



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



LUCAS VINICIUS BORGES PEREIRA

**ESTUDO DO PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO E
DO TRATAMENTO COM ÁGUA QUENTE DA PALHA
E DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR VISANDO A
PRODUÇÃO DE ETANOL**

Orientadora:

Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

Coorientadora:

Profa. Dra. Joelda Dantas

João Pessoa - PB
Fevereiro/2026

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO

LUCAS VINICIUS BORGES PEREIRA

**ESTUDO DO PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO E DO TRATAMENTO COM
ÁGUA QUENTE DA PALHA E DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR VISANDO A
PRODUÇÃO DE ETANOL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador(a): Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

Coorientador(a): Profa. Dra. Joelda Dantas

**João Pessoa - PB
Fevereiro/2026**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P436e Pereira, Lucas Vinicius Borges.

Estudo do pré-tratamento hidrotérmico e do tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar visando a produção de etanol / Lucas Vinicius Borges Pereira. - João Pessoa, 2026.
91 f. : il.

Orientação: Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes.
Coorientação: Joelda Dantas.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Produção de etanol - Cana-de-Açúcar. 2. Reaproveitamento de resíduos. 3. Sustentabilidade energética. 4. Biomassa lignocelulósica. 5. Etanol de segunda geração. 6. Açúcares redutores. I. Fernandes, Pollyana Caetano Ribeiro. II. Dantas, Joelda. III. Título.

UFPB/BC

CDU 661.722:633.61(043)

Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis – PPGER

**ESTUDO DO PRÉ-TRATAMENTO HIDROTÉRMICO E DO
TRATAMENTO COM ÁGUA QUENTE DA PALHA E DO BAGAÇO
DE CANA-DE-AÇÚCAR VISANDO A PRODUÇÃO DE ETANOL**
por

LUCAS VINICIUS BORGES PEREIRA

Dissertação aprovada em 24 de fevereiro de 2026


Prof.^(a). Dr.(a). POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES
Orientador(a) - UFPB


Prof.^(a). Dr.(a). JOELDA DANTAS
Coorientador(a)- UFCG


Prof.^(a). Dr.(a). ROGÉRIO SANTANA PERUCHI
Examinador(a) Interno(a) - UFPB


Prof.^(a). Dr.(a). MÁRТА MARIA DA CONCEIÇÃO
Examinador(a) Externo(a) - UFPB


Prof.^(a). Dr.(a). ELVIA LÉAL
Examinador(a) Externo(a) - UFCG

*João Pessoa – PB
2026*

À minha mãe e minha avó, aqui e lá. Vocês
sempre serão meu lar. Tudo que sou hoje devo
a vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me sustentado em todos os momentos, sem Ele eu não seria nada. Deus na frente de tudo, SEMPRE!

Agradeço à minha família, especialmente à minha mãe e à minha avó, Ana Paula e Nilcelia Borges, que foram meu socorro em inúmeros momentos. Serei eternamente grato a vocês. Agradeço também às minhas amigas/irmãs, Alderlange e Luciana, que depositaram sua fé em mim e foram meu conforto como uma segunda família. Vocês acreditaram em mim e me ajudaram a voltar à universidade em busca dos meus sonhos. Meu coração sempre estará com vocês. A minha amiga e irmã, Ádyla Cavalcanti, por todo socorro durante os momentos que mais precisei para finalização dessa dissertação. Você foi a peça fundamental para que esse sonho se tornasse realidade.

Agradeço às minhas orientadoras, Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes e Profa. Dra. Joelda Dantas, por me guiarem nessa caminhada do mestrado. Sou grato por toda a paciência, atenção, compreensão e pelos conselhos que levarei por toda a vida. Uma parte de vocês forma o profissional que estou me tornando.

Agradeço à Usina Monte Alegre por cederem o material para o estudo.

Agradeço ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Materiais Cerâmicos (LabSMaC), pertencente a Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da UFCG, pelo apoio em caracterizações importantes que ajudaram na construção desta dissertação.

Agradeço a toda a equipe que compõe o Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMaQ) – UFPB, do Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Vocês foram essenciais na construção desta dissertação. Obrigado!

Agradeço ao Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) - UFPB pelo suporte na realização de análises fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ). Obrigado!

Agradeço ao PPGER da Universidade Federal da Paraíba por me proporcionar todo o conhecimento acadêmico, bem como aos técnicos dos laboratórios por todo o auxílio durante os experimentos desta dissertação.

A concretização deste trabalho é um lembrete físico de que Deus age no momento certo para cumprir seus propósitos. A vontade d'ELE é boa, perfeita e agradável. Por fim, a educação segue cumprindo seu papel transformador, derrubando muralhas e alcançando os corações que anseiam por conhecimento. Obrigado!

