UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

WENDEL GUSTAVO PEREIRA DE SOUZA

Aproveitamento de óleo usado para produção de biodiesel: avaliação da eficiência do biocombustível em motor



Ilha Solteira - SP
2026

WENDEL GUSTAVO PEREIRA DE SOUZA

Aproveitamento de óleo usado para produção de biodiesel: avaliação da eficiência do biocombustível em motor

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Profa. Dra. Ligia Maria Manzine Costa

Coorientador(a): Prof. Dr. Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729a

Souza, Wendel Gustavo Pereira de.
Aproveitamento de óleo usado para produção de biodiesel: avaliação da eficiência do biocombustível em motor / Wendel Gustavo Pereira de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2026

Orientadora: Ligia Maria Manzine Costa
Coorientador: Paulo Sérgio Barbosa dos Santos
Inclui bibliografia

1. Biodiesel. 2. Óleo residual. 3. Transesterificação. 4. Motor diesel. 5. Reaproveitamento de resíduos.

Sandra Montibeller - CRB-8/060/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Aproveitamento de óleo usado para produção de biodiesel: avaliação da eficiência do biocombustível em motor

ALUNO: Wendel Gustavo Pereira de Souza RA: 201050811

Orientadora: Profa. Dra. Ligia Maria Manzine Costa
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

Aprovado (X) – Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 7,0

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Sérgio Barbosa dos Santos[1]
Presidente (Coorientador)

Eng. Me. Gabriel Coelho Rodrigues Alvares

Eng. Me. Masoud Ghanbari Kashani

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 08 de julho de 2026.

[1] Em substituição a Profa. Dra. Ligia Maria Manzine Costa (Afastamento por saúde).

Aos meus pais, Oriano e Lucilene, com amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Ligia Maria Manzine Costa, pela orientação dedicada ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, pelas correções, sugestões e pela interpretação dos resultados de espectroscopia apresentados no Apêndice A.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Paulo Sérgio Barbosa dos Santos, agradeço por me apresentar o projeto Reciclóleo, que deu início ao meu interesse pelo tema tratado neste trabalho, além de todo o apoio prestado em seu desenvolvimento, com correções e ajustes ao longo do processo.

Ao Prof. Dr. Devaney Ribeiro do Carmo, do Departamento de Física e Química, agradeço pela disponibilidade e pela realização das análises de espectroscopia no infravermelho (FTIR) das amostras produzidas neste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), destacando a ajuda do aluno de graduação, Lucas Estrella Lopes pela estrutura e pelo suporte disponibilizados para a realização dos ensaios experimentais em motor diesel.

Agradeço também a meus pais, Oriano e Lucilene, e ao meu irmão, Murilo, por todo o amor e apoio durante essa jornada. À minha noiva, Iris, agradeço pelo amor, pela compreensão e por estar ao meu lado em todos os momentos ao longo dessa caminhada. Agradeço ainda ao meu pequeno, mas forte, grupo de amigos que fiz durante essa trajetória, pelos momentos compartilhados e pelo apoio durante todos esses anos.

“Há um ponto de onde não se pode mais voltar.
Esse é o ponto que deve ser alcançado”
— Franz Kafka

RESUMO

O descarte inadequado de óleo vegetal residual representa um problema ambiental relevante, associado à obstrução de sistemas de saneamento e à contaminação de corpos hídricos. Diante disso, este trabalho avaliou o aproveitamento de óleo vegetal usado para produção de biodiesel, com ênfase na eficiência do biocombustível obtido, compreendida como sua capacidade de operar de forma estável em motor diesel real, com consumo e temperatura comparáveis aos do diesel comercial. O óleo residual, coletado no restaurante universitário da UNESP, foi filtrado, titulado e submetido à transesterificação alcalina com metanol e hidróxido de sódio. Foram realizadas quatro sínteses, com rendimentos entre 72% e 88%, e o biodiesel obtido foi caracterizado por FTIR e testado em motor diesel monocilíndrico Toyama TDE110XP, sob duas cargas elétricas (2000 W e 3000 W) e rotação constante de 1900 rpm, em comparação com diesel comercial B15. O biodiesel operou o motor de forma estável em todas as condições, sem falhas, com temperaturas de exaustão equivalentes às do diesel, embora com consumo em massa superior cerca de 5,1% a 19,2% maior, conforme a carga, associado ao seu menor poder calorífico. A ausência de instrumentação para medição de torque limitou a análise a parâmetros operacionais. Conclui-se que o óleo residual é matéria-prima viável para produção de biodiesel, e que o combustível obtido apresentou compatibilidade operacional satisfatória com o motor utilizado.

Palavras-chave: Biodiesel. Óleo residual. Transesterificação. Motor diesel. Reaproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

The improper disposal of waste vegetable oil is a relevant environmental problem, associated with sewage system blockages and water body contamination. This study evaluated the use of waste vegetable oil for biodiesel production, with emphasis on the efficiency of the biofuel obtained, understood as its ability to operate stably in a real diesel engine, with fuel consumption and temperature comparable to commercial diesel. The waste oil, collected from the university restaurant at UNESP, was filtered, titrated, and subjected to alkaline transesterification using methanol and sodium hydroxide. Four syntheses were performed, with yields between 72% and 88*, and the biodiesel obtained was characterized by FTIR and tested in a Toyama TDE110XP single-cylinder diesel engine under two electrical loads (2000 W and 3000 W) at constant speed of 1900 rpm, compared to commercial B15 diesel. The biodiesel operated the engine stably under all conditions, with no failures, and exhaust temperatures equivalent to diesel, although with higher mass fuel consumption about 5.1% to 19.2% higher, depending on load, associated with its lower calorific value. The lack of torque measurement instrumentation limited the analysis to operational parameters. It is concluded that waste oil is a viable feedstock for biodiesel production, and that the fuel obtained showed satisfactory operational compatibility with the engine used.*

Keywords: *Biodiesel. Waste oil. Transesterification. Diesel engine. Waste reuse.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do processo experimental 27
Figura 2: Montagem completa da reação em andamento. 30
Figura 3: Montagem da bancada experimental para os ensaios utilizando o motor ciclo Diesel. 33
Figura 4: Banco de lâmpadas utilizadas como carga para o experimento. 34
Figura 5: Balança digital e reservatório de combustível. 35
Figura 6: Biodiesel obtido na síntese preliminar. 36
Figura 7: Aspecto visual da separação das fases na segunda síntese. 37
Figura 8: Biodiesel obtido após a terceira síntese 37
Figura 9: Comparação de aparência entre biodiesel comum e o turvo. 38
Figura 10: Metóxido preparado para o processo de transesterificação. 38
Figura 11: Biodiesel obtido após a otimização das etapas de produção, lavagem e secagem. 39
.Figura 12: Glicerina e biodiesel presentes no funil de separação. 40
Figura 13: Fase glicerinosa. 40
Figura 14: Gráfico comparativo entre diesel comercial e biodiesel obtido em laboratório. 42
Figura A.1: Espectro de FTIR da amostra de glicerina obtida na síntese 48
Figura A.2: Espectro de FTIR das amostras de biodiesel, produzidas com 60 minutos (síntese 1) e 90 minutos (síntese 2) 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições experimentais dos ensaios realizados. 34
Tabela 2: Condições experimentais e rendimentos das sínteses realizadas. 36
Tabela 3: Resultados obtidos através dos ensaios no motor diesel. 41
Tabela A.1: Posição dos máximos das bandas de absorção atribuídas às vibrações correspondentes, para glicerina farmacêutica (purificada) e glicerina obtida na reação 50
Tabela A2: Número de onda das bandas características do biodiesel: valores teóricos (segundo a literatura) e observados na síntese 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATR	Reflectância Total Atenuada
CNT	Confederação Nacional do Transporte
FOG	Fats, Oils and Grease
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
IEA	Agência Internacional de Energia
IPBEN	Instituto de Pesquisa em Bioenergia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
cm^{-1}	Centímetro recíproco (número de onda)
g	Grama
L	Litro
mL	Mililitro
min	Minuto
rpm	Rotações por minuto
W	Watt
δ	Vibração de deformação
C=O	Grupo carbonila
–OH	Grupo hidroxila

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 DEPENDÊCIA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS 19
2.2 A NECESSIDADE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA 19
2.3 BIODIESEL 20
2.4 ÓLEO RESIDUAL COMO MATÉRIA PRIMA 22
2.5 PROCESSO DE TRANSESTERIFICAÇÃO 23
2.6 CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER 24
2.7 UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL EM MOTORES DE CICLO DIESEL 26
3 METODOLOGIA 27
3.1 VISÃO GERAL DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 27
3.2 COLETA E PRÉ TRATAMENTO DO OLEO 27
3.3 TITULAÇÃO 28
3.4 PRODUÇÃO DO BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO. 29
3.5 SEPARAÇÃO DO BIODIESEL E DA GLICERINA 31
3.6 LAVAGEM E SECAGEM DO BIODIESEL. 31
3.7 CARACTERIZAÇÃO POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) 32
3.8 ENSAIOS EM MOTOR DIESEL 33
4 RESULTADOS 35
4.1 PRODUÇÃO DO BIODIESEL 35
4.2 OBTENÇÃO DA GLICERINA 39
4.3 AVALIAÇÃO DO BIODIESEL NO MOTOR DIESEL 41
5 CONCLUSÕES 43
6 BIBLIOGRAFIA 46
APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL E DA GLICERINA POR FTIR 48
A.1 – METODOLOGIA 48
A.2 – RESULTADOS: FASE GLICERINOSA 48
A.3 – RESULTADOS: BIODIESEL 51

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial, somada à preocupação com os impactos ambientais dos combustíveis fósseis, tem impulsionado o desenvolvimento de fontes alternativas de energia capazes de atender às necessidades atuais sem comprometer os recursos das futuras gerações. Os biocombustíveis ganham destaque nesse cenário por seu caráter renovável e por reduzirem as emissões de gases poluentes. Entre eles, o biodiesel se destaca por reunir vantagens energéticas e ambientais, podendo ser utilizado em motores do ciclo Diesel com pouca ou nenhuma modificação estrutural (Knothe, 2006).

