 80 (linhaça).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,7343	0,8232	0,3187	328,5792	0,8242	0,8454	0,3252	321,0818
5,00	0,7061	0,8036	0,3147	328,6495	0,7889	0,8226	0,3204	321,5246
10,00	0,6796	0,7851	0,3110	328,6704	0,7560	0,8013	0,3161	321,9141
20,00	0,6324	0,7519	0,3046	328,5661	0,6981	0,7635	0,3085	322,5152
30,00	0,5915	0,7230	0,2992	328,2793	0,6488	0,7311	0,3024	322,8956
40,00	0,5559	0,6975	0,2946	327,8228	0,6062	0,7029	0,2972	323,0723
50,00	0,5245	0,6749	0,2908	327,2078	0,5692	0,6781	0,2929	323,0599
60,00	0,4966	0,6546	0,2875	326,4441	0,5366	0,6560	0,2892	322,8709
70,00	0,4716	0,6363	0,2846	325,5402	0,5077	0,6363	0,2861	322,5164
80,00	0,4492	0,6198	0,2822	324,5040	0,4819	0,6186	0,2834	322,0062
90,00	0,4288	0,6047	0,2801	323,3422	0,4587	0,6025	0,2811	321,3489
100,00	0,4104	0,5908	0,2783	322,0611	0,4377	0,5878	0,2792	320,5523
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,9293	0,8684	0,3294	311,2127	1,0523	0,8924	0,3314	299,4020
5,00	0,8847	0,8419	0,3238	312,0544	0,9954	0,8616	0,3250	300,6906
10,00	0,8435	0,8174	0,3187	312,8368	0,9436	0,8334	0,3192	301,9118
20,00	0,7722	0,7746	0,3101	314,1854	0,8554	0,7850	0,3096	304,0914
30,00	0,7124	0,7383	0,3032	315,2676	0,7828	0,7447	0,3020	305,9501
40,00	0,6616	0,7072	0,2974	316,1059	0,7221	0,7106	0,2958	307,5176
50,00	0,6178	0,6801	0,2927	316,7192	0,6705	0,6812	0,2908	308,8185
60,00	0,5798	0,6563	0,2887	317,1239	0,6261	0,6557	0,2867	309,8736
70,00	0,5463	0,6352	0,2854	317,3338	0,5874	0,6332	0,2832	310,7007
80,00	0,5167	0,6163	0,2826	317,3615	0,5535	0,6133	0,2803	311,3153
90,00	0,4902	0,5992	0,2801	317,2175	0,5234	0,5954	0,2779	311,7307
100,00	0,4665	0,5838	0,2781	316,9116	0,4966	0,5793	0,2759	311,9589
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,1960	0,9174	0,3316	286,1329	1,3636	0,9436	0,3302	271,9471
5,00	1,1231	0,8817	0,3243	287,9510	1,2697	0,9024	0,3223	274,4313
10,00	1,0577	0,8495	0,3179	289,6915	1,1868	0,8659	0,3155	276,8260
20,00	0,9482	0,7950	0,3075	292,8535	1,0510	0,8052	0,3047	281,2287
30,00	0,8601	0,7506	0,2995	295,6298	0,9441	0,7569	0,2967	285,1691
40,00	0,7876	0,7136	0,2931	298,0595	0,8578	0,7172	0,2906	288,6986
50,00	0,7269	0,6821	0,2881	300,1744	0,7866	0,6840	0,2859	291,8582
60,00	0,6752	0,6550	0,2840	302,0012	0,7268	0,6557	0,2822	294,6814
70,00	0,6307	0,6314	0,2806	303,5622	0,6758	0,6312	0,2792	297,1964
80,00	0,5920	0,6106	0,2779	304,8766	0,6318	0,6097	0,2769	299,4266
90,00	0,5579	0,5920	0,2756	305,9609	0,5934	0,5907	0,2751	301,3925
100,00	0,5278	0,5754	0,2737	306,8297	0,5596	0,5738	0,2736	303,1117

Tabela D 24 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 20 - PD 80 (linhaça), temperatura de 413,15 K

$T = 413,15 K$				
$P/MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,5574	0,9709	0,3279	257,4517
5,00	1,4361	0,9240	0,3197	260,8202
10,00	1,3312	0,8831	0,3129	264,0858
20,00	1,1630	0,8167	0,3026	270,1503
30,00	1,0340	0,7650	0,2953	275,6629
40,00	0,9318	0,7233	0,2901	280,6906
50,00	0,8488	0,6888	0,2863	285,2858
60,00	0,7799	0,6598	0,2835	289,4906
70,00	0,7219	0,6348	0,2815	293,3396
80,00	0,6722	0,6132	0,2800	296,8620
90,00	0,6293	0,5941	0,2790	300,0823
100,00	0,5917	0,5772	0,2784	303,0218

Tabela D25 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 40 - PD 60 (linhaça).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,7227	0,8204	0,3176	332,6454	0,7227	0,8204	0,3176	332,6454
5,00	0,6957	0,8016	0,3139	332,7908	0,6957	0,8016	0,3139	332,7908
10,00	0,6702	0,7839	0,3106	332,8896	0,6702	0,7839	0,3106	332,8896
20,00	0,6246	0,7520	0,3047	332,9448	0,6246	0,7520	0,3047	332,9448
30,00	0,5851	0,7241	0,2998	332,8219	0,5851	0,7241	0,2998	332,8219
40,00	0,5505	0,6995	0,2957	332,5332	0,5505	0,6995	0,2957	332,5332
50,00	0,5199	0,6776	0,2922	332,0893	0,5199	0,6776	0,2922	332,0893
60,00	0,4927	0,6580	0,2893	331,4997	0,4927	0,6580	0,2893	331,4997
70,00	0,4683	0,6403	0,2868	330,7727	0,4683	0,6403	0,2868	330,7727
80,00	0,4464	0,6242	0,2846	329,9158	0,4464	0,6242	0,2846	329,9158
90,00	0,4265	0,6095	0,2828	328,9355	0,4265	0,6095	0,2828	328,9355
100,00	0,4083	0,5960	0,2812	327,8380	0,4083	0,5960	0,2812	327,8380
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	0,9084	0,8645	0,3298	316,9554	1,0249	0,8880	0,3327	305,8646
5,00	0,8661	0,8393	0,3247	317,8710	0,9714	0,8588	0,3268	307,2130
10,00	0,8269	0,8160	0,3200	318,7315	0,9225	0,8320	0,3214	308,4989
20,00	0,7588	0,7750	0,3121	320,2431	0,8386	0,7856	0,3125	310,8168
30,00	0,7015	0,7401	0,3057	321,4962	0,7693	0,7468	0,3054	312,8243
40,00	0,6526	0,7101	0,3004	322,5122	0,7111	0,7139	0,2996	314,5492
50,00	0,6103	0,6839	0,2961	323,3090	0,6614	0,6854	0,2950	316,0150
60,00	0,5734	0,6608	0,2925	323,9022	0,6184	0,6606	0,2912	317,2414
70,00	0,5409	0,6402	0,2895	324,3053	0,5810	0,6387	0,2880	318,2455
80,00	0,5121	0,6218	0,2869	324,5301	0,5480	0,6192	0,2854	319,0420
90,00	0,4863	0,6052	0,2848	324,5868	0,5188	0,6018	0,2831	319,6437
100,00	0,4631	0,5901	0,2829	324,4849	0,4926	0,5860	0,2813	320,0621
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,1610	0,9125	0,3337	293,1749	1,3197	0,9381	0,3330	279,3737
5,00	1,0928	0,8786	0,3269	295,0207	1,2323	0,8990	0,3255	281,8242
10,00	1,0313	0,8479	0,3209	296,7942	1,1547	0,8641	0,3190	284,1905
20,00	0,9278	0,7957	0,3111	300,0341	1,0267	0,8058	0,3086	288,5521
30,00	0,8439	0,7529	0,3035	302,9018	0,9253	0,7590	0,3008	292,4682
40,00	0,7746	0,7170	0,2975	305,4338	0,8429	0,7203	0,2949	295,9870
50,00	0,7162	0,6865	0,2927	307,6604	0,7745	0,6878	0,2902	299,1472
60,00	0,6664	0,6600	0,2888	309,6067	0,7169	0,6600	0,2866	301,9806
70,00	0,6233	0,6369	0,2857	311,2941	0,6676	0,6359	0,2837	304,5138
80,00	0,5857	0,6165	0,2831	312,7409	0,6249	0,6148	0,2814	306,7694
90,00	0,5526	0,5983	0,2810	313,9629	0,5876	0,5960	0,2796	308,7670
100,00	0,5232	0,5819	0,2792	314,9742	0,5547	0,5793	0,2782	310,5233



Tabela D26 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 40 - PD 60 (linhaça), temperatura de 413,15 K

$T = 413,15 K$				
$P/MPa$	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,5037	0,9649	0,3311	265,0070
5,00	1,3913	0,9201	0,3232	268,2345
10,00	1,2934	0,8808	0,3164	271,3641
20,00	1,1352	0,8166	0,3061	277,1758
30,00	1,0129	0,7660	0,2987	282,4565
40,00	0,9154	0,7251	0,2933	287,2686
50,00	0,8357	0,6911	0,2893	291,6616
60,00	0,7694	0,6623	0,2863	295,6754
70,00	0,7132	0,6376	0,2841	299,3429
80,00	0,6651	0,6160	0,2825	302,6920
90,00	0,6233	0,5970	0,2813	305,7461
100,00	0,5867	0,5801	0,2805	308,5256