RESUMO

Alternativas renováveis estão sendo cada vez mais discutidas com o objetivo de ampliar a diversidade de matérias-primas sustentáveis para o setor de biocombustíveis, promovendo a transição para uma matriz energética mais limpa e renovável. Nesse cenário, a produção de etanol de segunda geração surge como uma alternativa eficiente, pois os carboidratos presentes em resíduos lignocelulósicos, como a palha e o bagaço de cana-de-açúcar, podem ser solubilizados por meio de pré-tratamentos que liberam de monômeros de açúcar, fermentescíveis. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar dois processos distintos: o tratamento com água quente e o pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. Nesse contexto, a partir da análise imediata, observou-se elevados teores de material volátil e carbono fixo, tanto para a palha quanto para o bagaço de cana-de-açúcar, o que confirma uma composição rica em compostos orgânicos residuais, como celulose, hemicelulose e lignina. No tratamento com água quente, foi realizado um planejamento experimental fatorial completo 2^3 , com três pontos centrais e nove combinações únicas, analisadas no *software Minitab 17*. Os fatores independentes foram: tempo (20 e 80 min, com ponto central em 50 min), temperatura (60 e 100 °C, com ponto central em 80 °C) e proporção palha/bagaço de cana-de-açúcar (25 e 75 %, com ponto central em 50 %). O ensaio 6 (80 min, 60°C e 75 % de palha) apresentou a maior liberação de açúcares redutores (5,50 g/L). Já no pré-tratamento hidrotérmico, realizado em sistema fechado (autoclave) sob pressão de 1 bar, adotou-se um planejamento experimental 2^2 , considerando como variáveis independentes o tempo (20 e 80 min, com ponto central em 50 min) e a proporção palha/bagaço (50 e 90%, com ponto central em 70%) na solubilização dos componentes lignocelulósicos. O ensaio 4 (80 min, 90% de palha) apresentou a maior liberação de açúcares redutores (6,64 g/L), evidenciando a influência positiva da pressão no processo de solubilização dos componentes lignocelulósicos. A análise estatística do processo evidenciou que ambos os processos foram significativamente influenciados pelas variáveis operacionais avaliadas. O planejamento fatorial permitiu identificar modelos estatisticamente robustos para açúcares redutores e rendimento, com coeficientes de determinação (R^2) adequados e validados pela análise de variância (ANOVA). No tratamento com água quente, a proporção palha/bagaço exerceu maior efeito sobre a resposta, enquanto a aplicação do método *Steepest Ascent* não resultou em ganhos adicionais, confirmando a proximidade da região ótima inicial. Já no pré-tratamento hidrotérmico, a maior severidade do processo intensificou a solubilização dos componentes lignocelulósicos, observada pela redução do rendimento mássico da fração sólida e pelo aumento da liberação de açúcares redutores. Esses resultados confirmam a viabilidade do pré-tratamento hidrotérmico como uma alternativa eficiente para reaproveitamento da palha e do bagaço de cana-de-açúcar na produção de etanol de segunda geração. Sob a perspectiva dos critérios *Environmental, Social and Governance (ESG)*, este estudo demonstra elevada relevância ao incentivar práticas sustentáveis na indústria de biocombustíveis, contribuindo para a mitigação de impactos ambientais e para a promoção da economia circular, além de apresentar alinhamento com aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9, 12 e 13 da Organização das Nações Unidas (ONU).

Palavras-Chave: Reaproveitamento de resíduos, Sustentabilidade energética, Biomassa lignocelulósica, Etanol de segunda geração, Açúcares redutores.

ABSTRACT

Renewable alternatives are increasingly being discussed with the aim of expanding the diversity of sustainable raw materials for the biofuel sector, promoting the transition to a cleaner and more renewable energy matrix. In this scenario, second-generation ethanol production emerges as an efficient alternative, since the carbohydrates present in lignocellulosic residues, such as sugarcane straw and bagasse, can be solubilized through pretreatments that release fermentable sugar monomers. Therefore, this work aimed to evaluate two distinct processes: hot water treatment and hydrothermal pretreatment of sugarcane straw and bagasse. In this context, from the immediate analysis, high levels of volatile matter and fixed carbon were observed for both sugarcane straw and bagasse, confirming a composition rich in residual organic compounds such as cellulose, hemicellulose, and lignin. In the hot water treatment, a full 2^3 factorial experimental design was carried out, with three central points and nine unique combinations, analyzed using Minitab 17 software. The independent factors were: time (20 and 80 min, with a central point at 50 min), temperature (60 and 100 °C, with a central point at 80 °C), and straw/sugarcane bagasse ratio (25 and 75%, with a central point at 50%). Trial 6 (80 min, 60°C, and 75% straw) showed the highest release of reducing sugars (5.50 g/L). In the hydrothermal pretreatment, carried out in a closed system (autoclave) under 1 bar pressure, a 2^2 experimental design was adopted, considering as independent variables the time (20 and 80 min, with a central point at 50 min) and the straw/bagasse ratio (50 and 90%, with a central point at 70%) in the solubilization of lignocellulosic components. Trial 4 (80 min, 90% straw) showed the highest release of reducing sugars (6.64 g/L), highlighting the positive influence of pressure on the solubilization process of lignocellulosic components. The statistical analysis of the process showed that both processes were significantly influenced by the operational variables evaluated. The factorial design allowed the identification of statistically robust models for reducing sugars and yield, with adequate coefficients of determination (R^2) validated by analysis of variance (ANOVA). In the hot water treatment, the straw/bagasse ratio had the greatest effect on the response, while the application of the Steepest Ascent method did not result in additional gains, confirming the proximity to the initial optimum region. In the hydrothermal pretreatment, the greater severity of the process intensified the solubilization of lignocellulosic components, observed by the reduction in the mass yield of the solid fraction and the increase in the release of reducing sugars. These results confirm the viability of hydrothermal pretreatment as an efficient alternative for reusing sugarcane straw and bagasse in the production of second-generation ethanol. From the perspective of Environmental, Social and Governance (ESG) criteria, this study demonstrates high relevance in encouraging sustainable practices in the biofuel industry, contributing to the mitigation of environmental impacts and the promotion of the circular economy, in addition to aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 9, 12 and 13 of the United Nations (UN).