A busca por combustíveis renováveis ocorre em paralelo a um problema crescente: a geração de óleos e gorduras residuais (OGR), internacionalmente chamados de *Fats, Oils and Grease (FOG).* Provenientes principalmente de atividades domésticas, comerciais e industriais, esses resíduos costumam ser descartados de forma inadequada em sistemas de drenagem urbana, redes de esgoto e no solo. Esse descarte favorece a formação de depósitos insolúveis, compostos majoritariamente por sais de cálcio de ácidos graxos, que obstruem tubulações e comprometem a eficiência dos sistemas de saneamento básico (Wust, 2004)

Os impactos não se limitam à infraestrutura. Em corpos hídricos, o óleo residual forma uma película superficial que dificulta as trocas gasosas entre água e atmosfera, comprometendo a oxigenação do meio aquático e afetando organismos vivos; no solo, altera as características físicas e reduz a capacidade de infiltração, contribuindo para processos de degradação ambiental (Wust, 2004). O reaproveitamento desse resíduo para produção de biodiesel surge, assim, como alternativa capaz de reduzir esses impactos e transformar em valor um material que, de outra forma, representaria um passivo ambiental.

Há ainda a questão climática: a decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente nesses resíduos pode liberar metano, gás de elevado potencial de aquecimento global em comparação ao dióxido de carbono (IPCC , 2021). O reaproveitamento de resíduos oleosos, portanto, é estratégico tanto do ponto de vista ambiental quanto energético. O biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e menos poluente que o diesel derivado do petróleo, podendo reduzir a dependência de combustíveis fósseis e as emissões atmosféricas (Demirbas, 2009).

Sua obtenção ocorre predominantemente pela reação de transesterificação: triglicerídeos presentes em óleos vegetais reagem com um álcool de cadeia curta geralmente metanol ou etanol na presença de um catalisador, formando ésteres e glicerina como subproduto (Meher, 2006). A própria glicerina gerada tem aplicações nas indústrias cosmética, farmacêutica e química, o que reforça os princípios da economia circular ao agregar valor a todos os produtos do processo (Leung, 2010; Knothe, 2006).

No Brasil, o potencial de aproveitamento desse resíduo é expressivo dado o elevado consumo de óleos vegetais, sobretudo de soja. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, a produção nacional de óleo de soja em 2024 atingiu 11,34 milhões de toneladas, das quais aproximadamente 1,4 milhão de toneladas foram destinadas à exportação restando um consumo interno estimado em 9,94 milhões de toneladas, equivalentes a cerca de 10,8 bilhões de litros (considerando densidade média de 0,92 kg/L) (ABIOVE, 2025). Estima-se que parte desse volume se converta em resíduo de fritura ao longo das cadeias domésticas, comerciais e industriais de consumo, o que reforça a necessidade de iniciativas de coleta e valorização desse material.

Em escala local, Ilha Solteira reúne condições favoráveis para a implementação de sistemas de reaproveitamento de óleo residual voltados à produção de biodiesel, podendo representar, além da mitigação de impactos ambientais, uma alternativa economicamente viável para pequenos produtores rurais e atividades agrícolas da região.

Essas vantagens, contudo, não dispensam a etapa de validação experimental. Propriedades físico-químicas como viscosidade, densidade, índice de cetano e poder calorífico influenciam diretamente parâmetros como consumo específico, eficiência térmica e comportamento da combustão (Heywood, 2018), o que torna os ensaios em motores diesel indispensáveis para verificar a viabilidade real do biocombustível.

Da mesma forma, a caracterização do biodiesel produzido etapa que válida a ocorrência da transesterificação e a qualidade do combustível obtido é essencial ao processo. A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) cumpre esse papel ao identificar os grupos funcionais característicos dos ésteres presentes no biodiesel.

Grande parte da literatura sobre biodiesel a partir de óleo residual, no entanto, concentra-se na etapa de obtenção do combustível, deixando uma lacuna nas

investigações sobre seu desempenho em aplicações práticas. Integrar produção, caracterização e avaliação experimental em motores é, portanto, uma abordagem mais completa e alinhada às demandas atuais de sustentabilidade energética e aproveitamento de resíduos.

O tema abordado neste trabalho dialoga diretamente com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O reaproveitamento de óleo residual contribui para o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao reduzir a contaminação de corpos hídricos e a obstrução de sistemas de saneamento decorrentes do descarte inadequado; para o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), por meio da geração de um combustível renovável alternativo aos derivados de petróleo; para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao propor soluções aplicáveis em escala local e municipal de gestão de resíduos; para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao transformar um resíduo do consumo doméstico e institucional em matéria-prima de valor; e para o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao mitigar a emissão de metano associada à decomposição anaeróbia desse resíduo quando descartado inadequadamente (ONU, 2015).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo o aproveitamento de óleo vegetal usado para a produção de biodiesel, com ênfase na avaliação da eficiência do biocombustível obtido, compreendida neste estudo como a capacidade do combustível operar de forma estável em motor diesel real, sem falhas de funcionamento, e com comportamento de consumo e temperatura comparável ao do diesel comercial. Para isso, foram realizados ensaios experimentais em motor diesel monocilíndrico no Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), permitindo analisar o comportamento do combustível quanto ao consumo e à temperatura de operação, contribuindo para a validação preliminar de sua aplicação como alternativa energética sustentável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEPENDÊNCIA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

A matriz energética mundial ainda depende fortemente de combustíveis fósseis petróleo, carvão mineral e gás natural, em razão de sua elevada densidade energética e da infraestrutura já consolidada para sua utilização (IEA, 2023). Entre os derivados do petróleo, o diesel mineral destaca-se como um dos combustíveis mais importantes para a economia global, amplamente empregado nos setores de transporte, geração de energia e atividades agrícolas.

No Brasil, o diesel ocupa papel estratégico, sobretudo pela predominância do transporte rodoviário no escoamento de mercadorias: aproximadamente 65% do transporte de cargas do país ocorre por esse modal (Confederação Nacional do Transporte, 2022), o que torna o abastecimento de diesel essencial para as cadeias logísticas e produtivas nacionais. O setor agropecuário reforça essa dependência, dado o uso intensivo de tratores, colheitadeiras e demais máquinas agrícolas movidas a diesel.

Essa relevância econômica tem, porém, um custo ambiental. O setor energético responde por uma das principais fontes antropogênicas de emissão de dióxido de carbono (CO_2), contribuindo de forma significativa para o aquecimento global e as mudanças climáticas (IPCC , 2021). Some-se a isso a vulnerabilidade econômica: o mercado internacional do petróleo é marcado por instabilidade decorrente de fatores geopolíticos, conflitos e oscilações entre oferta e demanda (IEA, 2023) que expõe países dependentes a crises de abastecimento e aumentos expressivos no custo da energia, tal como o fechamento do estreito de Ormuz entre o Irã e Omã, onde as tensões por lá podem elevar o preço internacional do petróleo e pressionar os preços do diesel no Brasil (UOL, 2026).

No Brasil, esse efeito já se manifestou em episódios concretos: segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2026), oscilações no preço internacional do petróleo afetaram diretamente os custos do diesel no país, repercutindo sobre transporte, produção agrícola e logística.

2.2 A NECESSIDADE DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O crescimento populacional e o avanço industrial das últimas décadas elevaram substancialmente a demanda mundial por energia, atendida em grande parte por combustíveis fósseis em razão de sua densidade energética, disponibilidade e infraestrutura consolidada. Essa dependência, porém, está diretamente associada a impactos ambientais relevantes, principalmente à emissão de gases de efeito estufa e às mudanças climáticas (IPCC , 2021).

A transição para fontes renováveis surge, nesse cenário, como necessidade estratégica não porque essas fontes superem os combustíveis fósseis em desempenho energético, mas porque oferecem menor impacto ambiental e maior sustentabilidade a longo prazo. A eficiência energética continua sendo um critério relevante, mas não pode ser o único: aspectos ambientais, sociais e econômicos pesam tanto quanto diante dos desafios das mudanças climáticas, da poluição atmosférica e da finitude dos recursos não renováveis. Uma tecnologia menos eficiente em termos energéticos pode, ainda assim, ser mais sustentável quando avaliada nessa perspectiva ampla.

O biodiesel ilustra bem esse equilíbrio: seu menor poder calorífico em relação ao diesel fóssil pode elevar o consumo específico do motor, mas suas vantagens ambientais menores emissões de material particulado, enxofre e CO_2, além da biodegradabilidade e da origem renovável compensam essa desvantagem técnica (Demirbas, 2009) O aproveitamento de resíduos, como o óleo vegetal usado na produção de biodiesel, amplia ainda mais esse benefício, unindo redução de resíduos e geração de combustível renovável em uma lógica de economia circular, na qual passivos ambientais se tornam matéria-prima de valor.

A adoção de fontes renováveis, portanto, deve ser avaliada não apenas pela eficiência energética imediata, mas também por sua contribuição à sustentabilidade ambiental, à segurança energética e à redução da dependência fóssil um argumento que sustenta diretamente a abordagem adotada neste trabalho, em que a eficiência do biodiesel produzido é avaliada sob a ótica de sua capacidade operacional, e não exclusivamente sob a ótica do desempenho termodinâmico comparado ao diesel fóssil.