Tabela D 27 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 60 - PD 40 (linhaça).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,7110	0,8187	0,3180	337,4893	0,7916	0,8388	0,3256	331,7245
5,00	0,6847	0,8011	0,3151	338,0132	0,7591	0,8184	0,3220	332,5918
10,00	0,6598	0,7844	0,3124	338,4991	0,7288	0,7992	0,3187	333,4176
20,00	0,6154	0,7544	0,3078	339,3303	0,6750	0,7650	0,3130	334,8997
30,00	0,5769	0,7281	0,3041	339,9857	0,6290	0,7355	0,3085	336,1710
40,00	0,5431	0,7049	0,3010	340,4773	0,5891	0,7097	0,3048	337,2472
50,00	0,5132	0,6842	0,2986	340,8155	0,5542	0,6869	0,3018	338,1418
60,00	0,4866	0,6656	0,2965	341,0096	0,5234	0,6666	0,2994	338,8664
70,00	0,4627	0,6488	0,2949	341,0678	0,4959	0,6484	0,2974	339,4315
80,00	0,4411	0,6335	0,2936	340,9972	0,4714	0,6320	0,2958	339,8462
90,00	0,4216	0,6196	0,2926	340,8045	0,4492	0,6170	0,2945	340,1186
100,00	0,4038	0,6068	0,2917	340,4957	0,4292	0,6034	0,2935	340,2561
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,8857	0,8597	0,3308	323,2604	0,9961	0,8814	0,3335	312,3786
5,00	0,8453	0,8359	0,3263	324,4582	0,9453	0,8536	0,3280	313,8953
10,00	0,8078	0,8138	0,3222	325,6087	0,8987	0,8279	0,3231	315,3557
20,00	0,7424	0,7748	0,3154	327,7052	0,8186	0,7835	0,3150	318,0300
30,00	0,6872	0,7417	0,3100	329,5493	0,7522	0,7463	0,3086	320,4023
40,00	0,6400	0,7130	0,3056	331,1615	0,6961	0,7146	0,3034	322,4993
50,00	0,5991	0,6880	0,3021	332,5590	0,6482	0,6871	0,2993	324,3434
60,00	0,5634	0,6659	0,2992	333,7569	0,6067	0,6631	0,2959	325,9536
70,00	0,5319	0,6462	0,2968	334,7682	0,5705	0,6419	0,2932	327,3462
80,00	0,5038	0,6285	0,2949	335,6043	0,5385	0,6230	0,2909	328,5356
90,00	0,4787	0,6125	0,2933	336,2754	0,5101	0,6060	0,2891	329,5341
100,00	0,4561	0,5980	0,2921	336,7904	0,4846	0,5906	0,2876	330,3528
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,1263	0,9040	0,3337	299,3936	1,2806	0,9276	0,3316	284,6559
5,00	1,0618	0,8713	0,3271	301,2219	1,1978	0,8891	0,3237	286,7989
10,00	1,0034	0,8416	0,3213	302,9814	1,1242	0,8545	0,3168	288,8562
20,00	0,9047	0,7909	0,3117	306,2030	1,0020	0,7967	0,3057	292,6119
30,00	0,8245	0,7492	0,3042	309,0635	0,9048	0,7501	0,2972	295,9360
40,00	0,7579	0,7141	0,2983	311,5978	0,8255	0,7115	0,2906	298,8743
50,00	0,7016	0,6841	0,2936	313,8347	0,7595	0,6789	0,2854	301,4638
60,00	0,6535	0,6581	0,2898	315,7983	0,7037	0,6510	0,2811	303,7350
70,00	0,6118	0,6354	0,2867	317,5092	0,6559	0,6268	0,2777	305,7134
80,00	0,5754	0,6152	0,2841	318,9849	0,6144	0,6055	0,2748	307,4208
90,00	0,5433	0,5973	0,2820	320,2408	0,5782	0,5866	0,2725	308,8759
100,00	0,5147	0,5811	0,2803	321,2904	0,5461	0,5697	0,2706	310,0952

Tabela D28- Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 60 - PD 40 (linhaça), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4642	0,9521	0,3272	268,5563
5,00	1,3571	0,9067	0,3179	271,0368
10,00	1,2634	0,8666	0,3100	273,4098
20,00	1,1115	0,8009	0,2974	277,7224
30,00	0,9935	0,7491	0,2880	281,5198
40,00	0,8990	0,7069	0,2808	284,8618
50,00	0,8217	0,6718	0,2751	287,7958
60,00	0,7572	0,6421	0,2705	290,3600
70,00	0,7024	0,6165	0,2669	292,5865
80,00	0,6554	0,5941	0,2638	294,5018
90,00	0,6146	0,5744	0,2613	296,1288
100,00	0,5788	0,5569	0,2593	297,4872

Tabela D 29 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 80 - PD 20 (linhaça).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,6966	0,8250	0,3263	347,0847	0,7782	0,8469	0,3344	340,6922
5,00	0,6713	0,8071	0,3230	347,4560	0,7468	0,8262	0,3304	341,4521
10,00	0,6474	0,7902	0,3200	347,7866	0,7174	0,8068	0,3267	342,1685
20,00	0,6046	0,7596	0,3147	348,3090	0,6653	0,7721	0,3205	343,4331
30,00	0,5674	0,7328	0,3103	348,6573	0,6205	0,7420	0,3153	344,4877
40,00	0,5346	0,7091	0,3066	348,8432	0,5816	0,7157	0,3111	345,3479
50,00	0,5056	0,6879	0,3035	348,8768	0,5476	0,6925	0,3076	346,0270
60,00	0,4797	0,6689	0,3010	348,7673	0,5174	0,6717	0,3047	346,5365
70,00	0,4565	0,6517	0,2988	348,5226	0,4906	0,6531	0,3022	346,8866
80,00	0,4355	0,6360	0,2970	348,1499	0,4665	0,6362	0,3002	347,0864
90,00	0,4164	0,6217	0,2955	347,6556	0,4448	0,6209	0,2985	347,1439
100,00	0,3990	0,6085	0,2942	347,0456	0,4251	0,6069	0,2971	347,0664
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,8733	0,8698	0,3401	331,6862	0,9845	0,8936	0,3436	320,4346
5,00	0,8340	0,8458	0,3353	332,8480	0,9348	0,8656	0,3380	322,0242
10,00	0,7975	0,8234	0,3310	333,9617	0,8892	0,8399	0,3329	323,5587
20,00	0,7337	0,7840	0,3237	335,9850	0,8107	0,7952	0,3246	326,3805
30,00	0,6797	0,7503	0,3178	337,7557	0,7455	0,7576	0,3179	328,8989
40,00	0,6335	0,7212	0,3130	339,2943	0,6904	0,7255	0,3126	331,1405
50,00	0,5934	0,6957	0,3091	340,6178	0,6432	0,6978	0,3083	333,1278
60,00	0,5583	0,6732	0,3058	341,7412	0,6023	0,6735	0,3048	334,8796
70,00	0,5273	0,6531	0,3031	342,6774	0,5665	0,6520	0,3019	336,4124
80,00	0,4997	0,6351	0,3009	343,4378	0,5350	0,6328	0,2995	337,7404
90,00	0,4750	0,6188	0,2990	344,0324	0,5069	0,6156	0,2976	338,8761
100,00	0,4527	0,6040	0,2975	344,4703	0,4817	0,6000	0,2960	339,8305
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,1146	0,9184	0,3449	307,3513	1,2670	0,9443	0,3443	292,9010
5,00	1,0513	0,8859	0,3384	309,4156	1,1859	0,9065	0,3370	295,5207
10,00	0,9941	0,8563	0,3327	311,4151	1,1137	0,8726	0,3306	298,0632
20,00	0,8971	0,8057	0,3233	315,1150	0,9936	0,8158	0,3205	302,7862
30,00	0,8181	0,7640	0,3160	318,4509	0,8979	0,7698	0,3128	307,0735
40,00	0,7525	0,7289	0,3103	321,4578	0,8197	0,7317	0,3070	310,9708
50,00	0,6970	0,6989	0,3058	324,1646	0,7545	0,6996	0,3024	314,5154
60,00	0,6494	0,6728	0,3022	326,5956	0,6994	0,6720	0,2989	317,7377
70,00	0,6083	0,6500	0,2992	328,7711	0,6522	0,6480	0,2961	320,6637
80,00	0,5722	0,6298	0,2968	330,7091	0,6111	0,6269	0,2938	323,3152
90,00	0,5404	0,6117	0,2949	332,4249	0,5752	0,6082	0,2921	325,7111
100,00	0,5121	0,5955	0,2933	333,9320	0,5435	0,5915	0,2907	327,8680

Tabela D 30 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 80 - PD 20 (linhaça), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,4451	0,9713	0,3422	277,6053
5,00	1,3406	0,9277	0,3342	280,9136
10,00	1,2491	0,8892	0,3274	284,1300
20,00	1,1003	0,8259	0,3169	290,1256
30,00	0,9845	0,7759	0,3093	295,6006
40,00	0,8916	0,7351	0,3037	300,6150
50,00	0,8155	0,7011	0,2995	305,2163
60,00	0,7518	0,6723	0,2964	309,4431
70,00	0,6978	0,6474	0,2940	313,3274
80,00	0,6514	0,6257	0,2922	316,8962
90,00	0,6110	0,6066	0,2909	320,1724
100,00	0,5755	0,5895	0,2900	323,1761

Tabela D31 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 100 - PD 0 (linhaça).