Keywords: Waste reuse, Energy sustainability, Lignocellulosic biomass, Second-generation ethanol, Reducing sugars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais constituintes das biomassas lignocelulósicas.	22
Figura 2. Estrutura molecular da celulose.	25
Figura 3. Representação dos componentes presentes na fração hemicelulósica.	26
Figura 4. Estrutura química da lignina e suas ligações.	27
Figura 5. Produção de compostos inibidores a partir do pré-tratamento ácido de biomassa.	29
Figura 6. Amostras de palha de cana-de-açúcar: (a) “ <i>in natura</i> ”, (b) secagem e (c) resíduo uniformizado.	37
Figura 7. Amostras de bagaço de cana-de-açúcar: (a) “ <i>in natura</i> ”, (b) secagem e (c) resíduo uniformizado.	37
Figura 8. Curvas padrão para determinação de glicose, xilose, sacarose e glicerol no HPLC.	40
Figura 9. Processo de pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração: (a) antes do pré-tratamento, (b) durante o processo, (c) fração sólida resultante.	44
Figura 10. Curva padrão de glicose para determinação da concentração de açúcares redutores no pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço para produção de etanol.	46
Figura 11. Evolução da produção científica entre os anos de 2020 e 2025 sobre o tema pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	47
Figura 12. Principais autores por quantidade de artigos publicados entre os anos de 2020 e 2025 abordando o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	49
Figura 13. Análise de coautoria: correlação existente entre os autores no estudo do pré-tratamento hidrotérmico e do tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	50
Figura 14. Análise de coocorrência das palavras-chave do portfólio de artigos analisados.	51
Figura 15. Nuvem de palavras extraídas do portfólio de artigos analisados.	51
Figura 16. Resultado do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares para o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.	57
Figura 17. Diagrama de Pareto para os açúcares redutores liberados na fração líquida obtida após o tratamento com água quente ($\alpha=0,10$).	59
Figura 18. Diagrama de Pareto para o rendimento da fração sólida obtida após o tratamento com água quente ($\alpha=0,10$).	59
Figura 19. Influência dos efeitos principais sobre a resposta Açúcares Redutores no tratamento com água quente.	61
Figura 20. Interação entre as variáveis independentes em relação a resposta Açúcares Redutores no tratamento com água quente.	61
Figura 21. Gráfico de contorno para as respostas Açúcares Redutores e Rendimento no tratamento com água quente.	62
Figura 22. Otimização das variáveis dependentes no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	63
Figura 23. Resultado do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares para o pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de	66

cana-de-açúcar.

Figura 24. Diagrama de Pareto para os açúcares redutores liberados na fração líquida obtida após o pré-tratamento hidrotérmico ($\alpha=0,10$). 67

Figura 25. Diagrama de Pareto para o rendimento da fração sólida obtida após o pré-tratamento hidrotérmico ($\alpha=0,10$). 67

Figura 26. Influência dos efeitos principais sobre a resposta Açúcares Redutores no pré-tratamento hidrotérmico. 69

Figura 27. Influência dos efeitos principais sobre a resposta Rendimento no pré-tratamento hidrotérmico. 69

Figura 28. Gráfico de contorno para a resposta Rendimento no pré-tratamento hidrotérmico. 70

Figura 29. Otimização das variáveis dependentes no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol. 71

Figura 30. Espectro de FTIR da amostra de palha de cana-de-açúcar *in natura*. 72

Figura 31. Espectro de FTIR da amostra de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*. 73

Figura 32. Curva de TG expressa para o ensaio 6 antes e após a aplicação do tratamento com água quente a uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto. 74

Figura 33. Curva de DTG expressa para o ensaio 6 antes e após a aplicação do tratamento com água quente a uma taxa de aquecimento de 10°C/minuto. 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção de etanol anidro e hidratado, segundo grandes regiões e unidades da Federação – 2020/2025.	20
Tabela 2. Emissões de Cbio's por biocombustível 2020/2023.	21
Tabela 3. Composição química de biomassas aplicadas a produção de etanol de segunda geração.	22
Tabela 4. Conjunto de variáveis de entrada definidas para análises estatísticas relacionadas à utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de etanol.	32
Tabela 5. Níveis codificados utilizados no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	40
Tabela 6. Matriz do planejamento fatorial completo 2 ³ aplicado ao tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	40
Tabela 7. Projeção do método <i>Steepest Ascent</i> no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	41
Tabela 8. Matriz do planejamento fatorial 2 ² aplicado ao pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	41
Tabela 9. Relevância dos periódicos e seus respectivos fatores de impacto no estudo do pré-tratamento hidrotérmico e do tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	47
Tabela 10. Resultados da análise imediata da palha e do bagaço de cana-de-açúcar visando à produção de etanol.	53
Tabela 11. Resultados referentes a análise imediata de outras biomassas aplicadas a produção de etanol.	53
Tabela 12. Análise elementar das amostras de palha e bagaço de cana-de-açúcar “ <i>in natura</i> ”.	54
Tabela 13. Poder calorífico dos resíduos lignocelulósicos analisados.	55
Tabela 14. Resultados obtidos com a fração líquida após o pré-tratamento com água quente do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.	56
Tabela 15. Análise de variância (ANOVA) para as variáveis dependentes no tratamento com água quente.	59
Tabela 16. Definição do passo para o <i>Steepest Ascent</i> para o tratamento com água quente.	63
Tabela 17. Resultados obtidos com a fração líquida após a aplicação do método <i>Steepest Ascent</i> no tratamento com água quente do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.	63
Tabela 18. Resultados obtidos com a fração líquida após o pré-tratamento hidrotérmico do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.	64
Tabela 19. Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis dependentes no pré-tratamento hidrotérmico.	67
Tabela 20. Composição química dos hidrolisados obtidos após o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Fluxograma do processo metodológico seguido no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.	35
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	17
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	17
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Produção de etanol convencional no Brasil	19
2.2 Resíduos agroindustriais	21
2.2.1 <i>Palha e bagaço de cana-de-açúcar: Características e Aplicações na Produção de Etanol</i>	23
2.2.2 <i>Celulose</i>	25
2.2.3 <i>Hemicelulose</i>	25
2.2.4 <i>Lignina</i>	26
2.3 Pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos	27
2.3.1 <i>Pré-tratamento físico</i>	28
2.3.2 <i>Pré-tratamento químico</i>	28
2.3.2.1 <i>Pré-tratamento ácido</i>	28
2.3.2.2 <i>Pré-tratamento alcalino</i>	30
2.3.3 <i>Pré-tratamento biológico</i>	30
2.3.4 <i>Pré-tratamento hidrotérmico e tratamento com água quente</i>	30
2.4 Análise estatística e planejamento experimental	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Estudo bibliométrico e análise de conteúdo	33
3.1.1 <i>Método de revisão</i>	33
3.1.2 <i>Coleta de dados</i>	33
3.1.3 <i>Análise de dados</i>	34
3.2 Obtenção e preparação dos resíduos	36
3.3 Caracterização dos resíduos lignocelulósicos	37
3.3.1 <i>Análise imediata e elementar</i>	37
3.3.2 <i>Poder calorífico superior e inferior</i>	37
3.3.3 <i>Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR)</i>	38
<i>Análise termogravimétrica (TG/DTG)</i>	38
<i>Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC)</i>	38
3.4 Planejamento experimental fatorial completo	39
3.4.1 <i>No tratamento com água quente</i>	39
3.4.2 <i>Projeção do Steepest Ascent</i>	40
3.4.3 <i>No pré-tratamento hidrotérmico</i>	41
3.5 Tratamentos térmicos aplicados à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar	41
3.5.1 <i>Tratamento por água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar</i>	42
3.5.2 <i>Pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar</i>	42
3.6 Avaliação do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares	43
3.7 Análise de açúcares redutores	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46