2.3 BIODIESEL

O biodiesel é definido como um combustível renovável e biodegradável composto por ésteres de ácidos graxos, obtidos a partir de fontes lipídicas de origem vegetal ou animal, podendo substituir o diesel mineral em motores de ignição por compressão e reduzir os impactos ambientais associados a combustíveis fósseis (Knothe, 2006).

O interesse por esse combustível não é recente, mas ganhou força a partir das crises do petróleo da década de 1970, quando diversos países buscaram alternativas que reduzissem sua dependência de derivados fósseis (Demirbas, 2009). Quimicamente, trata-se de uma mistura de ésteres monoalquílicos de cadeia longa, obtida pela reação de transesterificação entre triglicerídeos presentes em óleos vegetais ou gorduras animais e um álcool de cadeia curta, na presença de um catalisador; o processo gera biodiesel e glicerina como subproduto (Meher, 2006).

Soja, palma, girassol, mamona e canola estão entre as matérias-primas mais utilizadas, variando conforme a disponibilidade regional e o custo de produção. O óleo vegetal residual, no entanto, apresenta vantagens adicionais: reaproveita um resíduo potencialmente poluente e reduz o custo da matéria-prima, um dos principais componentes do custo final do biodiesel (Leung, 2010).

Comparado ao diesel fóssil, o biodiesel reduz emissões de material particulado, hidrocarbonetos não queimados, enxofre e monóxido de carbono. Por ser produzido a partir de fontes renováveis, participa também de um ciclo de carbono mais equilibrado, já que parte do CO_2 emitido na combustão havia sido previamente absorvida pelas plantas durante a fotossíntese (Demirbas, 2009). Sua biodegradabilidade e menor toxicidade reduzem ainda a persistência ambiental em casos de vazamento, e a ausência praticamente total de enxofre diminui a formação de chuva ácida.

Essas vantagens, porém, vêm acompanhadas de limitações técnicas: o menor poder calorífico em relação ao diesel mineral pode elevar o consumo específico, e propriedades como viscosidade, estabilidade oxidativa e comportamento em baixas temperaturas afetam diretamente o desempenho em motores diesel (Heywood, 2018). Ainda assim, o biodiesel mantém elevada compatibilidade com motores convencionais, podendo ser usado puro ou em misturas com o diesel fóssil. No Brasil, essa inserção ocorre principalmente por meio de misturas obrigatórias regulamentadas pela (ANP, 2026), o que permite ampliar gradualmente a participação

de combustíveis renováveis sem exigir mudanças estruturais na distribuição já existente.

A cadeia produtiva do biodiesel carrega também relevância econômica e social: estimula a geração de empregos, favorece o desenvolvimento regional e fortalece práticas de economia circular. O aproveitamento de óleo vegetal usado para esse fim reúne, assim, benefícios ambientais, energéticos e econômicos em uma única alternativa.

2.4 ÓLEO RESIDUAL COMO MATÉRIA PRIMA

O óleo vegetal residual, ou óleo de fritura usado, é gerado principalmente por atividades domésticas, comerciais e industriais ligadas à preparação de alimentos. O elevado consumo de óleos vegetais no setor alimentício faz com que grandes volumes desse resíduo sejam produzidos diariamente, tornando seu gerenciamento tanto um desafio ambiental quanto uma oportunidade de aproveitamento energético (Wust, 2004; Zagonel, 2000)

Descartado de forma inadequada em redes de esgoto, sistemas de drenagem ou no solo, esse resíduo causa impactos relevantes. Em corpos hídricos, forma películas superficiais que comprometem a oxigenação do meio aquático e afetam organismos vivos estima-se que um único litro de óleo seja capaz de contaminar até 25 mil litros de água (SABESP, 2026). Em redes de esgoto, gera problemas operacionais e eleva os custos de manutenção do saneamento (Wust, 2004). No solo, altera as características físicas e reduz a capacidade de infiltração da água, contribuindo para a degradação ambiental e sua decomposição anaeróbia ainda libera metano, agravando os impactos climáticos (IPCC , 2021; Zagonel, 2000)

Reaproveitar esse material para produção de biodiesel reduz os impactos do descarte inadequado e converte em energia renovável um resíduo antes tratado como passivo ambiental. O ganho não é apenas ambiental: o custo da matéria-prima pode representar mais de 70% do valor final do biodiesel, de modo que o uso de óleo residual reduz substancialmente os custos produtivos e amplia a viabilidade econômica do processo, ao mesmo tempo em que reforça os princípios da economia circular.

No Brasil, o potencial de geração desse resíduo é expressivo em razão do elevado consumo de óleo de soja e outros óleos vegetais na alimentação: somente o

consumo interno de óleo de soja já se aproxima de 10,8 bilhões de litros anuais, segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2025), com parcela desse volume convertida em resíduo de fritura ao longo das cadeias de consumo. Grande parte desse volume, no entanto, ainda não recebe destinação adequada, o que evidencia a necessidade de sistemas eficientes de coleta. Municípios de pequeno e médio porte têm potencial particular para sistemas de reaproveitamento em pequena escala, beneficiando comunidades locais, produtores rurais e projetos de extensão universitária voltados à educação ambiental contexto no qual se insere a coleta de óleo residual do restaurante universitário utilizada neste trabalho.

A composição química do óleo residual merece atenção especial: a exposição prolongada a altas temperaturas, à água e ao oxigênio durante a fritura provoca oxidação, hidrólise e aumento do teor de ácidos graxos livres, fatores que influenciam diretamente o rendimento e a qualidade do biodiesel produzido (Meher, 2006). Por isso, etapas de filtragem, decantação e, quando necessário, pré-tratamento são fundamentais para adequar a matéria-prima às condições ideais de transesterificação, como será detalhado no capítulo de Metodologia, foram empregadas na condução experimental deste estudo.

A utilização de óleo vegetal residual representa, assim, uma estratégia que integra gestão de resíduos e geração de energia renovável, reduzindo impactos ambientais e fortalecendo práticas sustentáveis.

2.5 PROCESSO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

A produção de biodiesel pode seguir diferentes rotas, craqueamento térmico, microemulsão e transesterificação, sendo esta última a mais utilizada em escala laboratorial e industrial por sua eficiência, simplicidade operacional e capacidade de gerar um combustível com propriedades próximas às do diesel mineral (Meher, 2006).

Na transesterificação, triglicerídeos presentes em óleos vegetais ou gorduras animais reagem com um álcool de cadeia curta geralmente metanol ou etanol na presença de um catalisador, formando ésteres monoalquílicos (o biodiesel) e glicerina como subproduto (Knothe, 2006). A reação ocorre em etapas sucessivas: os triglicerídeos convertem-se primeiro em diglicerídeos, depois em monoglicerídeos e, por fim, em glicerol, liberando uma molécula de éster a cada etapa. Sua eficiência

depende diretamente das condições adotadas temperatura, tempo de reação, razão molar álcool/óleo, tipo de catalisador e qualidade da matéria-prima.

Os catalisadores podem ser homogêneos, heterogêneos ou enzimáticos. Os homogêneos alcalinos hidróxido de sódio (NaOH) e hidróxido de potássio (KOH) são os mais usados pela velocidade reacional e alto rendimento, mas exigem matéria-prima com baixo teor de água e de ácidos graxos livres, já que essas substâncias favorecem a formação de sabões e dificultam a separação do biodiesel (Meher, 2006). É justamente aqui que o óleo residual exige cuidado: as alterações físico-químicas da fritura aumento de ácidos graxos livres, oxidação, degradação térmica pode reduzir a eficiência da reação, tornando indispensáveis etapas de pré-tratamento como filtração e decantação.

A razão molar entre álcool e óleo também influencia o rendimento. Embora a estequiometria exija apenas três mols de álcool por mol de triglicerídeo, utiliza-se excesso na prática para deslocar o equilíbrio químico em favor da formação de biodiesel (Leung, 2010). A temperatura reacional, geralmente próxima ao ponto de ebulição do álcool, acelera a reação sem comprometer a estabilidade do sistema; tempo de reação e intensidade de agitação completam o conjunto de parâmetros que determinam o contato entre as fases e, por consequência, o rendimento final.

Concluída a reação, obtém-se uma mistura heterogênea, que apresenta duas fases por decantação devido à diferença de densidade entre seus componentes: uma fase superior, rica em biodiesel, e uma fase inferior, rica em glicerina cada uma delas, no entanto, ainda contendo traços residuais da outra. O biodiesel obtido passa então por lavagem e secagem, etapas que removem resíduos de catalisador, álcool, sabões e outras impurezas remanescentes dessa separação inicial. Conversões incompletas, por sua vez, deixam resíduos indesejáveis no combustível, comprometendo propriedades como viscosidade e estabilidade oxidativa.

O controle dos parâmetros operacionais e da qualidade da matéria-prima é, portanto, decisivo para garantir bons rendimentos e um biodiesel adequado à utilização em motores de combustão interna princípio que orienta diretamente os procedimentos experimentais adotados neste trabalho.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER

A caracterização do biodiesel é etapa indispensável para verificar a eficiência da produção e a qualidade do combustível obtido. Entre as técnicas disponíveis, a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) destaca-se pela ampla aplicação na identificação de grupos funcionais em compostos orgânicos (Pavia, 2015).

A técnica baseia-se na interação da radiação infravermelha com as ligações químicas das moléculas: ao serem irradiadas, determinadas ligações absorvem energia em frequências específicas, gerando vibrações características. O resultado é um espectro de absorção que funciona como uma impressão digital química da amostra, permitindo identificar grupos funcionais e alterações estruturais.