$P/MPa$	$T = 293,15 K$				$T = 313,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,6732	0,8186	0,3295	356,3838	0,7503	0,8328	0,3323	347,4452
5,00	0,6505	0,8016	0,3259	356,2096	0,7224	0,8133	0,3280	347,5642
10,00	0,6290	0,7854	0,3225	355,9930	0,6960	0,7948	0,3240	347,6387
20,00	0,5902	0,7559	0,3165	355,4462	0,6488	0,7618	0,3171	347,6507
30,00	0,5562	0,7300	0,3114	354,7545	0,6080	0,7329	0,3113	347,4889
40,00	0,5260	0,7068	0,3070	353,9253	0,5721	0,7074	0,3063	347,1630
50,00	0,4990	0,6860	0,3033	352,9653	0,5405	0,6847	0,3021	346,6818
60,00	0,4749	0,6672	0,3000	351,8806	0,5123	0,6643	0,2985	346,0534
70,00	0,4530	0,6501	0,2972	350,6770	0,4871	0,6460	0,2954	345,2853
80,00	0,4332	0,6345	0,2948	349,3597	0,4644	0,6293	0,2926	344,3841
90,00	0,4151	0,6202	0,2926	347,9337	0,4437	0,6141	0,2903	343,3560
100,00	0,3986	0,6069	0,2907	346,4034	0,4250	0,6001	0,2882	342,2066
$P/MPa$	$T = 333,15 K$				$T = 353,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	0,8390	0,8474	0,3329	336,3827	0,9408	0,8626	0,3317	323,7015
5,00	0,8042	0,8251	0,3280	336,8192	0,8972	0,8371	0,3261	324,5021
10,00	0,7716	0,8042	0,3234	337,2078	0,8569	0,8135	0,3210	325,2503
20,00	0,7142	0,7671	0,3156	337,8202	0,7867	0,7720	0,3124	326,5492
30,00	0,6651	0,7351	0,3091	338,2246	0,7277	0,7368	0,3053	327,6002
40,00	0,6226	0,7072	0,3036	338,4340	0,6772	0,7065	0,2995	328,4203
50,00	0,5854	0,6826	0,2990	338,4599	0,6336	0,6800	0,2946	329,0246
60,00	0,5526	0,6607	0,2951	338,3129	0,5955	0,6567	0,2905	329,4266
70,00	0,5235	0,6411	0,2917	338,0023	0,5620	0,6360	0,2871	329,6382
80,00	0,4974	0,6234	0,2888	337,5367	0,5322	0,6174	0,2841	329,6702
90,00	0,4739	0,6073	0,2863	336,9238	0,5055	0,6006	0,2816	329,5322
100,00	0,4527	0,5927	0,2841	336,1708	0,4816	0,5853	0,2794	329,2330
$P/MPa$	$T = 373,15 K$				$T = 393,15 K$			
	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$	$\kappa_T$	$\alpha_p$	$cp - cv$	$p_{int}$
	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$	$GPa^{-1}$	$10^{-3} K^{-1}$	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$MPa$
0,10	1,0571	0,8783	0,3291	309,9436	1,1891	0,8946	0,3255	295,6914
5,00	1,0024	0,8494	0,3229	311,1884	1,1204	0,8621	0,3190	297,5099
10,00	0,9524	0,8228	0,3174	312,3761	1,0583	0,8325	0,3132	299,2668
20,00	0,8667	0,7769	0,3082	314,5153	0,9536	0,7823	0,3038	302,4995
30,00	0,7957	0,7385	0,3008	316,3602	0,8686	0,7410	0,2966	305,3846
40,00	0,7359	0,7059	0,2949	317,9330	0,7981	0,7064	0,2909	307,9510
50,00	0,6849	0,6777	0,2900	319,2533	0,7387	0,6768	0,2864	310,2235
60,00	0,6408	0,6531	0,2860	320,3381	0,6879	0,6513	0,2827	312,2236
70,00	0,6023	0,6314	0,2826	321,2026	0,6439	0,6289	0,2798	313,9702
80,00	0,5684	0,6121	0,2798	321,8602	0,6055	0,6091	0,2773	315,4798
90,00	0,5383	0,5948	0,2774	322,3227	0,5717	0,5915	0,2754	316,7669
100,00	0,5113	0,5791	0,2753	322,6008	0,5415	0,5756	0,2737	317,8445

Tabela D32 - Propriedades termodinâmicas derivativas para Bio 100 - PD 0 (linhaça), temperatura de 413,15 K

$P/MPa$	$T = 413,15 K$			
	$\kappa_T$ $GPa^{-1}$	$\alpha_p$ $10^{-3} K^{-1}$	$cp - cv$ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$p_{int}$ $MPa$
0,10	1,3370	0,9115	0,3216	281,5713
5,00	1,2508	0,8754	0,3151	284,1624
10,00	1,1740	0,8431	0,3094	286,6890
20,00	1,0468	0,7890	0,3006	291,4099
30,00	0,9455	0,7454	0,2941	295,7229
40,00	0,8629	0,7094	0,2893	299,6648
50,00	0,7941	0,6790	0,2856	303,2669
60,00	0,7360	0,6530	0,2828	306,5561
70,00	0,6862	0,6304	0,2807	309,5555
80,00	0,6430	0,6105	0,2791	312,2853
90,00	0,6052	0,5929	0,2779	314,7629
100,00	0,5717	0,5771	0,2771	317,0040

**APÊNDECE E – VALORES DA COMPRESSIBILIDADE TÉRMICA E SUA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA, CÁLCULO PELA METODOLOGIA DO DARIDON E BAZILE (2018)**

Tabela E1- Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_c(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 0-PD 100 (semente de uva)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7698	0,0104	0,8664	0,0109	0,9656	0,0114	1,1034	0,0122	1,1875	0,0124	1,3856	0,0138	1,5803	0,0151
5,00	0,7363	0,0094	0,8244	0,0097	0,9159	0,0100	1,0391	0,0105	1,1206	0,0106	1,2919	0,0113	1,4609	0,0120
10,00	0,7052	0,0086	0,7860	0,0087	0,8708	0,0089	0,9816	0,0091	1,0591	0,0091	1,2089	0,0094	1,3571	0,0097
20,00	0,6506	0,0075	0,7193	0,0076	0,7929	0,0076	0,8839	0,0077	0,9545	0,0078	1,0723	0,0080	1,1893	0,0082
30,00	0,6041	0,0081	0,6632	0,0082	0,7281	0,0084	0,8045	0,0086	0,8693	0,0087	0,9641	0,0090	1,0592	0,0094
40,00	0,5638	0,0083	0,6153	0,0085	0,6734	0,0086	0,7384	0,0088	0,7985	0,0089	0,8758	0,0092	0,9554	0,0095
50,00	0,5286	0,0082	0,5741	0,0083	0,6264	0,0084	0,6825	0,0086	0,7386	0,0086	0,8028	0,0088	0,8705	0,0090
60,00	0,4978	0,0079	0,5381	0,0079	0,5856	0,0080	0,6340	0,0080	0,6872	0,0080	0,7414	0,0080	0,7998	0,0080
70,00	0,4703	0,0076	0,5064	0,0077	0,5500	0,0077	0,5931	0,0078	0,6427	0,0079	0,6888	0,0081	0,7397	0,0083
80,00	0,4458	0,0082	0,4783	0,0084	0,5186	0,0086	0,5567	0,0089	0,6036	0,0090	0,6434	0,0094	0,6884	0,0098
90,00	0,4237	0,0090	0,4533	0,0093	0,4905	0,0095	0,5247	0,0100	0,5693	0,0103	0,6036	0,0109	0,6437	0,0115
100,00	0,4038	0,0098	0,4308	0,0102	0,4654	0,0106	0,4962	0,0112	0,5386	0,0117	0,5685	0,0125	0,6047	0,0133



Tabela E2- Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_c(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 20-PD 80 (semente de uva)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7319	0,0100	0,8258	0,0105	0,9303	0,0111	1,0875	0,0123	1,2204	0,0130	1,3556	0,0137	1,5172	0,0146
5,00	0,7038	0,0091	0,7901	0,0095	0,8857	0,0098	1,0233	0,0105	1,1426	0,0109	1,2647	0,0113	1,4085	0,0118
10,00	0,6775	0,0084	0,7573	0,0086	0,8445	0,0088	0,9664	0,0091	1,0747	0,0093	1,1847	0,0094	1,3128	0,0096
20,00	0,6306	0,0075	0,6989	0,0075	0,7733	0,0076	0,8702	0,0077	0,9598	0,0078	1,0522	0,0079	1,1567	0,0081
30,00	0,5897	0,0080	0,6492	0,0082	0,7133	0,0083	0,7916	0,0086	0,8679	0,0088	0,9470	0,0090	1,0343	0,0093
40,00	0,5539	0,0082	0,6063	0,0084	0,6619	0,0085	0,7264	0,0088	0,7923	0,0090	0,8613	0,0092	0,9361	0,0094
50,00	0,5224	0,0081	0,5687	0,0083	0,6178	0,0084	0,6712	0,0086	0,7290	0,0087	0,7900	0,0088	0,8552	0,0090
60,00	0,4942	0,0079	0,5357	0,0079	0,5792	0,0079	0,6239	0,0080	0,6754	0,0080	0,7300	0,0080	0,7875	0,0080
70,00	0,4691	0,0076	0,5063	0,0076	0,5454	0,0077	0,5830	0,0078	0,6292	0,0079	0,6785	0,0080	0,7300	0,0082
80,00	0,4464	0,0082	0,4800	0,0083	0,5153	0,0085	0,5472	0,0088	0,5889	0,0091	0,6340	0,0093	0,6804	0,0097
90,00	0,4258	0,0089	0,4564	0,0091	0,4884	0,0094	0,5156	0,0099	0,5537	0,0103	0,5950	0,0107	0,6373	0,0113
100,00	0,4072	0,0097	0,4351	0,0100	0,4643	0,0105	0,4876	0,0111	0,5225	0,0117	0,5608	0,0123	0,5994	0,0130