4.1	Estudo bibliométrico e análise de conteúdo	46
4.2	Caracterização dos resíduos lignocelulósicos: análise imediata e elementar	52
4.3	Poder calorífico superior e inferior	54
4.4	Avaliação dos tratamentos térmicos aplicados à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar	55
4.4.1	<i>Tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar</i>	55
4.4.2	<i>Projeção do método Steepest Ascent para avaliar o tratamento com água quente</i>	62
4.4.3	<i>Pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar</i>	64
4.5	Caracterização da palha e do bagaço de cana-de-açúcar	70
4.5.1	<i>Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR)</i>	71
4.5.2	<i>Análise termogravimétrica (TG/DTG)</i>	72
4.5.3	<i>Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC)</i>	74
5	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	76
	ANEXO I	89
	APÊNDICE A	90

1 INTRODUÇÃO

Entre os principais focos das pesquisas atuais está a aceleração da transição energética, decorrente do agravamento da situação ambiental e climática causada pela superexploração dos recursos de combustíveis fósseis e pelo aumento do crescimento populacional e da urbanização (Benali e Toyir, 2026). Tanto é que, a segurança energética tem sido cada vez mais priorizada nas agendas políticas e econômicas globais.

No Brasil, diversos incentivos são promovidos por meio de programas como o RenovaBio, Mover e pela Lei Combustível do Futuro (Lei Nº 14.993/2024) que apoiam a diversidade de matérias-primas sustentáveis para o setor de biocombustíveis, promovendo a transição para uma matriz energética mais limpa e renovável. Apesar desses esforços, apenas cerca de 15% da energia produzida no mundo provém de fontes renováveis, destacando a necessidade de acelerar a substituição de combustíveis fósseis por alternativas ambientalmente mais adequadas.

Dentre as fontes de energia sustentável, como a hidráulica, solar e eólica, a biomassa lignocelulósica tem despertado interesse devido à sua ampla disponibilidade e custo reduzido, pois consiste, em sua maioria, de resíduos agrícolas (Cho *et al.*, 2020; EPE, 2023). Para atender à crescente demanda energética e reduzir as preocupações ambientais, o uso de matéria-prima lignocelulósica para a produção de biocombustíveis apresenta grande potencial (Thakur, Singh e Kaur, 2026).

A biomassa lignocelulósica, amplamente distribuída no planeta, possui uma produção anual estimada em 500 milhões de toneladas (UDOP, 2025). Entre as principais fontes dessa biomassa, a cana-de-açúcar se destaca como uma das *commodities* mais relevantes do agronegócio nacional. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024a), a safra 2025/2026 deverá alcançar uma produção de 668,8 milhões de toneladas, sendo a região Sudeste responsável pela produção 424,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Essa elevada produção está associada à geração de resíduos lignocelulósicos, como a palha e o bagaço de cana-de-açúcar, que, quando mal gerenciados, podem causar impactos ambientais significativos, como degradação do solo, poluição hídrica e riscos à saúde pública. Estima-se que, para cada tonelada de cana processada, sejam gerados aproximadamente 250 kg de bagaço e 204 kg de palha e pontas secas (Gabriel, 2021).

A palha de cana-de-açúcar vem ganhando destaque devido ao avanço da colheita mecanizada e às crescentes preocupações ambientais. Nesse contexto, a cana-de-açúcar corresponde a uma planta que absorve carbono na forma de compostos orgânicos para auxiliar

o seu crescimento, assim, com a queimada do canavial, todo carbono absorvido é liberado rapidamente, contribuindo para emissões atmosféricas significativas. Por outro lado, o bagaço de cana-de-açúcar é comumente aplicado a geração de energia elétrica por meio da combustão em caldeiras, porém, pode ser utilizado em outras vertentes dado ao seu potencial biotecnológico.

Essa narrativa possibilitou a criação de leis como a Lei nº11.241/2002, no Estado de São Paulo, o Código Florestal Brasileiro Lei nº 12.651/2012 e a Resolução CONAMA nº 436/2011, que estabelecem a redução gradativa das queimadas de vegetações, bem como a diminuição da emissão de poluentes para a atmosfera estabelecendo a proteção da vegetação nativa. Diante desse cenário, a utilização da palha e do bagaço de cana-de-açúcar na produção de etanol de segunda geração apresenta justificativa técnica e se destaca como uma alternativa promissora (Navarrete *et al.*, 2021; Coelho e Bragagnolo, 2024).