Na produção de biodiesel, o FTIR confirma a ocorrência da transesterificação ao registrar as alterações nas bandas espectrais conforme os triglicerídeos se convertem em ésteres (Knothe, 2006). A banda próxima de 1740 cm^{-1}, associada ao estiramento da carbonila (C=O), é a mais característica dos ésteres formados; bandas relacionadas às ligações C–O e C–H complementam essa identificação (Pavia, 2015). Comparando os espectros do óleo residual e do biodiesel produzido, a redução das bandas de triglicerídeos e o surgimento ou intensificação das bandas de ésteres evidenciam a conversão e permitem avaliar qualitativamente a eficiência da reação.

A técnica se destaca ainda pela rapidez, simplicidade operacional e baixa exigência de preparo de amostra vantagens importantes frente a métodos cromatográficos mais complexos, já que o FTIR é não destrutivo e relativamente rápido. Também permite identificar impurezas residuais triglicerídeos não convertidos, água, álcool ou produtos de degradação contribuindo para a avaliação da pureza e estabilidade do biodiesel.

No caso do biodiesel produzido a partir de óleo residual, essa capacidade analítica é particularmente útil: as reações de oxidação, hidrólise e degradação térmica sofridas pela matéria-prima durante a fritura alteram sua composição química e, por consequência, as características do combustível final (Meher, 2006). O FTIR oferece, assim, uma ferramenta eficiente para confirmar a transesterificação e validar a qualidade do biodiesel análise que, neste trabalho, foi conduzida em parceria com o Departamento de Física e Química da UNESP e é apresentada em detalhe no Apêndice A.

2.7 UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL EM MOTORES DE CICLO DIESEL

Os motores de ignição por compressão, ou seja os motores diesel sustentam setores estratégicos da economia, como transporte de cargas, geração de energia e atividades agrícolas, graças à elevada eficiência térmica, robustez operacional e capacidade de operar sob cargas elevadas (Heywood, 2018).

O biodiesel vem sendo estudado como alternativa parcial ou total ao diesel mineral nesses motores justamente por poder ser utilizado sem modificações significativas na infraestrutura existente, o que viabiliza sua inserção gradual na matriz energética (Knothe, 2006). O funcionamento do motor diesel baseado na combustão espontânea do combustível pela compressão do ar na câmara depende diretamente de propriedades como viscosidade, densidade, poder calorífico e índice de cetano, que influenciam o processo de combustão e, por consequência, o desempenho do motor.

Um diferencial do biodiesel é a lubricidade superior à do diesel mineral de baixo teor de enxofre; essa propriedade pode reduzir o desgaste de componentes do sistema de injeção e aumentar sua vida útil de componentes do sistema de injeção e aumentar sua vida útil. Por outro lado, sua utilização também traz desafios: estabilidade oxidativa, comportamento em baixas temperaturas em sistemas de injeção quando usado em proporções elevadas ou com combustível de baixa qualidade. Combustíveis obtidos a partir de óleo residual exigem atenção redobrada nesse ponto, já que tendem a apresentar maior susceptibilidade a impurezas e compostos degradados (Hazrat, 2015).

As propriedades finais do biodiesel produzido a partir de óleo residual variam conforme a matéria-prima e as condições da transesterificação, o que torna os ensaios experimentais em motores diesel indispensáveis para avaliar sua viabilidade técnica em condições reais de operação. Motores monocilíndricos são amplamente utilizados nesse tipo de pesquisa por sua simplicidade operacional, facilidade de controle dos parâmetros e durante os ensaios — características que os tornam adequados para a avaliação de combustíveis alternativos, inclusive em estudos conduzidos com instrumentação limitada. A análise do desempenho do biodiesel nesses motores constitui, portanto, etapa essencial para validar sua aplicação prática e contribuir para o desenvolvimento de alternativas energéticas mais sustentáveis.

3 METODOLOGIA

3.1 VISÃO GERAL DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes da descrição detalhada das etapas experimentais, a Figura 1 apresenta o fluxograma geral do processo adotado para produção, purificação, caracterização e avaliação do biodiesel obtido a partir de óleo vegetal residual.

Figura 1: Fluxograma do processo experimental.



Fonte: Autor (2026).

3.2 COLETA E PRÉ TRATAMENTO DO OLEO USADO

O óleo vegetal residual utilizado neste trabalho foi obtido a partir do restaurante universitário da UNESP Câmpus de Ilha Solteira, responsável pela preparação diária de refeições para a comunidade acadêmica. A escolha dessa fonte de coleta se deu pela geração contínua e significativa de resíduos oleosos provenientes dos processos de fritura realizados no local.

Após a utilização no preparo dos alimentos, o óleo residual foi armazenado em recipientes apropriados e posteriormente encaminhado para utilização neste estudo. A coleta periódica permitiu o aproveitamento de um resíduo que, descartado inadequadamente, pode causar contaminação de corpos hídricos, obstrução de sistemas de esgoto e degradação do solo.

O óleo coletado passou inicialmente por filtração simples, com o objetivo de remover resíduos sólidos provenientes da fritura, como partículas de alimentos carbonizados e demais impurezas suspensas. Essa etapa é importante no pré-tratamento da matéria-prima, já que a presença de sólidos pode comprometer etapas posteriores da produção e interferir na eficiência da transesterificação.

A filtração foi realizada com materiais convencionais, uma peneira e um filtro de pano, permitindo a separação das impurezas sólidas sem alterar significativamente as características do óleo residual.

Após a filtração, o material foi armazenado em recipientes adequados até sua utilização nas etapas seguintes do processo experimental. Além da contribuição ambiental associada ao reaproveitamento do resíduo, a utilização de óleo do restaurante universitário reforça o caráter aplicado do trabalho, integrando gestão de resíduos e produção de biocombustível dentro do próprio ambiente acadêmico.

3.3 TITULAÇÃO

Antes da reação de transesterificação, o óleo vegetal residual foi submetido a um processo de titulação para determinar a quantidade adequada de catalisador necessária à produção do biodiesel. Esse procedimento é especialmente relevante em óleos residuais devido à presença de ácidos graxos livres formados durante a fritura, que podem interferir na eficiência da reação.

Utilizou-se inicialmente uma quantidade fixa de 4 g de hidróxido de sódio (NaOH) por litro de óleo, acrescida de uma quantidade variável determinada por titulação (BIOCOM BIOCOMBUSTÍVEIS, 2008).

O procedimento foi realizado com 1 mL do óleo vegetal residual previamente filtrado, ao qual se adicionaram 9 mL de álcool isopropílico. A mistura foi submetida à agitação em um agitador térmico até obtenção de uma solução homogênea, garantindo a dissolução do óleo no álcool.

Em seguida, adicionaram-se 10 gotas de solução de fenolftaleína a 1% em álcool etílico, utilizada como indicador ácido-base. Após aproximadamente 10 segundos de observação, verificou-se a coloração da mistura. Como o óleo residual utilizado nas quatro sínteses foi proveniente de uma mesma coleta, realizou-se apenas uma titulação, sendo a coloração rosa persistente atingida de forma gradual, por meio da adição de uma solução de hidróxido de sódio diluída em água destilada, na proporção de 1 g de NaOH para 1000 mL de solução, até o aparecimento da coloração rosa persistente, indicando a neutralização dos ácidos graxos livres presentes na amostra.

O volume de solução de NaOH diluída consumido na titulação foi utilizado para corrigir a quantidade de catalisador empregada na transesterificação, considerando que cada mililitro da solução correspondia a 1 g de NaOH por litro de óleo. Foram consumidos 0,5 mL da solução diluída, determinando-se uma correção adicional de 0,5 g de NaOH por litro de óleo, totalizando 4,5 g de NaOH por litro de óleo utilizado na reação (4 g/L referentes à quantidade fixa inicial, somados a 0,5 g/L provenientes da correção determinada pela titulação).

A titulação permitiu ajustar as condições da reação às características do óleo residual empregado, contribuindo para maior eficiência do processo e para a minimização de reações secundárias indesejadas, como a formação de sabões.

3.4 PRODUÇÃO DO BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO

A produção do biodiesel foi realizada por meio de transesterificação alcalina, utilizando óleo vegetal residual como matéria-prima. Inicialmente, preparou-se o metóxido a partir da mistura de metanol e hidróxido de sódio (NaOH), utilizado como catalisador da reação.

O volume de metanol empregado correspondeu a 20% do volume total de óleo utilizado no processo. Para a reação, utilizaram-se 3 litros de óleo vegetal residual previamente filtrado, aos quais foram adicionados 600 mL de metanol, volume correspondente a essa proporção de 20% em relação ao óleo. Considerando a proporção de 4,5 g de catalisador por litro de óleo (conforme determinado na titulação, seção 3.3), foram adicionados 13,5 g de hidróxido de sódio (NaOH) para os 3 litros de óleo utilizados.

A mistura entre metanol e hidróxido de sódio foi feita inicialmente de forma manual. Observou-se, no entanto, que o catalisador não se dissolvia completamente, permanecendo partículas sólidas em suspensão condição que favoreceu a formação visível de sabão durante a reação. Por isso, optou-se posteriormente pelo uso de agitador magnético, o que promoveu maior homogeneização da mistura e melhor dissolução do catalisador no metanol.

Após o preparo do metóxido de sódio, o óleo vegetal residual foi aquecido até temperatura entre 60 °C e 65 °C. Em seguida, o metóxido de sódio foi adicionado ao óleo aquecido, iniciando-se a reação de transesterificação.