Tabela E3 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 40-PD 60 (semente de uva)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7145	0,0098	0,8087	0,0104	0,9033	0,0109	1,0087	0,0115	1,1280	0,0121	1,2656	0,0129	1,4219	0,0138
5,00	0,6885	0,0090	0,7744	0,0094	0,8620	0,0097	0,9586	0,0100	1,0675	0,0104	1,1913	0,0108	1,3312	0,0113
10,00	0,6638	0,0084	0,7424	0,0086	0,8236	0,0087	0,9124	0,0089	1,0118	0,0091	1,1237	0,0092	1,2486	0,0094
20,00	0,6196	0,0075	0,6859	0,0075	0,7567	0,0076	0,8329	0,0076	0,9167	0,0077	1,0096	0,0078	1,1108	0,0080
30,00	0,5809	0,0080	0,6378	0,0081	0,7001	0,0083	0,7662	0,0084	0,8384	0,0086	0,9173	0,0088	1,0020	0,0091
40,00	0,5469	0,0082	0,5960	0,0083	0,6514	0,0085	0,7095	0,0086	0,7727	0,0088	0,8409	0,0090	0,9129	0,0093
50,00	0,5168	0,0081	0,5595	0,0082	0,6094	0,0083	0,6609	0,0085	0,7167	0,0086	0,7764	0,0087	0,8386	0,0089
60,00	0,4899	0,0078	0,5273	0,0079	0,5723	0,0079	0,6186	0,0080	0,6686	0,0080	0,7214	0,0080	0,7756	0,0080
70,00	0,4657	0,0076	0,4986	0,0076	0,5397	0,0077	0,5817	0,0077	0,6267	0,0078	0,6738	0,0080	0,7220	0,0081
80,00	0,4438	0,0082	0,4730	0,0083	0,5107	0,0085	0,5489	0,0086	0,5895	0,0089	0,6322	0,0092	0,6753	0,0095
90,00	0,4239	0,0088	0,4499	0,0091	0,4848	0,0094	0,5197	0,0097	0,5569	0,0100	0,5956	0,0105	0,6344	0,0110
100,00	0,4060	0,0096	0,4291	0,0100	0,4614	0,0103	0,4935	0,0108	0,5278	0,0113	0,5630	0,0120	0,5983	0,0127

Tabela E4 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 60-PD 40 (semente de uva)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7028	0,0099	0,8018	0,0104	0,9087	0,0111	1,0122	0,0116	1,2418	0,0130	1,3918	0,0139	1,5564	0,0146
5,00	0,6778	0,0091	0,7680	0,0094	0,8646	0,0098	0,9584	0,0101	1,1654	0,0109	1,2994	0,0114	1,4497	0,0117
10,00	0,6546	0,0085	0,7370	0,0086	0,8240	0,0088	0,9099	0,0089	1,0968	0,0093	1,2170	0,0095	1,3537	0,0096
20,00	0,6125	0,0075	0,6819	0,0075	0,7528	0,0075	0,8261	0,0077	0,9820	0,0078	1,0814	0,0079	1,1965	0,0081
30,00	0,5757	0,0080	0,6347	0,0081	0,6945	0,0083	0,7563	0,0085	0,8894	0,0088	0,9734	0,0090	1,0727	0,0093
40,00	0,5430	0,0082	0,5936	0,0083	0,6443	0,0085	0,6978	0,0087	0,8130	0,0090	0,8854	0,0093	0,9730	0,0095
50,00	0,5140	0,0081	0,5578	0,0082	0,6007	0,0084	0,6478	0,0085	0,7491	0,0087	0,8124	0,0089	0,8906	0,0090
60,00	0,4879	0,0079	0,5261	0,0079	0,5629	0,0080	0,6047	0,0079	0,6947	0,0080	0,7507	0,0080	0,8212	0,0080
70,00	0,4644	0,0075	0,4978	0,0076	0,5298	0,0076	0,5677	0,0078	0,6477	0,0079	0,6980	0,0081	0,7622	0,0083
80,00	0,4432	0,0081	0,4725	0,0083	0,5002	0,0084	0,5344	0,0087	0,6069	0,0091	0,6523	0,0094	0,7115	0,0098
90,00	0,4239	0,0087	0,4497	0,0090	0,4738	0,0093	0,5049	0,0098	0,5710	0,0104	0,6123	0,0109	0,6670	0,0115
100,00	0,4062	0,0095	0,4290	0,0099	0,4502	0,0103	0,4785	0,0109	0,5392	0,0118	0,5771	0,0125	0,6280	0,0133

Tabela E5 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 80-PD 20 (semente de uva)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,6886	0,0097	0,7673	0,0101	0,8625	0,0107	0,9591	0,0112	1,0814	0,0119	1,2270	0,0128	1,3917	0,0138
5,00	0,6641	0,0090	0,7376	0,0092	0,8251	0,0096	0,9146	0,0099	1,0253	0,0103	1,1554	0,0108	1,3007	0,0113
10,00	0,6408	0,0084	0,7092	0,0085	0,7901	0,0087	0,8731	0,0088	0,9736	0,0090	1,0904	0,0092	1,2189	0,0094
20,00	0,5991	0,0075	0,6592	0,0075	0,7286	0,0076	0,8009	0,0076	0,8851	0,0077	0,9806	0,0078	1,0841	0,0079
30,00	0,5625	0,0080	0,6157	0,0081	0,6760	0,0082	0,7400	0,0083	0,8117	0,0085	0,8915	0,0088	0,9769	0,0090
40,00	0,5301	0,0082	0,5777	0,0083	0,6309	0,0084	0,6878	0,0086	0,7497	0,0088	0,8177	0,0090	0,8894	0,0092
50,00	0,5016	0,0081	0,5444	0,0082	0,5915	0,0083	0,6428	0,0084	0,6968	0,0085	0,7552	0,0087	0,8165	0,0089
60,00	0,4758	0,0078	0,5147	0,0079	0,5569	0,0079	0,6034	0,0080	0,6509	0,0080	0,7019	0,0080	0,7547	0,0080
70,00	0,4527	0,0076	0,4882	0,0076	0,5261	0,0077	0,5686	0,0077	0,6109	0,0078	0,6557	0,0079	0,7021	0,0081
80,00	0,4319	0,0081	0,4642	0,0082	0,4987	0,0084	0,5377	0,0085	0,5757	0,0088	0,6154	0,0091	0,6563	0,0094
90,00	0,4127	0,0087	0,4426	0,0090	0,4739	0,0092	0,5100	0,0095	0,5444	0,0099	0,5800	0,0103	0,6164	0,0109
100,00	0,3953	0,0095	0,4230	0,0098	0,4516	0,0102	0,4851	0,0106	0,5163	0,0111	0,5483	0,0117	0,5811	0,0125

Tabela E6 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 100-PD 0 (semente de uva)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,6762	0,0109	0,7554	0,0101	0,8421	0,0105	0,9405	0,0111	1,0539	0,0117	1,1892	0,0125	1,3451	0,0135
5,00	0,6527	0,0101	0,7263	0,0092	0,8068	0,0095	0,8977	0,0098	1,0011	0,0102	1,1225	0,0107	1,2603	0,0112
10,00	0,6305	0,0093	0,6987	0,0085	0,7737	0,0086	0,8577	0,0088	0,9523	0,0090	1,0616	0,0092	1,1846	0,0094
20,00	0,5905	0,0082	0,6498	0,0075	0,7150	0,0075	0,7881	0,0076	0,8683	0,0076	0,9583	0,0077	1,0579	0,0079
30,00	0,5553	0,0075	0,6074	0,0081	0,6650	0,0082	0,7292	0,0083	0,7982	0,0085	0,8738	0,0087	0,9568	0,0089
40,00	0,5242	0,0079	0,5704	0,0083	0,6216	0,0084	0,6785	0,0085	0,7388	0,0087	0,8033	0,0089	0,8734	0,0092
50,00	0,4964	0,0080	0,5378	0,0082	0,5837	0,0083	0,6347	0,0084	0,6880	0,0085	0,7435	0,0087	0,8038	0,0088
60,00	0,4715	0,0080	0,5086	0,0079	0,5502	0,0079	0,5962	0,0080	0,6437	0,0080	0,6923	0,0080	0,7447	0,0081
70,00	0,4489	0,0077	0,4826	0,0076	0,5204	0,0076	0,5623	0,0077	0,6050	0,0078	0,6477	0,0079	0,6937	0,0080
80,00	0,4286	0,0076	0,4591	0,0082	0,4938	0,0083	0,5321	0,0085	0,5706	0,0087	0,6088	0,0090	0,6496	0,0093
90,00	0,4101	0,0081	0,4379	0,0089	0,4698	0,0092	0,5051	0,0094	0,5401	0,0098	0,5742	0,0102	0,6108	0,0107
100,00	0,3930	0,0087	0,4185	0,0097	0,4480	0,0101	0,4807	0,0105	0,5129	0,0110	0,5436	0,0116	0,5764	0,0122