O etanol de segunda geração é obtido por meio da bioconversão da celulose presente nos resíduos lignocelulósicos em açúcares fermentescíveis. A palha de cana-de-açúcar é composta por 40-44% de celulose, 30-32% de hemicelulose e 22-25% de lignina. A celulose corresponde ao polímero linear de glicose, organizado em feixes circundados pela hemicelulose, e é o biopolímero mais abundante na Terra. A hemicelulose, por sua vez, é um heteropolissacarídeo amorfo e ramificado, composto por monômeros como xilose, arabionose e galactose. Já a lignina envolve esses dois componentes estruturais, conferindo rigidez ao material devido à sua natureza reticulada, aromática, irregular e amorfa, o que dificulta o acesso de produtos químicos e enzimas durante o processamento (Carvalho *et al.*, 2021).

Em razão da forte interação e recalcitrância presentes no complexo celulose-hemicelulose-lignina, faz-se necessário um pré-tratamento do material para reduzir a cristalinidade do resíduo e remover as frações indesejáveis, facilitando o acesso à celulose nas etapas subsequentes de hidrólise enzimática, fermentação e destilação (Pedrazzi *et al.*, 2019). Os processos de pré-tratamento podem ser químicos, físicos, biológicos ou uma combinação desses métodos aplicados ao mesmo material. Conforme descrito por Coelho *et al.* (2022), embora os processos químicos sejam eficazes na deslignificação, eles exigem grandes quantidades de água e utilizam reagentes que causam poluição ambiental, demandando etapas subsequentes mais onerosas de reciclagem e eliminação de resíduos. Além disso, Silva *et al.* (2024) apontam que os métodos físicos e biológicos são relativamente ineficientes quando utilizados isoladamente.

No contexto do desenvolvimento de tecnologias mais limpas e ambientalmente corretas para o processamento de biomassa, o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água

quente destacam-se por dispensarem o uso de reagentes químicos, apresentarem maior eficiência na separação dos componentes lignocelulósicos e reduzirem a formação de subprodutos de degradação de açúcares. Dessa forma, o pré-tratamento hidrotérmico é responsável por promover o rompimento das ligações lignina-carboidrato por meio de altas pressões e temperaturas. Além disso, a solubilização do complexo hemicelulose-lignina ocorre devido à liberação de íons hidrônio (H_3O^+) e hidróxido (OH^-) no meio, o que possibilita a reorganização estrutural da lignina na superfície do resíduo. Já o tratamento com água quente faz uso de água em altas temperaturas, promovendo o aumento da digestibilidade do material e a maior sustentabilidade operacional em função da reciclagem de água e energia durante o processo (Sun *et al.*, 2022).

Desta maneira, o presente trabalho possui relevância significativa, pois os diversos efeitos gerados por cada metodologia aplicada no aproveitamento residual para a produção de etanol são particularmente importantes na atualidade, considerando o grande apelo ambiental para a descarbonização e a necessidade urgente de ampliar a participação das fontes renováveis na matriz energética. A pesquisa contribui na avaliação do pré-tratamento hidrotérmico e do tratamento com água quente como alternativas sustentáveis frente aos métodos químicos convencionais, destacando seus impactos estruturais na biomassa lignocelulósica e suas implicações na eficiência da possível produção de etanol 2G. Além disso, alinha-se diretamente aos ODS 7 e 12, ao incentivar a geração de energia limpa e acessível, além de fomentar padrões sustentáveis de produção e o consumo. Também está em conformidade com os critérios ESG, ao promover o uso sustentável da biomassa na produção de etanol 2G, consolidando, assim, a relevância do setor bioenergético na transição para uma matriz energética mais sustentável e diversificada.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Otimizar e avaliar os processos de pré-tratamento hidrotérmico e de tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar visando à produção de etanol de segunda geração.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar um estudo bibliométrico e uma análise de conteúdo sobre as técnicas de pré-tratamento hidrotérmico e tratamento com água quente aplicadas à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar;
- Utilizar a palha e o bagaço de cana-de-açúcar e obter um material uniformizado quanto à granulometria;
- Avaliar as propriedades físico-químicas da palha e do bagaço de cana-de-açúcar, incluindo análise imediata, poder calorífico, termogravimetria (TGA/DTG), espectroscopia de infravermelho (FTIR-ATR);
- Realizar o pré-tratamento hidrotérmico em autoclave, buscando avaliar a influência da pressão e do tempo de residência na solubilização da biomassa lignocelulósica, com base em um planejamento experimental fatorial completo 2³;
- Realizar o tratamento com água quente em diferentes condições de tempo, temperatura e proporção de biomassa, seguindo um planejamento experimental previamente definido;
- Aplicar o método do *Steepest Ascent* como ferramenta de otimização, a fim de confirmar a existência ou não de melhorias significativas na liberação de açúcares redutores no tratamento com água quente;
- Quantificar os açúcares redutores liberados na fração líquida após os tratamentos e avaliar a solubilização dos componentes macromoleculares nas diferentes proporções de palha/bagaço na fração sólida;
- Avaliar a composição dos licores obtidos após o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente por meio da Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), correlacionando os perfis cromatográficos com a eficiência dos tratamentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Produção de etanol convencional no Brasil

As biorrefinarias estão emergindo como estratégias-chave para promover o desenvolvimento sustentável, transformando resíduos agroindustriais em produtos químicos, energia e materiais de alto valor agregado (Ferrero, Aráoz e Robles, 2026). Em especial, os biocombustíveis, têm atraído interesse como meio de reduzir o consumo de petróleo, remover o CO₂ e promover o emprego rural e o desenvolvimento econômico ((Zambello *et al.*, 2026).