A mistura reacional permaneceu sob agitação contínua em agitador magnético durante aproximadamente 45 minutos, mantendo-se a temperatura entre 60 °C e 65 °C ao longo de todo o processo. O controle de temperatura teve como objetivo favorecer a velocidade da reação sem atingir o ponto de ebulição do metanol, contribuindo para maior eficiência da transesterificação. A Figura 2 ilustra todo aparato experimental utilizado.

Figura 2: Montagem completa da reação em andamento.



Fonte: Autor (2026).

Ao término da reação, a mistura obtida foi destinada às etapas subsequentes de separação do biodiesel e da glicerina.

3.5 SEPARAÇÃO DO BIODIESEL E DA GLICERINA

Após a transesterificação, a mistura obtida foi transferida para funis de separação, com o objetivo de promover a separação entre as fases formadas durante o processo reacional. O uso dos funis permitiu maior controle sobre a separação entre biodiesel e glicerina.

A mistura permaneceu em decantação por um período mínimo de 24 horas, separando-se por diferença de densidade entre os compostos formados. Observou-se, ao final desse período, a formação de duas fases distintas: uma fase superior correspondente ao biodiesel e uma fase inferior composta majoritariamente por glicerina, além de resíduos de catalisador, metanol e impurezas da reação.

Em razão da disponibilidade limitada de equipamentos, foram utilizados dois funis de separação com capacidade de 500 mL cada, possibilitando a separação de aproximadamente 1 litro de mistura por ciclo de decantação. O processo completo de separação do material produzido ocorreu, assim, de forma gradual, conforme a disponibilidade dos recipientes utilizados.

Após a completa separação das fases, a glicerina foi removida pela parte inferior do funil, permanecendo apenas a fração correspondente ao biodiesel produzido.

A etapa de separação tem papel importante na obtenção do biodiesel: resíduos de glicerina e catalisador podem comprometer propriedades físico-químicas do combustível e interferir em análises e ensaios posteriores.

3.6 LAVAGEM E SECAGEM DO BIODIESEL

Após a separação entre biodiesel e glicerina, o biodiesel obtido foi submetido a lavagem, com o objetivo de remover impurezas residuais provenientes da transesterificação, como excesso de catalisador, traços de metanol, resíduos de sabão e glicerina remanescente.

A lavagem foi realizada com água destilada na proporção de 10% em relação ao volume de biodiesel obtido. A água destilada foi adicionada ao biodiesel e a mistura foi submetida a agitação mecânica manual, promovendo maior contato entre as fases e favorecendo a transferência das impurezas para a fase aquosa.

A mistura foi então transferida novamente para funis de separação, permanecendo em repouso até a decantação das fases água-biodiesel. Após a separação, a fase aquosa contendo as impurezas removidas foi retirada pela parte inferior do funil.

O procedimento de lavagem foi repetido cinco vezes, visando maior purificação do biodiesel produzido. Observou-se empiricamente que tanto o biodiesel não lavado quanto a água destilada apresentavam melhor desempenho no processo quando previamente aquecidos a aproximadamente 60 °C, condição que favoreceu a separação e contribuiu para maior eficiência na remoção de impurezas.

Antes da adoção desse procedimento, verificou-se que o primeiro lote produzido apresentava aspecto turvo após a secagem, indicando possível presença residual de água ou impurezas no combustível obtido. A partir dessa observação, o aquecimento prévio das fases passou a ser adotado nas lavagens subsequentes, resultando em melhor aspecto visual e maior homogeneidade do biodiesel produzido.

Após as lavagens, o biodiesel foi seco por aquecimento acima da temperatura de ebulição da água, mantendo-se o combustível em aproximadamente 110 °C sob agitação, com a finalidade de promover a evaporação da água residual.

A secagem tem papel relevante na produção do biodiesel: a presença de água residual pode comprometer propriedades físico-químicas do combustível e interferir nos ensaios posteriores de caracterização e desempenho em motor diesel.

3.7 CARACTERIZAÇÃO POR ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A caracterização química das amostras produzidas foi realizada por meio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier *(Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FTIR)*, com o objetivo de identificar os principais grupos funcionais presentes no biodiesel obtido e na fase glicerinosa resultante da transesterificação.

As análises foram realizadas no espectrômetro ALPHA II FTIR-ATR (Bruker) pelo Prof. Dr. Devaney Ribeiro do Carmo, docente do Departamento de Física e Química da UNESP, a quem foram enviadas duas amostras uma de biodiesel e uma da fase glicerinosa produzidas neste trabalho. Utilizou-se um espectrômetro modelo

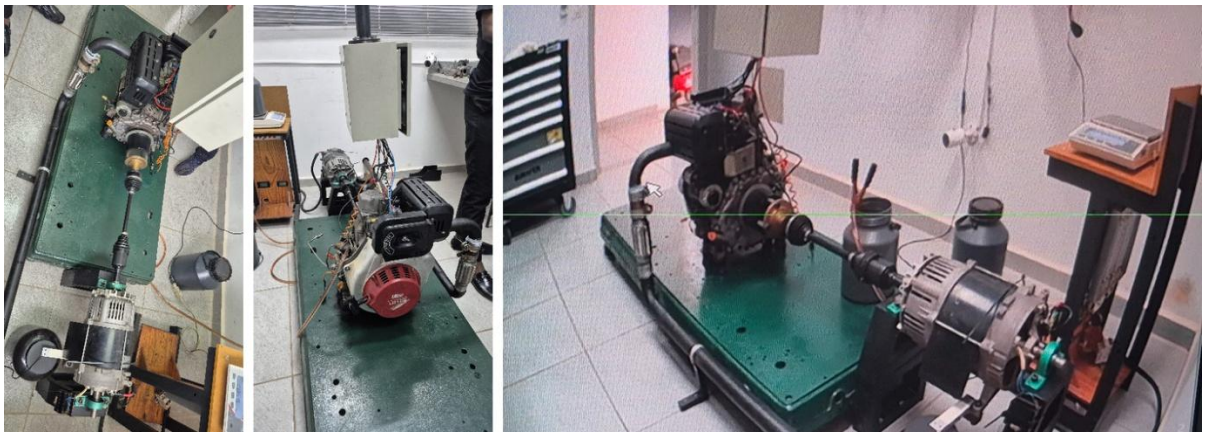
ALPHA II FTIR-ATR, fabricado pela Bruker, operando na região espectral entre 4000 e 400 cm^{-1}, com 30 varreduras por amostra e resolução espectral de ±4 cm^{-1}.

Os resultados obtidos por FTIR, incluindo metodologia de execução e interpretação dos espectros, são apresentados de forma detalhada no Apendice A, e foram utilizados para auxiliar na verificação da ocorrência da reação de transesterificação e na avaliação qualitativa dos produtos formados durante o processo.

3.8 ENSAIOS EM MOTOR DIESEL

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do biodiesel produzido em motores de ignição por compressão, foram realizados ensaios experimentais em um motor diesel monocilíndrico Toyama TDE110XP, de quatro tempos, potência nominal de 10,5 HP e cilindrada de 418 cm^3, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Montagem da bancada experimental para os ensaios utilizando o motor ciclo Diesel.



Fonte: Autor (2026).

O motor foi acoplado a um gerador elétrico conectado a um sistema de cargas resistivas formado por lâmpadas incandescentes de 1000 W cada (Figura 4). A carga aplicada foi variada pelo acionamento de duas ou três lâmpadas, correspondendo a potências elétricas nominais de aproximadamente 2000W e 3000W, respectivamente.

Figura 4: Banco de lâmpadas utilizadas como carga para o experimento.



Fonte: Autor (2026).

A rotação do motor foi mantida em aproximadamente 1900 rpm durante todos os ensaios. Foram conduzidos quatro ensaios de 10 minutos cada, conforme as condições apresentadas na Tabela 1, sendo dois utilizando diesel comercial B15 como combustível de referência, e dois utilizando o biodiesel (B100) produzido neste trabalho, cada combustível testado sob carga de 2000W e 3000W. a Tabela 1 demonstra como os ensaios foram estruturados.

Tabela 1: Condições experimentais dos ensaios realizados.

Ensaio	Combustível	Carga aplicada
1	Diesel B15	2 lâmpadas (2000 W)
2	Diesel B15	3 lâmpadas (3000 W)
3	Biodiesel B100	2 lâmpadas (2000 W)
4	Biodiesel B100	3 lâmpadas (3000 W)

Fonte: Autor (2026).

Ao longo dos testes, monitoraram-se a temperatura do ar de admissão, a temperatura dos gases de exaustão e o consumo de combustível. O consumo foi determinado pela diferença entre a massa inicial e a massa final do combustível no

reservatório ao término de cada ensaio, medida por meio de balança digital como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Balança digital e reservatório de combustível.



Fonte: Autor (2026).

Em razão de limitações na instrumentação disponível, não foi possível mensurar o torque e a potência efetiva do motor durante os ensaios, o que restringiu a análise a parâmetros de consumo e temperatura. Essa limitação é retomada na seção de Resultados, onde se discute seu impacto sobre o tipo de avaliação possível quanto ao desempenho comparativo entre os combustíveis.

4 RESULTADOS

4.1 PRODUÇÃO DO BIODIESEL

Foram realizadas quatro sínteses de biodiesel utilizando óleo vegetal residual do restaurante universitário como matéria-prima. A primeira foi conduzida em escala reduzida, com 500 mL de óleo, com o objetivo de verificar a viabilidade do processo e validar os procedimentos experimentais adotados em laboratório. As demais sínteses foram realizadas com 3L de óleo residual. A Tabela 2 apresenta as principais condições experimentais e os rendimentos obtidos em cada síntese.

Tabela 2: Condições experimentais e rendimentos das sínteses realizadas.

Síntese	Volume de óleo (L)	Tempo de reação (min)	Rendimento (%)
1	0,5	60	80
2	3	60	72
3	3	90	76
4	3	60	88

Fonte: Autor (2026).