Tabela E7 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 20-PD 80 (milho)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7353	0,0100	0,7719	0,0099	0,9378	0,0111	1,0607	0,0118	1,2304	0,0130	1,3608	0,0136	1,5569	0,0149
5,00	0,7069	0,0092	0,7458	0,0091	0,8928	0,0098	1,0043	0,0102	1,1528	0,0109	1,2717	0,0112	1,4419	0,0119
10,00	0,6802	0,0085	0,7209	0,0084	0,8515	0,0088	0,9525	0,0090	1,0843	0,0093	1,1922	0,0094	1,3416	0,0096
20,00	0,6324	0,0075	0,6750	0,0075	0,7794	0,0076	0,8643	0,0077	0,9696	0,0078	1,0611	0,0079	1,1786	0,0081
30,00	0,5911	0,0080	0,6348	0,0081	0,7189	0,0083	0,7913	0,0085	0,8774	0,0088	0,9561	0,0090	1,0515	0,0093
40,00	0,5549	0,0082	0,5993	0,0082	0,6671	0,0085	0,7298	0,0087	0,8013	0,0090	0,8706	0,0092	0,9498	0,0095
50,00	0,5230	0,0082	0,5676	0,0082	0,6226	0,0084	0,6774	0,0085	0,7379	0,0087	0,7996	0,0088	0,8665	0,0090
60,00	0,4946	0,0079	0,5394	0,0078	0,5837	0,0079	0,6322	0,0080	0,6838	0,0080	0,7394	0,0080	0,7969	0,0080
70,00	0,4693	0,0076	0,5139	0,0076	0,5495	0,0077	0,5929	0,0078	0,6371	0,0079	0,6879	0,0081	0,7378	0,0082
80,00	0,4464	0,0082	0,4906	0,0082	0,5192	0,0085	0,5581	0,0088	0,5966	0,0090	0,6431	0,0093	0,6872	0,0098
90,00	0,4257	0,0089	0,4696	0,0090	0,4922	0,0095	0,5273	0,0099	0,5611	0,0103	0,6039	0,0108	0,6432	0,0114
100,00	0,4069	0,0097	0,4502	0,0098	0,4678	0,0105	0,4998	0,0111	0,5297	0,0117	0,5694	0,0124	0,6044	0,0132

Tabela E8 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_c(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 40-PD 60 (milho)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7125	0,0098	0,8034	0,0103	0,8980	0,0109	1,0106	0,0115	1,1372	0,0123	1,2844	0,0132	1,4538	0,0142
5,00	0,6863	0,0091	0,7699	0,0094	0,8571	0,0097	0,9595	0,0101	1,0739	0,0105	1,2050	0,0110	1,3548	0,0116
10,00	0,6614	0,0084	0,7384	0,0086	0,8190	0,0087	0,9127	0,0089	1,0168	0,0091	1,1343	0,0093	1,2669	0,0095
20,00	0,6169	0,0075	0,6830	0,0075	0,7526	0,0076	0,8319	0,0076	0,9191	0,0077	1,0150	0,0078	1,1223	0,0080
30,00	0,5781	0,0080	0,6353	0,0081	0,6963	0,0083	0,7644	0,0084	0,8388	0,0086	0,9189	0,0089	1,0081	0,0091
40,00	0,5437	0,0082	0,5940	0,0083	0,6481	0,0085	0,7074	0,0086	0,7720	0,0088	0,8401	0,0091	0,9155	0,0093
50,00	0,5136	0,0081	0,5578	0,0082	0,6062	0,0083	0,6586	0,0085	0,7151	0,0086	0,7739	0,0088	0,8388	0,0089
60,00	0,4866	0,0078	0,5260	0,0079	0,5696	0,0079	0,6161	0,0080	0,6662	0,0080	0,7176	0,0080	0,7742	0,0081
70,00	0,4624	0,0076	0,4976	0,0076	0,5371	0,0077	0,5787	0,0077	0,6237	0,0078	0,6690	0,0080	0,7191	0,0081
80,00	0,4406	0,0082	0,4722	0,0083	0,5083	0,0085	0,5459	0,0086	0,5864	0,0089	0,6268	0,0092	0,6714	0,0095
90,00	0,4207	0,0088	0,4493	0,0091	0,4825	0,0094	0,5166	0,0097	0,5535	0,0101	0,5898	0,0105	0,6297	0,0111
100,00	0,4025	0,0096	0,4286	0,0100	0,4592	0,0104	0,4904	0,0108	0,5240	0,0114	0,5568	0,0120	0,5932	0,0127

Tabela E9 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 60-PD 40 (milho)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,6957	0,0097	0,8112	0,0106	0,9667	0,0119	1,0232	0,0117	1,1263	0,0122	1,2715	0,0131	1,4406	0,0141
5,00	0,6713	0,0090	0,7749	0,0095	0,9099	0,0103	0,9688	0,0102	1,0641	0,0105	1,1939	0,0109	1,3425	0,0115
10,00	0,6479	0,0084	0,7419	0,0087	0,8609	0,0091	0,9206	0,0090	1,0073	0,0091	1,1247	0,0093	1,2564	0,0095
20,00	0,6061	0,0075	0,6836	0,0075	0,7771	0,0075	0,8360	0,0077	0,9107	0,0077	1,0080	0,0078	1,1138	0,0080
30,00	0,5693	0,0080	0,6340	0,0081	0,7085	0,0084	0,7663	0,0085	0,8314	0,0086	0,9137	0,0088	1,0012	0,0091
40,00	0,5368	0,0082	0,5913	0,0084	0,6511	0,0086	0,7075	0,0087	0,7652	0,0088	0,8359	0,0091	0,9095	0,0093
50,00	0,5081	0,0081	0,5541	0,0083	0,6024	0,0085	0,6572	0,0085	0,7088	0,0086	0,7706	0,0087	0,8335	0,0089
60,00	0,4822	0,0078	0,5214	0,0079	0,5607	0,0080	0,6139	0,0080	0,6605	0,0080	0,7150	0,0080	0,7696	0,0081
70,00	0,4589	0,0076	0,4924	0,0076	0,5243	0,0076	0,5759	0,0078	0,6185	0,0078	0,6672	0,0080	0,7150	0,0081
80,00	0,4378	0,0081	0,4664	0,0083	0,4925	0,0085	0,5425	0,0087	0,5814	0,0089	0,6253	0,0091	0,6677	0,0095
90,00	0,4186	0,0088	0,4432	0,0091	0,4643	0,0094	0,5128	0,0097	0,5486	0,0100	0,5885	0,0105	0,6265	0,0110
100,00	0,4011	0,0095	0,4220	0,0099	0,4392	0,0105	0,4863	0,0109	0,5196	0,0113	0,5560	0,0119	0,5902	0,0127



Tabela E10 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 80-PD 20 (milho)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7077	0,0099	0,7247	0,0101	0,8139	0,0099	0,9859	0,0113	1,1123	0,0121	1,2896	0,0134	1,4283	0,0140
5,00	0,6811	0,0091	0,6976	0,0092	0,7872	0,0091	0,9382	0,0100	1,0528	0,0104	1,2073	0,0112	1,3332	0,0115
10,00	0,6548	0,0084	0,6721	0,0085	0,7605	0,0084	0,8945	0,0089	0,9986	0,0091	1,1352	0,0095	1,2487	0,0095
20,00	0,6088	0,0075	0,6267	0,0076	0,7123	0,0076	0,8182	0,0076	0,9057	0,0077	1,0144	0,0078	1,1087	0,0080
30,00	0,5692	0,0080	0,5872	0,0080	0,6705	0,0081	0,7545	0,0084	0,8290	0,0086	0,9175	0,0088	0,9977	0,0091
40,00	0,5344	0,0082	0,5526	0,0082	0,6330	0,0083	0,7001	0,0086	0,7645	0,0088	0,8378	0,0091	0,9075	0,0093
50,00	0,5037	0,0081	0,5219	0,0082	0,5998	0,0082	0,6531	0,0084	0,7095	0,0086	0,7711	0,0088	0,8325	0,0089
60,00	0,4764	0,0078	0,4945	0,0079	0,5700	0,0079	0,6122	0,0080	0,6620	0,0080	0,7143	0,0081	0,7692	0,0081
70,00	0,4519	0,0076	0,4698	0,0075	0,5432	0,0076	0,5763	0,0077	0,6209	0,0078	0,6656	0,0079	0,7150	0,0081
80,00	0,4300	0,0082	0,4475	0,0081	0,5188	0,0083	0,5443	0,0086	0,5844	0,0088	0,6232	0,0091	0,6682	0,0095
90,00	0,4100	0,0088	0,4273	0,0087	0,4966	0,0091	0,5158	0,0096	0,5521	0,0100	0,5858	0,0104	0,6274	0,0110
100,00	0,3919	0,0096	0,4088	0,0095	0,4764	0,0100	0,4903	0,0107	0,5234	0,0112	0,5529	0,0119	0,5911	0,0126