A produção de etanol convencional no Brasil, por exemplo, tem suas raízes fortemente ligadas ao setor sucroalcooleiro, uma vez que a cana-de-açúcar corresponde a uma das principais *commodities* da agroindústria brasileira. Nesse contexto, a produção de cana-de-açúcar na safra 2024/2025 atingiu 678,67 milhões de toneladas, apresentando um crescimento de 4,3% nas áreas destinadas à colheita, o que proporcionou um aumento na extensão plantada. Esse quantitativo também é expresso em termos dos produtos disponíveis nesse âmbito, com destaque para o etanol, cuja produção alcançou 36,1 bilhões de litros no mesmo período (CONAB, 2024b).

O etanol é um combustível de fórmula molecular C₂H₆O, líquido incolor e inflamável, geralmente encontrado em motores a combustão. Esse produto é obtido pela fermentação de açúcares, seguida de destilação, promovendo a separação dos componentes por diferença de volatilidade. Tomasi *et al.* (2023) explicaram que, no processo de fermentação alcoólica, açúcares como glicose, frutose e sacarose são convertidos em energia celular pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, produzindo etanol e dióxido de carbono como resíduos metabólicos. Gonçalves *et al.* (2024) fizeram ressalva sobre a destilação extrativa, apontando o processo como fundamental para a produção de etanol, contribuindo para a separação da mistura original quando ocorre a formação de um azeótropo.

Considerando as questões legais, o etanol é comumente utilizado como aditivo à gasolina em virtude das políticas estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e confirmadas pelo Ministério de Minas e Energia (MME), sendo atualmente 27,5% o percentual máximo atrelado a mistura e 18% o mínimo (Brasil, 2024). Entretanto, Mattos Filho (2024) retrata que o Senado aprovou o projeto de Lei nº 528/2020 dispondo sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, considerando o limite mínimo de etanol à gasolina como 22% e o máximo podendo chegar a 35%. Nesse cenário, na Tabela 1 foi ilustrado a produção de etanol anidro e hidratado segundo as regiões da Federação nos anos de 2020 a

2025.

Tabela 1. Produção de etanol anidro e hidratado, segundo grandes regiões e unidades da Federação – 2020/2025.

Grandes regiões e unidades da Federação	Produção de etanol anidro e hidratado (mil m ³)					
	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Brasil	32.522,23	30.028,07	30.637,10	35.380,25	36.961,31	35.853,33
Região Norte	233,92	256,38	268,25	253,65	261,42	229,56
Região Nordeste	1.918,61	1.842,16	1.749,48	2.077,89	1.929,97	2.385,68
Região Sudeste	17.786,57	15.184,14	15.020,31	17.149,70	17.328,20	14.770,47
Região Sul	1.263,96	1.193,62	1.087,56	1.231,24	1,135,42	1.235,55
Região Centro-Oeste	11.319,18	11.551,77	12.511,52	14.667,77	16.306,28	17.232,05

Fonte: ANP/SBQ (2025).

Observa-se que a região Sudeste apresentou o maior índice de produção de etanol, 17.149,70 mil m³ no ano de 2023. Esse aspecto decorre dos elevados níveis de produção de etanol atribuídos às regiões de Minas Gerais e São Paulo, em comparação com outros estados, durante o período de 2020 a 2023. Além disso, eles correspondem aos principais estados produtores de cana-de-açúcar da Federação destacando-se com 439 milhões de toneladas e 83 milhões de toneladas, respectivamente (IBGE, 2023; Féo; Sobrinho, 2024). A região Norte apresentou o menor valor com 253,65 mil m³, onde sua produção é formada por estados como Tocantins, Rondônia, Acre, Pará e Amazonas. Castro *et al.* (2020) evidenciaram que o Amazonas não possui regiões favoráveis ao desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar dada a deficiência hídrica anual.

O papel do etanol como biocombustível renovável é bastante significativo e amplamente reconhecido, visto que conforme dados da UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar, o consumo de etanol, anidro e hidratado, evitou a emissão de mais de 515 milhões de toneladas de CO₂ equivalente na atmosfera (tCO₂e) (UNICA, 2020). Essa premissa relaciona-se com os dados descritos na Tabela 2 onde estão ilustradas as emissões de créditos de descarbonização – Cbio's, por biocombustível entre os anos de 2020 a 2023. Assim, o etanol é evidenciado com 29.076.667 Cbio's emitidos no ano de 2023, destacando também os anos de 2021 e 2022 que apresentaram 26.265.108 e 26.803.911 Cbio's, respectivamente.

Tabela 2. Emissões de Cbio's por biocombustível 2020/2023.

Ano	Biodiesel (tCO ₂ e)	Biometano(tCO ₂ e)	Etanol(tCO ₂ e)	Total(tCO ₂ e)
2020	2.832.529	48.729	15.829.951	18.711.209
2021	4.409.477	96.616	26.265.108	30.771.201
2022	4.493.392	140.889	26.803.911	31.438.192
2023	5.236.730	202.299	29.076.667	34.515.696

Fonte: ANP/SBQ (2025).

Segundo Moreira Filho e Costa (2024) os créditos de descarbonização equivalem a 1 tonelada de CO₂ evitada que são emitidos pelos produtores e importadores de biocombustíveis certificados pela ANP. Garcia (2024) descreve que a implementação desse sistema de creditação possibilitou a compreensão das relações entre a necessidade de aumentar a produção de alimentos e a preservação ambiental propondo a conservação de ecossistemas.