A primeira síntese apresentou rendimento de aproximadamente 80%, o que já indicava a viabilidade da produção de biodiesel a partir do óleo vegetal residual utilizado. Além de validar o procedimento, essa etapa permitiu identificar aspectos operacionais relevantes para as sínteses seguintes, como mostra a Figura 6.

Figura 6: Biodiesel obtido na síntese preliminar.



Fonte: Autor (2026).

Na segunda síntese, observou-se formação significativa de sabão durante a transesterificação, atribuída à dissolução incompleta do hidróxido de sódio no metanol durante o preparo do metóxido o que resultou em uma mistura heterogênea e comprometeu a eficiência da reação. Essa foi a condição de menor rendimento entre

todas as avaliadas, atingindo cerca de 72%. A figura 7 ilustra o aspecto visual da segunda síntese durante o processo de lavagem.

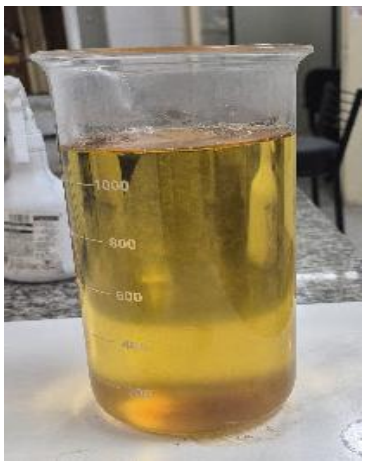
Figura 7: Aspecto visual da separação das fases na segunda síntese.



Fonte: Autor (2026).

Na terceira síntese, o tempo de reação foi ampliado para aproximadamente 90 minutos contra os 60 minutos adotados nas demais. A separação entre biodiesel e fase glicerinosa ocorreu de forma satisfatória, indicando que a transesterificação havia se efetivado. Após a secagem, no entanto, o biodiesel apresentou aspecto turvo (Figura 8), sugerindo presença residual de água ou impurezas remanescentes das etapas de lavagem.

Figura 8: Biodiesel obtido após a terceira síntese.



Fonte: Autor (2026).

Diante dessa condição, realizou-se uma etapa complementar de secagem térmica, que removeu a umidade residual e melhorou significativamente o aspecto visual do combustível (Figura 9) no béquer à esquerda, o biodiesel turvo obtido após a primeira lavagem e secagem; no béquer à direita, o resultado translúcido obtido após o processo complementar. O rendimento da terceira síntese foi de aproximadamente 76%.

Figura 9: Comparação de aparência entre biodiesel comum e o turvo.



Fonte: Autor (2026).

A quarta síntese foi conduzida após os ajustes identificados nas etapas anteriores, especialmente quanto à preparação do metóxido e ao controle das etapas de lavagem e secagem. A Figura 10 ilustra a aparência do metóxido obtido nessa condição.

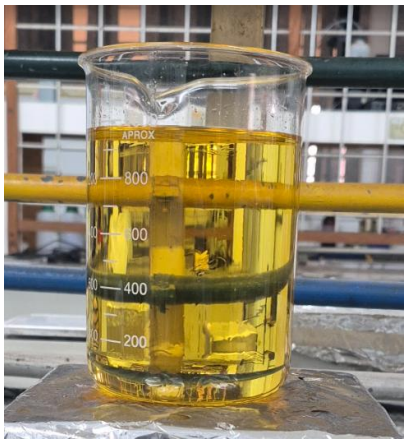
Figura 10: Metóxido preparado para o processo de transesterificação.



Fonte: Autor (2026).

Essa síntese apresentou o melhor resultado experimental do trabalho, com rendimento de aproximadamente 88%. Além do maior rendimento, o biodiesel produzido apresentou aspecto translúcido e coloração homogênea características desejáveis para o combustível obtido, evidenciadas na Figura 11.

Figura 11: Biodiesel obtido após a otimização das etapas de produção, lavagem e secagem.



Fonte: Autor (2026).

A evolução entre as sínteses evidencia a influência das condições operacionais sobre o rendimento e a qualidade do biodiesel. A preparação adequada do metóxido foi fundamental para evitar a formação de sabão e maximizar a conversão em ésteres metílicos; lavagem e secagem tiveram papel igualmente importante no aspecto visual do combustível.

Vale notar que o tempo de reação mais longo (90 min) adotado na terceira síntese não resultou em rendimento superior ao obtido na quarta síntese (60 min, 88%). Esse resultado sugere que, nas condições adotadas, 60 min já foram suficientes para a transesterificação, embora a diferença de rendimento também possa estar associada a outros fatores, como a dissolução do catalisador e a secagem, já discutidos. Essa hipótese é retomada no Apêndice A, a partir dos resultados de FTIR.

4.2 OBTENÇÃO DA GLICERINA

Durante a transesterificação, observou-se a formação de duas fases distintas após o período de decantação: uma fase superior, composta predominantemente por

biodiesel, e uma fase inferior, correspondente à fase glicerinosa formada principalmente por glicerina, álcool residual, catalisador e traços de impurezas provenientes da reação.

A separação ocorreu por diferença de densidade em funis, com repouso mínimo de 24 horas. A formação visível da fase glicerinosa já evidencia a ocorrência da transesterificação, principal subproduto da conversão dos triglicerídeos em ésteres metílicos. A Figura 12 ilustra o momento da separação, ja a Figura 13, a fase glicerinosa isolada

Figura 12: Glicerina e biodiesel presentes no funil de separação.



Fonte: Autor (2026).

Figura 13: Fase glicerinosa.



Fonte: Autor (2026).

4.3 AVALIAÇÃO DO BIODIESEL NO MOTOR DIESEL

Com o objetivo de avaliar preliminarmente a aplicabilidade do biodiesel produzido em motores de ignição por compressão, foram realizados ensaios utilizando o motor diesel monocilíndrico Toyama TDE110XP. Os testes foram conduzidos sob duas condições de carga elétrica, mantendo-se a rotação do motor próxima do valor de 1900 rpm durante todo o período experimental. Avaliaram-se o consumo de combustível e a temperatura dos gases de exaustão, parâmetros que permitiram analisar o comportamento operacional do motor alimentado com diesel comercial e com biodiesel puro (Tabela 3).

Tabela 3: Resultados obtidos através dos ensaios no motor diesel.

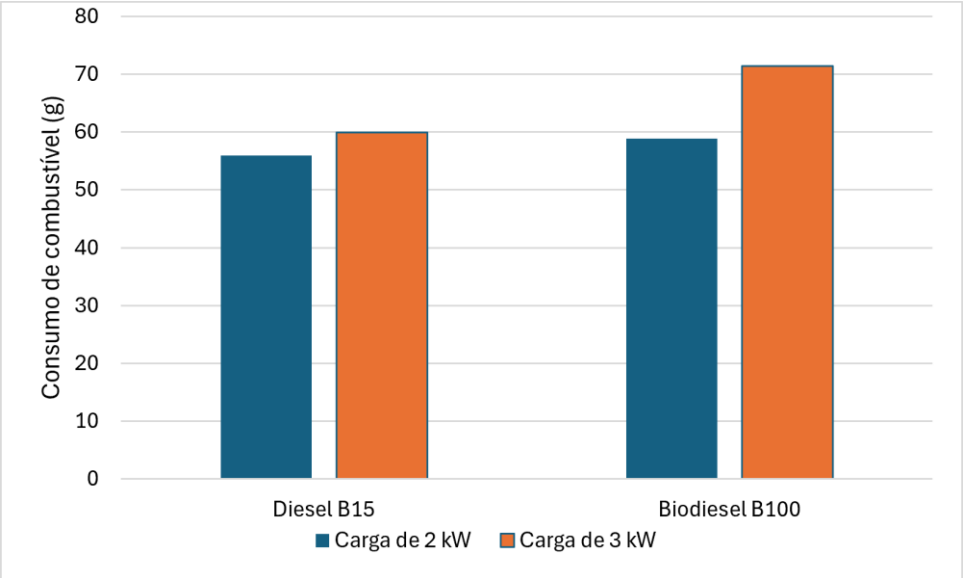
Combustível	Nº de lâmpada	Temp. ambiente (°C)	Temp. exaustão (°C)	Rotação (rpm)	Consumo (g)
Diesel B15	2	30	108	1900	55,95
Diesel B15	3	33	133	1900	59,90
Biodiesel B100	2	32	110	1900	58,83
Biodiesel B100	3	34	134	1900	71,39

Fonte: Autor (2026)

Observou-se aumento do consumo de combustível com a elevação da carga para os dois combustíveis avaliados, no diesel comercial, o consumo não teve grande aumento, foi de 55,95 g para 59,90 g; no biodiesel, de 58,83 g para 71,39 g.

Na condição de duas lâmpadas, o biodiesel apresentou consumo aproximadamente 5,1% superior ao diesel comercial; na condição de três lâmpadas, essa diferença subiu para cerca de 19,2%, a Figura 14, ilustra os resultados obtidos.

Figura 14: Gráfico comparativo entre diesel comercial e biodiesel obtido em laboratório.



Fonte: Autor (2026).

Esse comportamento é coerente com o menor poder calorífico do biodiesel em relação ao diesel mineral, característica amplamente reportada na literatura (Demirbas, 2009) para fornecer uma quantidade equivalente de energia ao motor, é necessária uma massa maior de combustível.

As temperaturas dos gases de exaustão, por sua vez, ficaram bastante próximas entre os dois combustíveis: 108 °C (diesel) e 110 °C (biodiesel) na condição de duas lâmpadas; 133 °C e 134 °C respectivamente na condição de três lâmpadas.