Tabela E11 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_c(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 100-PD 0 (milho)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,6774	0,0097	0,7601	0,0102	0,8457	0,0106	0,9528	0,0112	1,0580	0,0117	1,1886	0,0125	1,3333	0,0133
5,00	0,6535	0,0090	0,7300	0,0093	0,8096	0,0095	0,9073	0,0099	1,0042	0,0102	1,1216	0,0107	1,2513	0,0111
10,00	0,6310	0,0084	0,7019	0,0085	0,7760	0,0087	0,8652	0,0089	0,9549	0,0090	1,0612	0,0092	1,1775	0,0093
20,00	0,5904	0,0075	0,6518	0,0075	0,7168	0,0075	0,7923	0,0076	0,8697	0,0077	0,9582	0,0077	1,0536	0,0079
30,00	0,5548	0,0080	0,6086	0,0081	0,6662	0,0082	0,7308	0,0083	0,7989	0,0085	0,8741	0,0087	0,9538	0,0089
40,00	0,5232	0,0081	0,5708	0,0083	0,6224	0,0084	0,6786	0,0086	0,7390	0,0087	0,8038	0,0089	0,8719	0,0091
50,00	0,4953	0,0081	0,5376	0,0082	0,5842	0,0083	0,6334	0,0084	0,6875	0,0085	0,7440	0,0087	0,8031	0,0088
60,00	0,4701	0,0078	0,5080	0,0079	0,5505	0,0079	0,5939	0,0080	0,6431	0,0080	0,6929	0,0080	0,7447	0,0080
70,00	0,4476	0,0076	0,4817	0,0076	0,5205	0,0076	0,5592	0,0077	0,6040	0,0078	0,6483	0,0079	0,6942	0,0080
80,00	0,4270	0,0081	0,4580	0,0082	0,4936	0,0083	0,5284	0,0085	0,5696	0,0087	0,6093	0,0090	0,6505	0,0093
90,00	0,4084	0,0087	0,4366	0,0089	0,4696	0,0092	0,5009	0,0095	0,5389	0,0098	0,5750	0,0102	0,6121	0,0107
100,00	0,3912	0,0094	0,4170	0,0097	0,4477	0,0101	0,4762	0,0105	0,5115	0,0110	0,5443	0,0116	0,5780	0,0122

Tabela E12 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 20-PD 80 (linhaça)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7241	0,0099	0,8233	0,0105	0,9232	0,0110	1,0386	0,0116	1,1790	0,0125	1,3361	0,0135	1,5214	0,0147
5,00	0,6975	0,0091	0,7882	0,0094	0,8803	0,0098	0,9852	0,0101	1,1107	0,0106	1,2498	0,0112	1,4117	0,0118
10,00	0,6722	0,0085	0,7558	0,0086	0,8403	0,0088	0,9364	0,0089	1,0493	0,0092	1,1729	0,0094	1,3153	0,0096
20,00	0,6272	0,0075	0,6981	0,0076	0,7706	0,0076	0,8523	0,0077	0,9448	0,0078	1,0451	0,0079	1,1582	0,0081
30,00	0,5879	0,0080	0,6487	0,0082	0,7119	0,0083	0,7821	0,0085	0,8598	0,0087	0,9428	0,0089	1,0355	0,0093
40,00	0,5533	0,0082	0,6062	0,0084	0,6616	0,0085	0,7231	0,0087	0,7891	0,0089	0,8594	0,0092	0,9367	0,0095
50,00	0,5226	0,0081	0,5688	0,0083	0,6182	0,0084	0,6725	0,0085	0,7295	0,0086	0,7897	0,0088	0,8555	0,0090
60,00	0,4955	0,0079	0,5359	0,0079	0,5801	0,0079	0,6286	0,0080	0,6784	0,0080	0,7308	0,0080	0,7875	0,0080
70,00	0,4707	0,0076	0,5067	0,0076	0,5467	0,0077	0,5901	0,0078	0,6340	0,0079	0,6801	0,0080	0,7298	0,0082
80,00	0,4485	0,0081	0,4806	0,0083	0,5170	0,0085	0,5563	0,0087	0,5952	0,0090	0,6362	0,0093	0,6802	0,0097
90,00	0,4285	0,0088	0,4572	0,0091	0,4903	0,0094	0,5262	0,0098	0,5611	0,0102	0,5977	0,0107	0,6369	0,0113
100,00	0,4101	0,0096	0,4358	0,0100	0,4664	0,0105	0,4993	0,0110	0,5308	0,0116	0,5637	0,0122	0,5990	0,0131

Tabela E13 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 40-PD 60 (linhaça)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7177	0,0099	0,8104	0,0104	0,8999	0,0109	1,0101	0,0115	1,1443	0,0123	1,2874	0,0132	1,4680	0,0143
5,00	0,6905	0,0091	0,7757	0,0094	0,8590	0,0097	0,9596	0,0101	1,0804	0,0105	1,2086	0,0110	1,3660	0,0116
10,00	0,6650	0,0084	0,7437	0,0086	0,8210	0,0087	0,9134	0,0089	1,0229	0,0091	1,1372	0,0093	1,2760	0,0096
20,00	0,6194	0,0075	0,6869	0,0075	0,7546	0,0076	0,8331	0,0076	0,9240	0,0077	1,0182	0,0078	1,1281	0,0080
30,00	0,5798	0,0080	0,6383	0,0081	0,6984	0,0083	0,7663	0,0084	0,8432	0,0086	0,9222	0,0089	1,0116	0,0092
40,00	0,5449	0,0082	0,5964	0,0083	0,6500	0,0085	0,7095	0,0086	0,7757	0,0089	0,8430	0,0091	0,9178	0,0094
50,00	0,5140	0,0081	0,5595	0,0082	0,6081	0,0083	0,6606	0,0085	0,7183	0,0086	0,7769	0,0088	0,8400	0,0089
60,00	0,4866	0,0079	0,5273	0,0079	0,5715	0,0079	0,6184	0,0080	0,6691	0,0080	0,7204	0,0080	0,7746	0,0081
70,00	0,4621	0,0076	0,4986	0,0076	0,5389	0,0077	0,5812	0,0078	0,6264	0,0079	0,6718	0,0080	0,7189	0,0081
80,00	0,4399	0,0082	0,4728	0,0083	0,5101	0,0084	0,5485	0,0086	0,5888	0,0089	0,6295	0,0092	0,6708	0,0095
90,00	0,4198	0,0088	0,4497	0,0091	0,4842	0,0093	0,5192	0,0097	0,5557	0,0101	0,5923	0,0105	0,6289	0,0111
100,00	0,4016	0,0096	0,4287	0,0100	0,4609	0,0103	0,4929	0,0108	0,5261	0,0114	0,5593	0,0120	0,5920	0,0128

Tabela E14 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C (\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 60-PD 40 (linhaça)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,7185	0,0100	0,7899	0,0103	0,8750	0,0107	1,0074	0,0117	1,1057	0,0120	1,2541	0,0130	1,4295	0,0141
5,00	0,6899	0,0092	0,7573	0,0094	0,8367	0,0096	0,9548	0,0102	1,0464	0,0104	1,1788	0,0109	1,3322	0,0115
10,00	0,6634	0,0085	0,7270	0,0086	0,8012	0,0087	0,9071	0,0090	0,9928	0,0091	1,1109	0,0093	1,2463	0,0095
20,00	0,6162	0,0075	0,6733	0,0075	0,7386	0,0076	0,8253	0,0076	0,9007	0,0077	0,9969	0,0078	1,1047	0,0080
30,00	0,5755	0,0080	0,6272	0,0081	0,6853	0,0082	0,7572	0,0084	0,8245	0,0086	0,9046	0,0088	0,9926	0,0091
40,00	0,5398	0,0082	0,5870	0,0083	0,6394	0,0084	0,6998	0,0086	0,7606	0,0088	0,8281	0,0090	0,9019	0,0093
50,00	0,5084	0,0081	0,5519	0,0082	0,5995	0,0083	0,6506	0,0085	0,7058	0,0086	0,7639	0,0087	0,8265	0,0089
60,00	0,4805	0,0079	0,5207	0,0079	0,5643	0,0079	0,6079	0,0080	0,6587	0,0080	0,7091	0,0080	0,7630	0,0081
70,00	0,4556	0,0076	0,4931	0,0076	0,5330	0,0077	0,5711	0,0077	0,6177	0,0078	0,6618	0,0079	0,7087	0,0081
80,00	0,4332	0,0081	0,4681	0,0083	0,5051	0,0084	0,5378	0,0086	0,5816	0,0088	0,6208	0,0091	0,6618	0,0095
90,00	0,4129	0,0088	0,4456	0,0090	0,4801	0,0093	0,5085	0,0096	0,5495	0,0100	0,5843	0,0104	0,6210	0,0110
100,00	0,3944	0,0096	0,4253	0,0099	0,4575	0,0102	0,4824	0,0107	0,5209	0,0112	0,5521	0,0119	0,5848	0,0126

Tabela E15 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_c(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 80-PD 20 (linhaça)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,6858	0,0097	0,7643	0,0101	0,8526	0,0105	0,9784	0,0114	1,0795	0,0119	1,2293	0,0128	1,3970	0,0139
5,00	0,6620	0,0090	0,7347	0,0092	0,8171	0,0095	0,9300	0,0100	1,0240	0,0103	1,1572	0,0108	1,3056	0,0114
10,00	0,6395	0,0084	0,7068	0,0085	0,7839	0,0086	0,8857	0,0089	0,9732	0,0090	1,0924	0,0093	1,2246	0,0095
20,00	0,5989	0,0075	0,6570	0,0075	0,7253	0,0075	0,8089	0,0076	0,8856	0,0077	0,9827	0,0078	1,0900	0,0079
30,00	0,5631	0,0080	0,6141	0,0081	0,6748	0,0082	0,7446	0,0084	0,8129	0,0085	0,8937	0,0087	0,9825	0,0090
40,00	0,5316	0,0081	0,5765	0,0083	0,6311	0,0084	0,6900	0,0086	0,7515	0,0087	0,8197	0,0090	0,8950	0,0093
50,00	0,5035	0,0081	0,5433	0,0082	0,5929	0,0083	0,6431	0,0084	0,6988	0,0085	0,7573	0,0087	0,8219	0,0089
60,00	0,4782	0,0079	0,5138	0,0079	0,5591	0,0079	0,6022	0,0080	0,6533	0,0080	0,7039	0,0080	0,7602	0,0081
70,00	0,4555	0,0075	0,4874	0,0076	0,5290	0,0076	0,5663	0,0077	0,6134	0,0078	0,6578	0,0079	0,7073	0,0080
80,00	0,4348	0,0081	0,4638	0,0082	0,5021	0,0084	0,5344	0,0086	0,5782	0,0087	0,6172	0,0090	0,6614	0,0094
90,00	0,4160	0,0087	0,4423	0,0089	0,4778	0,0092	0,5062	0,0096	0,5469	0,0098	0,5818	0,0103	0,6212	0,0108
100,00	0,3986	0,0094	0,4227	0,0098	0,4559	0,0101	0,4808	0,0107	0,5190	0,0111	0,5501	0,0117	0,5857	0,0124

Tabela E16 - Valores de compressibilidade e incerteza padrão combinada, calculados pela metodologia proposta por Daridon e Bazile (2018).