Conforme exposto anteriormente, a produção de etanol convencional, derivado principalmente da cana-de-açúcar, tem demonstrado grande relevância no cenário energético global. Entretanto, o etanol de segunda geração oferta novas vertentes para o âmbito industrial ao propor a obtenção desse produto a partir de biomassas provenientes da agroindústria, por meio da solubilização dos carboidratos presentes nesses constituintes. Assim, a aplicação de biomassas lignocelulósicas, como resíduos agroindustriais, para a produção de etanol pode ser usada para complementar a produção do etanol convencional.

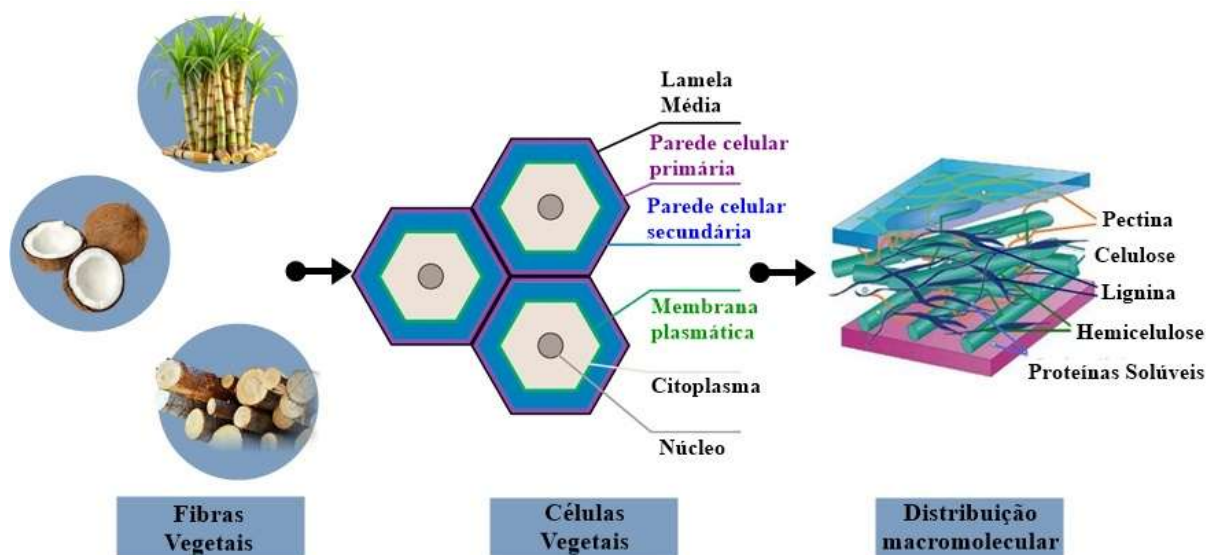
2.2 Resíduos agroindustriais

A agroindústria é composta por um conjunto de transformações que englobam matérias-primas provenientes da agricultura, silvicultura, pecuária e aquicultura. Nesse contexto, considerando a crescente industrialização, esses setores estão se alinhando a interesses políticos, econômicos e ambientais, buscando assegurar a intensidade, robustez e complexidade tecnológica empregadas nesse cenário. Estima-se que ocorram perdas de até 50% dessas matérias-primas ao longo das etapas de colheita, abate, transporte, processamento, armazenamento e consumo. Devido à sua composição, os resíduos agroindustriais podem apresentar degradação mais lenta, resultando em acúmulo e impacto ambiental negativo. Apesar disso, esses resíduos retêm concentrações consideráveis de importantes compostos bioativos que poderiam ser reincorporados em novas formulações. Por isso, é essencial identificar aplicações para converter esses resíduos em produtos de alto valor agregado (Barros *et al.*, 2026).

Assim, Viola e Mendes (2022) retrataram a agricultura 4.0 como ferramenta fundamental para garantir o monitoramento por satélites de variáveis meteorológicas, a implementação de *softwares* de gestão agrícola, sensores de controle de pesticidas e irrigação, mapeamento digitalizado de índices de fertilidade, umidade, temperatura e condições físico-geo-químicas do solo, entre outros. Esse avanço considerável, potencializa a produção de produtos de valor agregado; em contrapartida, contribui para a geração de resíduos que podem causar impactos ambientais negativos.

Fávaro e Rech (2022) destacaram que os resíduos provenientes da agroindústria têm origem no processamento de alimentos, fibras, couro e outros produtos. Esses subprodutos podem ser classificados como inorgânicos, quando englobam resíduos gerados pela ação humana, como embalagens de agrotóxicos e resíduos sólidos domésticos; ou lignocelulósicos, quando derivados de processos industriais envolvendo palma, cana-de-açúcar, milho, arroz, trigo e outros materiais, caracterizados por apresentarem uma matriz molecular composta de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e proteínas solúveis. Na Figura 1 está apresentada uma visão geral das principais moléculas constituintes das biomassas lignocelulósicas.

Figura 1. Principais constituintes das biomassas lignocelulósicas.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em CNPEM (2017).

A parede celular de resíduos lignocelulósicos vegetais é responsável pelo suporte estrutural e mecânico, bem como influencia na proteção contra patógenos e desidratação. Essa macroestrutura é subdividida em parede primária e parede secundária. A parede primária se forma durante o processo de crescimento celular, sendo estável e flexível para permitir a expansão celular sem causar rupturas. Já a parede secundária é uma estrutura interna,

caracterizada por ser mais densa, espessa e resistente, desenvolvendo-se no interior da parede primária. A parede secundária é composta por celulose, hemicelulose e lignina, enquanto a lamela média, que conecta as células, é constituída por pectina e proteínas (Taiz *et al.* 2024; Assis; Pereira; Santos, 2021).