Essa proximidade sugere que o biodiesel produzido teve comportamento térmico semelhante ao do diesel comercial nas condições avaliadas, resultado que, somado ao funcionamento estável do motor ao longo de todos os ensaios, indica que o processo de produção foi conduzido de forma satisfatória, resultando em um combustível capaz de operar o motor sem alterações expressivas na temperatura de exaustão.

Cabe ressaltar duas limitações importantes na interpretação desses resultados. Primeiro, não havia, durante os ensaios, instrumentação disponível para medição de torque, potência efetiva ou consumo de combustível, o que impede a quantificação da eficiência térmica real do motor com cada combustível, os dados aqui apresentados permitem comparar consumo em massa e comportamento térmico, mas não eficiência energética. Segundo cada condição experimental foi avaliada em um

único ensaio de 10 minutos, sem repetições de 10 minutos, sem repetições; os valores apresentados, portanto, devem ser interpretados como indicativos de tendência, e não como médias estatisticamente validadas.

Diante dessas limitações, os resultados aqui apresentados devem ser entendidos como uma avaliação preliminar do comportamento operacional do biodiesel produzido, baseada no consumo de combustível e na temperatura dos gases de exaustão. Ainda assim, é um resultado relevante: o biodiesel produzido a partir de óleo vegetal residual operou o motor de forma estável em todos os ensaios, sem falhas de funcionamento, interrupções de combustão ou dificuldades de partida o que indica potencial de utilização em motores diesel nas condições avaliadas.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como propósito avaliar a viabilidade de produção de biodiesel a partir de óleo vegetal residual e verificar sua aplicabilidade em um motor de ignição por compressão, associando o aproveitamento de um resíduo poluente à obtenção de um combustível renovável. Os resultados obtidos permitem responder a essa proposta em duas frentes complementares: a da produção e a da aplicação prática do combustível.

Quanto à produção, os resultados confirmam que o óleo vegetal residual é uma matéria-prima viável para a obtenção de biodiesel por transesterificação alcalina. As quatro sínteses realizadas não apenas validaram essa viabilidade, mas documentaram um processo real de refinamento experimental: a formação de sabão nas primeiras tentativas, associada à dissolução incompleta do catalisador, e a turbidez decorrente de secagem insuficiente foram problemas identificados e corrigidos ao longo do trabalho, culminando em um rendimento de 88% na síntese final frente aos 72% da condição menos favorável. Essa evolução é, em si, um resultado relevante: mostra que o controle de variáveis simples, como a homogeneização do metóxido e o aquecimento das fases durante a lavagem, tem impacto direto e mensurável sobre a qualidade do biodiesel obtido a partir de um resíduo heterogêneo como o óleo de fritura usado.

Quanto à aplicação prática, os ensaios em motor diesel monocilíndrico demonstraram que o biodiesel produzido operou o equipamento de forma estável em todas as condições testadas, sem falhas de combustão, interrupções ou dificuldades

de partida, mantendo rotação constante próxima de 1900 rpm. As temperaturas de exaustão registradas foram equivalentes às do diesel comercial B15, o que indica comportamento térmico semelhante entre os dois combustíveis nas condições avaliadas. O aumento no consumo específico de massa observado com o biodiesel mais acentuado sob maior carga, é coerente com seu menor poder calorífico em relação ao diesel mineral, fenômeno já documentado na literatura, e não representa uma falha do combustível, mas uma característica esperada de combustíveis oxigenados desse tipo.

É importante demarcar o que esses ensaios permitem afirmar e o que está fora de seu alcance. A ausência de instrumentação para medição de torque e potência efetiva impediu o cálculo de consumo específico energético e de eficiência térmica comparada parâmetros que exigiriam uma bancada dinamométrica não disponível neste estudo. Porém, essa limitação não compromete a validade da conclusão central sobre compatibilidade operacional, o objetivo aqui não era otimizar ou quantificar a eficiência energética do biodiesel em relação ao diesel, mas verificar se um combustível produzido em escala laboratorial, com controle manual das etapas do processo e sem os sistemas automatizados de controle de qualidade típicos da produção industrial, seria capaz de operar um motor diesel sem comprometer seu funcionamento. Essa pergunta foi respondida de forma afirmativa e consistente ao longo de quatro ensaios distintos.

Essa distinção é relevante porque a discussão sobre combustíveis alternativos frequentemente se concentra exclusivamente em métricas de desempenho energético, deixando em segundo plano outros fatores que justificam sua adoção. A dependência brasileira do diesel sustentada por um setor de transporte majoritariamente rodoviário e por uma agropecuária intensiva em maquinário convive com a vulnerabilidade inerente a um recurso finito e a um mercado internacional sujeito a oscilações geopolíticas. Nesse cenário, o biodiesel produzido a partir de resíduos não compete com o diesel fóssil apenas pela eficiência por grama de combustível, mas pela combinação de três fatores que a eficiência isolada não captura: a destinação adequada de um passivo ambiental antes descartado de forma inadequada, a redução parcial da dependência de um recurso não renovável, e a viabilidade técnica comprovada nos ensaios aqui relatados.

Diante do exposto, conclui-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados: demonstrou-se a viabilidade de produção de biodiesel a partir de óleo vegetal residual

com rendimento crescente e qualidade adequada, e verificou-se sua compatibilidade operacional em motor diesel real, sem falhas de funcionamento aparentes no pequeno espaço de tempo em que os resultados foram coletados e isso confirma a eficiência do biodiesel produzido no sentido operacional estabelecido neste trabalho. As limitações relativas à medição de torque e potência impedem, contudo, a quantificação da eficiência energética em sentido termodinâmico, distinção que aponta diretamente para a principal recomendação deste trabalho, que estudos futuros disponham de instrumentação para medição de torque e potência efetiva, permitindo o cálculo do consumo específico de combustível e da eficiência térmica comparada entre o biodiesel produzido e o diesel comercial, complementando os resultados aqui obtidos.

6 BIBLIOGRAFIA

ABIOVE. **Complexo Soja: 2024 fecha com recordes e 2025 mantém perspectiva de crescimento**. [S.l.]: Abiove, 2025. Disponível em: https://abiove.org.br/complexo-soja-2024-fecha-com-recordes-e-2025-mantem-perspectiva-de-crescimento/. Acesso em: 10 jul. 2026.

ABIOVE. **Estatísticas do setor de óleos vegetais**. [S.l.]: Abiove, 2026. Disponível em: https://abiove.org.br/estatisticas/. Acesso em: 10 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Produção e fornecimento de biocombustíveis**. Brasília: ANP, 2026. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis. Acesso em: 10 jul. 2026.

BIOCOM BIOCOMBUSTÍVEIS. **Manual de operação do reator BIOCOM 100**. Campo Grande: Biocom Biocombustíveis, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Boletim estatístico CNT**. Brasília: CNT, 2022.

COSTA, Ligia Maria Manzine. [S.l.: s.n.], 2026.

CUELLAR, I. C. C. et al. An interference free absorption in the mid-infrared to follow the obtaining of biodiesel by transesterification of waste frying oils. **Momento**, [S.l.], 2023.

DANIYAN, I. et al. Gas chromatography and Fourier transform infrared analysis of biodiesel from used and unused palm olein oil. **International Journal of Engineering Research in Africa**, [S.l.], p. 47-64, 2019.

DEMIRBAS, Ayhan. **Securing the planet's future energy needs**. London: Springer, 2009.

HAZRAT, M. A.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K. Lubricity improvement of the ultra-low sulfur diesel fuel with the biodiesel. **Energy Procedia**, [S.l.], 2015.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World energy outlook 2023**. Paris: IEA, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2021: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KACHEL-JAKUBOWSKA, M. et al. Analysis of the physicochemical properties of post-manufacturing waste derived from production of methyl esters from rapeseed oil. **International Agrophysics**, [S.l.], p. 175-182, 2017.

KNOTHE, Gerhard; VAN GERPEN, Jon; KRAHL, Jürgen. **The biodiesel handbook**. Champaign: AOCS Press, 2006.

LEUNG, D. Y. C.; WU, Xuan; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, [S.l.], 2010.

MEHER, L. C.; SAGAR, D. Vidya; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PAVIA, Donald L.; LAMPMAN, Gary M.; KRIZ, George S.; VYVYAN, James R. **Introduction to spectroscopy**. Boston: Cengage Learning, 2015.

SABESP. **Campanha de saneamento básico de São Paulo: água e óleo não se misturam**. São Paulo: Sabesp, 2026. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/assets/images/folhetos/sabesp-agua-oleo-nao-se-misturam.pdf. Acesso em: 10 jul. 2026.

UOL. Por que fechamento do Estreito de Ormuz mexe com preço do petróleo mundial? **UOL Economia**, São Paulo, 1 mar. 2026. Disponível em: https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2026/03/01/fechamento-do-estreito-de-ormuz-trava-rota-de-petroleo-e-pressiona-precos.htm. Acesso em: 28 jun. 2026.

WUST, Elisiane. **Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos**. 2004. Dissertação (Mestrado) – [instituição não identificada], Blumenau, 2004.