$P/MPa$	$\kappa_T/GPa^{-1} - U_C(\kappa_T)/GPa^{-1}$ para o Bio 100-PD 0 (linhaça)													
	$T/K = 293,15$		$T/K = 313,15$		$T/K = 333,15$		$T/K = 353,15$		$T/K = 373,15$		$T/K = 393,15$		$T/K = 413,15$	
0,10	0,6810	0,0098	0,7648	0,0102	0,8550	0,0106	0,9541	0,0113	1,0533	0,0117	1,1813	0,0125	1,3350	0,0134
5,00	0,6565	0,0090	0,7344	0,0093	0,8180	0,0095	0,9080	0,0099	1,0000	0,0102	1,1156	0,0106	1,2522	0,0112
10,00	0,6333	0,0084	0,7059	0,0085	0,7833	0,0087	0,8657	0,0089	0,9509	0,0090	1,0557	0,0092	1,1775	0,0094
20,00	0,5917	0,0075	0,6552	0,0075	0,7223	0,0076	0,7922	0,0076	0,8663	0,0077	0,9539	0,0077	1,0530	0,0079
30,00	0,5554	0,0080	0,6114	0,0081	0,6705	0,0082	0,7305	0,0083	0,7959	0,0085	0,8704	0,0087	0,9527	0,0089
40,00	0,5232	0,0081	0,5733	0,0083	0,6257	0,0084	0,6778	0,0086	0,7364	0,0087	0,8009	0,0089	0,8703	0,0092
50,00	0,4947	0,0081	0,5397	0,0082	0,5867	0,0083	0,6325	0,0084	0,6852	0,0085	0,7418	0,0086	0,8015	0,0088
60,00	0,4692	0,0078	0,5100	0,0079	0,5522	0,0079	0,5930	0,0080	0,6409	0,0080	0,6909	0,0080	0,7429	0,0081
70,00	0,4463	0,0076	0,4834	0,0076	0,5217	0,0077	0,5580	0,0077	0,6021	0,0078	0,6468	0,0079	0,6925	0,0080
80,00	0,4255	0,0081	0,4595	0,0082	0,4945	0,0084	0,5272	0,0085	0,5679	0,0087	0,6081	0,0089	0,6485	0,0092
90,00	0,4067	0,0087	0,4380	0,0090	0,4701	0,0092	0,4996	0,0095	0,5374	0,0098	0,5738	0,0102	0,6100	0,0107
100,00	0,3894	0,0094	0,4183	0,0098	0,4480	0,0102	0,4749	0,0105	0,5100	0,0110	0,5434	0,0115	0,5758	0,0122

## APÊNDICE F – INCERTEZA DAS PROPRIEDADES OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E CALCULADAS

### INCERTEZAS DAS FRAÇÕES MOLARES

A incerteza combinada das frações molares  $u_c(x)$  foi determinada de acordo com a equação F1.

$$u_c(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial x_1}{\partial m_i} \cdot u(m_i) \right]^2} \quad (F1)$$

onde:  $m_i$  é a massa do componente “i”,  $u(m_i)$  é a incerteza de ponderação da massa e  $n$  é o número total de componentes na mistura.

A incerteza de ponderação de massa  $u(m_i)$  foi calculado usando a incerteza padrão da balança digital de 0.005 g, e foi obtido da seguinte forma:

$$u(m_i) = \sqrt{2 \cdot 0.005g} \quad (F2)$$

### INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES DE DENSIDADE

Incerteza padrão combinada de medições de densidade  $u_c(\rho)$  foi determinado incluindo três fontes de incerteza: a incerteza de temperatura  $u_c(T)$  de 0.02 K, a incerteza da pressão  $u_c(P)$  of 0.70 MPa e o erro de repetibilidade do densímetro  $u_c(\rho_r)$  de 0.01 kg.m<sup>-3</sup>.

$$U(\rho) = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \cdot u_c(T) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \cdot u_c(P) \right]^2 + (u_c(\rho_r))^2} \quad (F3)$$

Como pode ser visto na equação F3, a incerteza de densidade expandida de alta pressão e alta temperatura foi calculada a partir das incertezas de temperatura, pressão e repetibilidade. Além disso, a calibração do equipamento (que considera períodos de oscilação e densidades de fluido de referência) também foi considerada para o cálculo final da incerteza (VALERO *et al.*, 2021; VALERO; FEITOSA; DE SANT’ANA, 2020).

### INCERTEZAS DA EXPANSIVIDADE TÉRMICA ISOBÁRICA

A incerteza padrão combinada da expansividade térmica isobárica ( $\alpha_p$ ) foi calculado seguindo a equação F4 para os sistemas binários, biodiesel e



petro-diesel:

$$u_c(\alpha_p) = \sqrt{\left[\frac{\partial \alpha_p}{\partial T} \cdot u_c(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial \alpha_p}{\partial P} \cdot u_c(P)\right]^2} \quad (\text{F4})$$

O valor de incerteza adotado é o valor máximo obtido considerando todos os sistemas estudados. O valor de incerteza obtido para a expansividade térmica isobárica foi  $U(\alpha_p) = 7.25\text{E-}2 \text{ K}^{-1}$ .

#### INCERTEZAS DE PRESSÃO INTERNA

A incerteza padrão combinada da pressão interna ( $p_{int}$ ) foi calculado seguindo a equação F5 para os sistemas binários, biodiesel e petro-diesel:

$$u_c(p_{int}) = \sqrt{\left[\frac{\partial p_{int}}{\partial T} \cdot u_c(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial p_{int}}{\partial P} \cdot u_c(P)\right]^2} \quad (\text{F5})$$

O valor de incerteza adotado é o valor máximo obtido considerando todos os sistemas estudados. O valor de incerteza obtido para a pressão interna foi  $U(p_{int}) = 0.33 \text{ MPa}$ .

#### INCERTEZAS DA DIFERENÇA ENTRE AS CAPACIDADES DE CALOR EM PRESSÃO CONSTANTE E VOLUME CONSTANTE

A incerteza padrão combinada da diferença entre as capacidades de calor a pressão constante e volume constante ( $c_p - c_v$ ) foi calculado seguindo a equação F6 para os sistemas binário, biodiesel e petro-diesel:

$$u_c(c_p - c_v) = \sqrt{\left[\frac{\partial (c_p - c_v)}{\partial T} \cdot u_c(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial (c_p - c_v)}{\partial P} \cdot u_c(P)\right]^2} \quad (\text{F6})$$

O valor de incerteza adotado é o valor máximo obtido considerando todos os sistemas estudados. O valor de incerteza obtido para a diferença entre as capacidades caloríficas a pressão constante e volume constante foi de  $U(c_p - c_v) = 1.12\text{E-}3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## APÊNDICE G – COMPOSIÇÃO MÁSSICA DOS BODIESEIS CORRELACIONADO PARA O MODELO.

Tabela G1 - Composição mássica dos biodieseis pertencente ao conjunto de correlação

<b>Autores - Referências</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>C10:0</b>	<b>C12:0</b>	<b>C14:0</b>	<b>C16:0</b>	<b>C16:1</b>	<b>C18:0</b>	<b>C18:1</b>	<b>C18:2</b>	<b>C18:3</b>	<b>C20:0</b>	<b>C20:1</b>	<b>C22:0</b>	<b>C22:1</b>	<b>C24:0</b>
PRIETO et al. (2015)	Semente de algodão	-	-	0.93	26.76	-	2.81	17.89	<b>51.61</b>	-	-	-	-	-	-
PRATAS et al. (2011)	Soja	-	-	0.07	10.76	0.07	3.94	22.96	<b>53.53</b>	7.02	0.38	0.23	0.80	-	0.24
PRATAS et al. (2011)	Palma	0.01	0.04	0.07	5.22	0.20	1.62	<b>62.11</b>	21.07	6.95	0.6	1.35	0.35	0.19	0.22
PRATAS et al. (2011)	Colza	0.03	0.24	0.57	<b>42.45</b>	0.13	4.02	41.92	9.80	0.09	0.36	0.15	0.09	-	0.15
PRATAS et al. (2011)	Soja + Colza	-	0.03	0.09	8.90	0.15	2.76	<b>41.82</b>	37.51	7.02	0.46	0.68	0.46	0.12	-
PRATAS et al. (2011)	Palma + Colza	0.02	0.20	0.54	23.09	0.17	3.02	<b>52.92</b>	15.47	3.08	0.49	0.67	0.24	0.09	-
PRATAS et al. (2011)	Soja + Colza + Palma	0.01	0.18	0.01	25.56	0.11	4.04	<b>33.13</b>	31.72	3.58	0.39	0.2	0.32	0.12	0.63
PRATAS et al. (2011)	Soja + Palma	0.01	0.14	0.38	18.97	0.14	3.28	<b>42.51</b>	27.93	4.66	0.45	0.52	0.33	0.14	0.53
TAT; VAN GERPEN (2003)	Banha	-	0.10	1.80	27.20	3.40	12.20	<b>45.20</b>	10.00	0.10	-	-	-	-	-
TAT; VAN GERPEN (2003)	Sebo	-	0.10	4.10	28.40	3.80	21.70	<b>39.10</b>	2.20	0.60	-	-	-	-	-
TAT; VAN GERPEN (2003)	Soja	-	-	0.10	11.90	0.10	3.90	23.10	<b>53.10</b>	7.80	-	-	-	-	-
TAT; VAN GERPEN (2003)	Canola	-	-	-	4.30	0.20	1.90	<b>65.00</b>	19.10	9.50	-	-	-	-	-
AITBELALE; ABALA; et al. (2019)	Óleos de cozinha	-	-	<b>67.40</b>	-	-	-	24.50	7.40	0.70	-	-	-	-	-
AITBELALE; CHHITI; et al. (2019)	Soja	-	-	-	12.1	-	4.00	23.60	<b>53.20</b>	7.10	-	-	-	-	-
HABRIOUX et al. (2013)	Colza	-	0.10	0.10	5.70	0.20	1.60	<b>61.80</b>	21.10	7.00	0.50	1.20	0.30	0.20	0.20
HABRIOUX et al. (2013)	Soja	-	-	0.10	11.60	0.10	3.90	22.70	<b>53.20</b>	7.00	0.30	0.20	0.70	0.20	
BESSIÈRES et al. (2018)	Alga spirulina	-	-	5.30	<b>45.70</b>	9.20	2.50	1.70	21.80	13.80	-	-	-	-	-
SCHEDEMANN et al. (2013)	Não especificado	-	-	0.60	8.60	0.20	2.20	<b>58.10</b>	20.50	8.10	0.40	1.00	0.10	0.10	0.10
Este Trabalho ( <i>Bio100 - PD0</i> )	Semente de Uva	-	-	-	6.13	-	4.36	29.07	<b>60.16</b>	0.27	-	-	-	-	-
Este Trabalho ( <i>Bio100 - PD0</i> )	Milho	-	-	-	12.80	-	-	36.90	<b>48.70</b>	0.80	-	-	-	-	-
Este Trabalho ( <i>Bio100 - PD0</i> )	Linhaça	-	-	-	4.30	-	0.10	42.00	<b>53.60</b>	-	-	-	-	-	-

\*Valores em negrito referem-se aos compostos majoritários em cada perfil éster dos biodieseis listados

## ANEXO A - ESPECIFICAÇÃO DO ÓLEO DIESEL BX A B30

**Quadro 1** - Especificações impostas pela ANP para as propriedades de três tipos de óleo diesel.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO
		S10	S500	S1800 não rodoviário	
Aspécto (1)		LII (2)			Visual
Cor ASTM, máx		(3)	Vermelho	(5)	Visual
Massa Específica (20°C) (6)	Kg/m <sup>3</sup>	817,8 a 865,0	817,8 a 875,5	822,4 a 886,0	NBR 14483 ASTM D6045 ASTM D1501
Viscosidade a 40°C (7)	mm <sup>2</sup> /s	1,9 a 4,1	2,0 a 5,0		NBR 10441 ASTM D445 ASTM D7279 NBR 15983 ASTM D 7042
Teor de Biodiesel, % vol.	% volume	(8)			NBR 15568 EN 14078 ASTM D7861 ASTM D7371 (9)
Enxofre, máx.	mg/Kg	10	-		ASTM D5453 ASTM D2622 ASTM D7039 ASTM D7220 (9)
		-	500	1800	ASTM D2622 ASTM D5453 ASTM D7039
Destilação/10% vol. mín (10)	°C	180	Anotar		NBR 9619 (9) ASTM D86 (9)
Destilação/50% vol	°C	245,0 a 295,0	245,0 a 310,0		ASTM D1160
Destilação/85% vol	°C	Anotar			
Destilação/90% vol	°C	Anotar			
Destilação/95% vol	°C	Anotar			
Ponto de fulgor, °C, mín.	°C	38			NBR 7974 NBR 14598 ASTM D56 ASTM D93 ASTM D3828
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(11)			NBR 14747 ASTM D6371
Resíduo de Carbono - 10% amostra, máx.	%massa	0,25			NBR 14318 ASTM D524
Cinzas, máx.	%massa	0,01			NBR 9842 ASTM D482
Corrosividade ao cobre		1			NBR 14359 ASTM D130
Teor de água, máx	mg/Kg	200	500		ASTM D6304 EN ISO 12937
Água e sedimentos, máx.	%vol	-	0,05		ASTM D2709
Estabilidade à oxidação, mín.	h	20			EN15751
Contaminação total, máx. (12)	mg/Kg	24	Anotar (14)		EN12662
Número de Acidez, máx.	mg KOH/g	0,3			NBR 14248 ASTM D664
Condutividade elétrica, mín.(13)	pS/m	25	25	Anotar (14)	ASTM D2624 ASTM D4308
Número de cetano ou número de cetano derivado (NCD), mín.	-	48	46	42	ASTM D613 ASTM D6890 ASTM D7170 ASTM D7668

a - (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14).

## ANEXO A (*CONTINUAÇÃO*) - ESPECIFICAÇÃO DO ÓLEO DIESEL BX A B30

- (1) Em caso de disputa ou para efeito de fiscalização, nas autuações por não conformidade no Aspecto, deverão ser realizadas as análises de teor de água e contaminação total, para o óleo diesel BX a B30 (S10 ) e teor de água e água e sedimentos para o óleo diesel BX a B30 (S500), e somente teor de água no óleo diesel BX a B30 (S1800). O Aspecto será considerado não conforme caso ao menos um desses parâmetros esteja fora de especificação.
- (2) Límpido e isento de impurezas, com anotação da temperatura de ensaio.
- (3) Incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.
- (4) O corante vermelho deverá ser especificado conforme a Resolução ANP nº 50/2013, ou outra que venha substituí-la.
- (5) Coloração de amarelo a alaranjado, podendo apresentar-se ligeiramente alterado para a tonalidade marrom devido à coloração do biodiesel.
- (6) As normas NBR 14065 e ASTM D4052 devem ser utilizadas como referência.
- (7) As normas ASTM D445 e NBR 10441 devem ser utilizadas como referência.
- (8) Será admitida variação de  $\pm 0,5\%$  em volume para misturas de óleo diesel com teor de biodiesel inferior a 20% e variação de  $\pm 1,0\%$  em volume para óleo diesel B20 a B30. A norma EN 14078 deve ser utilizada como referência.
- (9) Aplicável somente para mistura de óleo diesel A com até 20% de biodiesel.
- (10) Para óleo diesel BX a B20, somente os métodos NBR 9619 e ASTM D86 devem ser utilizados. O método ASTM D1160 deve ser utilizado para óleo diesel B21 a B30, sendo neste caso os limites "anotar" para as temperaturas de 10% e 50% recuperados.
- (11) Limites conforme (PETROBRAS, 2020).
- (12) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008)
- (13) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo distribuidor.
- (14) Caso a condutividade elétrica medida seja inferior a 25 (pS/m) deverá ser dado destaque do resultado no certificado da qualidade para que o distribuidor seja alertado quanto à adoção de medidas de segurança.

**ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES DO BIODIESEL.****Quadro 2** - Especificações impostas pela ANP para as propriedades do biodiesel.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1) (2)	-	-	-
Massa específica a 20° C	kg/m <sup>3</sup>	850 a 900	7148 14065	1298 4052	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	3,0 a 6,0	10441	445	EN ISO 3104
Teor de água, máx.	mg/kg	200,0 (3)	-	6304	EN ISO 12937
Contaminação Total, máx. (13)	mg/kg	24	15995	-	EN12662 (5)
Ponto de fulgor, mín. (4)	°C	100,0	14598	93	EN ISO 3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	EN 14103 (5)
Cinzas sulfatadas, máx. (6)	% massa	0,020	6294	874	EN ISO 3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	10	15867	5453	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	15554 15555 15553	-	EN 14108 (5) EN 14109 (5) EN 14538 (5)
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	15553 15556	-	EN 14538 (5)
Fósforo, máx. (7)	mg/kg	10	15553	4951	EN 14107 (5) EN 16294 (5)
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx. (6)	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número Cetano (6)	-	Anotar	-	613 6890 (8)	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(9)	14747	6371	EN 116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,50	14448	664	EN 14104 (5)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15771 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5) EN 14106 (5)
Glicerol total, máx. (10)	% massa	0,25	15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Monoacilglicerol, máx.	% massa	0,7	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Diacilglicerol, máx.	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Triacilglicerol, máx.	% massa	0,20	15342 (5) 15344 15908 (5)	6584 (5)	EN 14105 (5)
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	0,20	15343	-	EN 14110 (5)
Índice de Iodo	g/100g	Anotar	-	-	EN 14111 (5)
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín. (11)	hora	12			EN 14112 (5) EN 15751 (5)

a - (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13).

**ANEXO B (CONTINUAÇÃO) - ESPECIFICAÇÕES DO BIODIESEL**

- (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 (PETROBRAS, 2020).
- (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. (Revogado pela Resolução ANP N° 798 DE 01/08/2019):
- (12) A estabilidade à oxidação a 110°C terá seu limite mínimo de 8 horas, a partir de 1º de novembro de 2014.
- (13) Deverá ser utilizada somente a versão da norma de 1998 ou 2008 (EN 12662:1998 ou EN 12662:2008) (Nota acrescentada pela Resolução ANP N° 51 DE 25/11/2015).