ZAGONEL, Giuliano F.; COSTA NETO, Pedro R.; ROSSI, Luciano F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. [S.l.: s.n.], 2000.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DO BIODIESEL E DA GLICERINA POR FTIR

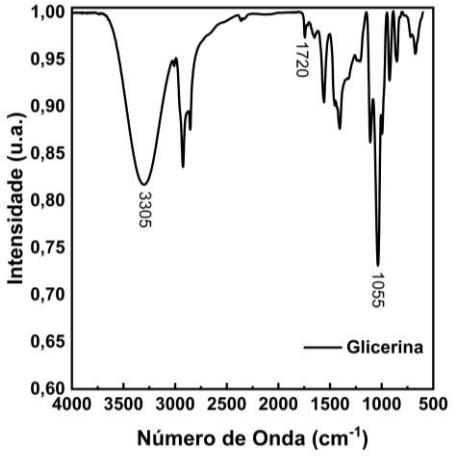
A.1 – METODOLOGIA

As amostras foram caracterizadas por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), a fim de analisar a composição química do biodiesel e da fase glicerinosa obtidos. As análises espectroscópicas foram conduzidas pelo Prof. Dr. Devaney Ribeiro do Carmo, docente do Departamento de Física e Química da UNESP, utilizando o espectrômetro ALPHA II FTIR-ATR (Bruker), com aquisição de espectros na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1}. Cada espectro foi obtido a partir de 30 varreduras, com resolução espectral de ±4 cm^{-1}. O tratamento dos dados, a geração dos gráficos e a interpretação dos resultados foram realizados pela orientadora deste trabalho, Profa. Dra. Ligia Maria Manzine Costa.

A.2 – RESULTADOS: FASE GLICERINOSA

O espectro de infravermelho referente à amostra de glicerina pode ser observado na Figura A.1, na qual são evidenciadas as principais bandas de absorção associadas aos grupos funcionais presentes no material analisado.

Figura A.1: Espectro de FTIR da amostra de glicerina obtida na síntese



Fonte: Costa (2026)

Observou-se, em aproximadamente 1720 cm^{-1}, uma banda atribuída ao grupo carbonila (C=O), presente apenas em amostras de glicerina que ainda não passaram por processos de destilação e purificação. Essa banda apresentou baixa intensidade, sugerindo a presença de pequena quantidade de impurezas na amostra, possivelmente relacionadas a resíduos de metanol, água ou outros subprodutos do processo (Kachel-Jakubowska *et al.*, 2017).

As vibrações observadas na região de 3000–3600 cm^{-1}, com máximo em aproximadamente 3300 cm^{-1}, identificadas em todas as amostras analisadas, foram atribuídas predominantemente ao estiramento dos grupos hidroxila (–OH), presentes tanto em moléculas de água quanto de glicerina. A presença dessas bandas indica baixo teor de H_2O nos materiais analisados o que segundo, (Kachel-Jakubowska *et al.*, 2017), pode estar associado a um menor nível de purificação do material.

Foram identificadas ainda três bandas na região entre 1000 e 830 cm^{-1}, características das vibrações de estiramento C–C e –OH nas moléculas de glicerina, bem como das vibrações simétricas do grupo C–O–C. A Tabela A.1 apresenta a posição dos máximos das bandas de absorção identificadas, em comparação com valores de referência para glicerina farmacêutica purificada.

Tabela A.1: Posição dos máximos das bandas de absorção atribuídas às vibrações correspondentes, para glicerina farmacêutica (purificada) e glicerina obtida na reação

Glicerina farmacêutica	Glicerina obtida	Tipo e origem das vibrações
3282 fraca	3305	v(O–H) em H_2O ou na glicerina
2928	2921	CH_2 simétrica e assimétrica; CH_3 simétrica e assimétrica; grupo alifático de triglicerídeos
2873	2869	CH_2/CH_3, vibrações alifáticas
—	1720	Grupo C=O de éster
—	—	v(C=C)
1457	1459	Deformação de –C–H em CH_2
1408	1408	Deformação de =C–H cis
1323	1323	δ(CH)
1237	1231	Estiramento C–O ou –O–CH_2–C
1209	1201	v(C–O) no grupo éster
1107	1109	v(C–C) + v(C–O–C) assimétrica
—	—	δ(CH) + v(C–C)
1026	1055	δ(CH) + v(C–C)
988	988	v(C–C)
920	918	–OH na glicerina
844	847	v(C–O–C) simétrica
817	816	v(C–O–C) simétrica ou v(C–C) simétrica
—	770	v(C–C) + v(C=C)
674	670	Balanço/rocking de –CH_2–

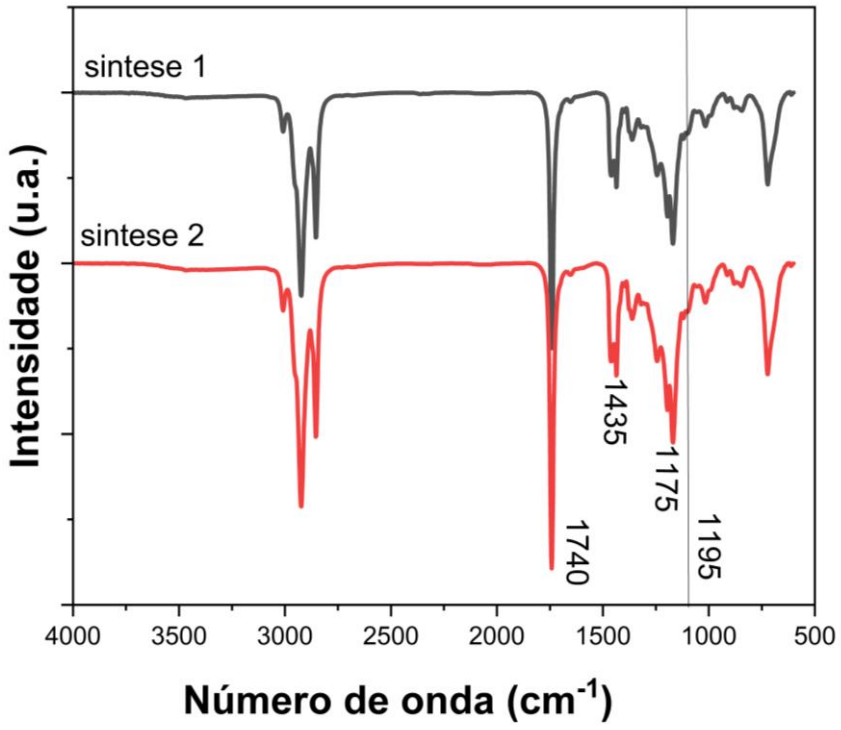
Legenda: v = vibrações de estiramento; δ = vibrações de deformação; s = simétrica; as = assimétrica; forte = banda intensa; fraca = banda de baixa intensidade; média = banda de intensidade intermediária.

Fonte: Costa (2026)

A.3 – RESULTADOS: BIODIESEL

A caracterização por FTIR permite identificar alterações estruturais associadas à conversão do óleo de fritura usado em biodiesel, especialmente pela presença de bandas relacionadas à formação de ésteres metílicos (Daniyan *et al.*, 2019). Para esta análise, foram avaliadas duas sínteses, uma conduzida com 60 minutos de reação (síntese 1) e outra com 90 minutos (síntese 2), conforme apresentado na Figura A.2.

Figura A.2: Espectro de FTIR das amostras de biodiesel, produzidas com 60 minutos (síntese 1) e 90 minutos (síntese 2)



Fonte: Costa (2026)

O biodiesel obtido a partir do óleo de fritura usado apresentou bandas intensas atribuídas ao estiramento do grupo carbonila (C=O), característico de ésteres metílicos, bem como bandas associadas aos grupos O–CH_3. A presença dessas bandas indica a formação de ésteres metílicos de ácidos graxos, confirmando a ocorrência da reação de transesterificação (Daniyan *et al.*, 2019; Cuellar *et al.*, 2023).

De acordo com a literatura, bandas próximas a 1195 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento do grupo (CO)–OCH_3, sendo utilizadas como marcador espectroscópico

característico da presença de biodiesel em sistemas obtidos a partir de óleo de fritura usado. Embora os espectros do óleo residual e do biodiesel apresentem semelhanças gerais, observam-se alterações relevantes na região entre aproximadamente 1000 e 1500 cm^{-1}: o surgimento de novas bandas associadas ao grupo CH_3–O, bem como o deslocamento das vibrações C–O, evidencia a conversão dos triglicerídeos em ésteres metílicos característica fundamental do biodiesel (Daniyan *et al.*, 2019; Cuellar *et al.*, 2023).

Estudos descritos na literatura indicam que, em amostras da fase orgânica coletadas entre 0 e 60 minutos de reação durante a transesterificação alcalina de óleo de fritura usado, a banda em aproximadamente 1195 cm^{-1} aparece apenas na presença de biodiesel, tendendo a apresentar aumento progressivo de intensidade ao longo do tempo reacional o que permite o acompanhamento qualitativo ou semiquantitativo da formação dos ésteres metílicos durante a reação (Daniyan *et al.*, 2019; Cuellar *et al.*, 2023).

Nas sínteses avaliadas neste trabalho, ao comparar os espectros das condições de 60 e 90 minutos de reação, não foram observadas variações significativas na intensidade da banda em aproximadamente 1195 cm^{-1} entre as duas sínteses. Esse resultado sugere que, nas condições experimentais empregadas, o aumento do tempo reacional de 60 para 90 minutos não promoveu alteração detectável nessa região espectral associada à formação de biodiesel achado que corrobora a observação de rendimentos semelhantes entre essas duas condições, relatada no capítulo de Resultados. A Tabela A.2 resume as principais bandas identificadas no biodiesel produzido.

Tabela A.2- Número de onda das bandas características do biodiesel: valores teóricos (segundo a literatura) e observados na síntese

Região teórica (cm^{-1})	**Região observada na sintese (cm^{-1})**	**Interpretação do biodiesel a partir de óleo usado**
1740–1750	1740	Estiramento C=O do éster
1190–1200	1175	Estiramento (CO)–OCH_3, marcador de éster metílico
1435–1460	1435	Vibrações assimétricas de CH_3 (ésteres)

Fonte: Costa (2026)