No setor sucroalcooleiro a composição lignocelulósica de resíduos como torta de filtro, bagaço, vinhaça e palha de cana-de-açúcar é amplamente aproveitada. Esses subprodutos possuem grande potencial como matéria-prima em processos biotecnológicos, como a produção de bioenergia, bioplásticos, biocombustíveis, ácidos orgânicos, fertilizantes, entre outros. Dentre essas aplicações, Silva *et al.* (2023) trabalharam a utilização da vinhaça concentrada como biofertilizante por fertirrigação, tendo em vista que esse material apresenta 93% de água e 7% de sólidos, beneficiando toda a estrutura do solo. Oliveira *et al.* (2020) abordaram a produção de bioenergia e etanol de segunda geração por meio da palha de cana-de-açúcar, destacando sua aplicação em função do elevado poder calorífico e da viabilidade econômica.

O aproveitamento de resíduos agroindustriais alinha-se ao conceito de economia circular exposto por Vieira Filho, Queiroz e Lima (2024), em que estabelece a redução do resíduo mediante a uma nova aplicação, mas o fluxo linear de consumo é mantido caracterizando-se como uma abordagem do início ao fim. Assim, esse mecanismo contribui para a sustentabilidade ambiental promovendo uma transição para fontes de energia mais limpas e renováveis.

2.2.1 Palha e bagaço de cana-de-açúcar: Características e Aplicações na Produção de Etanol

Os biocombustíveis celulósicos oferecem uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis e um meio de mitigar as mudanças climáticas, de forma que resultados de estudos destacam as oportunidades para inovação impulsionada pela pesquisa em tecnologias de etanol celulósico de baixo custo no Brasil e em outros países (Zambello *et al.*, 2026).

A palha e o bagaço de cana-de-açúcar correspondem aos principais resíduos lignocelulósicos gerados no setor sucroalcooleiro e possuem características importantes que potencializam a aplicação dessas matérias-primas na produção de etanol de segunda geração. Braga e Meira (2023) reforçaram essa narrativa destacando que esses resíduos são ricos em celulose e hemicelulose, que podem ser convertidas em açúcares fermentescíveis por processos químicos, térmicos ou biológicos favorecendo a produção de etanol.

A palha de cana-de-açúcar corresponde a um resíduo lignocelulósico obtido no campo durante o processo de colheita mecanizada. Olmedo *et al.* (2023) descreveram que esse material

é formado por folhas secas e pontas verdes que atualmente são deixados ao solo para evitar processos erosivos, aumentar a fixação de carbono e reduzir a evaporação de água. Em contrapartida, o bagaço é um resíduo produzido após a extração do caldo de cana na moenda. Santos *et al.* (2023) e Silva, Mantese e Florian (2023) apontaram a utilização do bagaço de cana-de-açúcar na produção de bioenergia, porém esse aparato segue bem consolidado e difundido. Contudo, a utilização desses resíduos na produção de etanol está alinhada a políticas ambientais que incentivam o aumento da palha no campo, devido à proibição das queimadas, e promovem novas diretrizes biotecnológicas para o aproveitamento do excesso de bagaço em aplicações inovadoras.

No contexto atual, outras destinações são atribuídas a palha e ao bagaço de cana-de-açúcar. Xavier *et al.* (2021) avaliaram o uso do bagaço como adsorvente natural de corante têxtil sintético, apresentando uma redução de corante em até 83,4%, 8,34 mg.g⁻¹. Silva *et al.* (2023) discutiram sobre a produção de biocarvão por meio da palha de cana-de-açúcar, classificando-o como fitoestimulante para a cultura de milho e atóxico para a soja. Silva (2024) faz ressalva a importância da biomassa lingocelulósica como fonte renovável de energia, reforçando que a produção de etanol de segunda geração impulsiona a substituição de combustíveis fósseis.

Na Tabela 3 encontra-se descrita a composição percentual de diversos tipos de fontes alternativas para a produção de etanol. Estão indicadas as variações de celulose, hemicelulose e lignina, porém, não foram considerados os teores de cinzas, extrativos e outros compostos. Logo, resíduos como palha e bagaço de cana-de-açúcar possuem potencial para serem aplicados nesse âmbito.

Tabela 3. Composição química de biomassas aplicadas a produção de etanol de segunda geração.

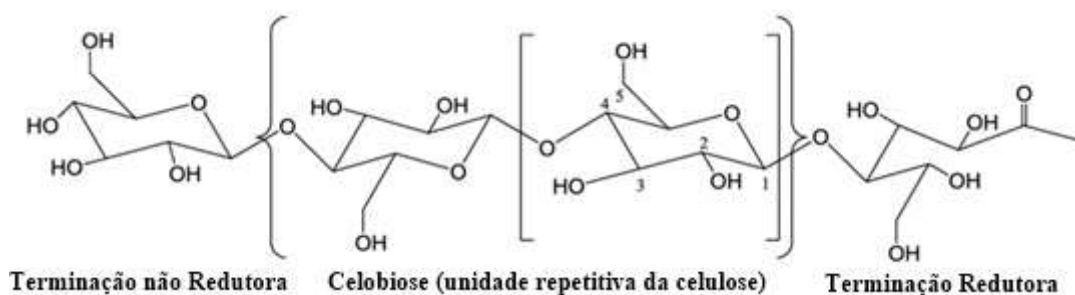
Biomassa	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Referência
Palha de cana-de-açúcar	38,3	28,8	25,7	Araújo (2022)
Bagaço de cana-de-açúcar	41,2	25,3	29,3	Araújo (2022)
Palha de arroz	43,4	27,9	17,2	Hoang e Nghiem (2021)
Caule da banana	48,0	21,1	15,7	Ai <i>et al.</i> (2021)
Palha de milho	27,7	17,4	11,6	Vezaro <i>et al.</i> (2024)
Fibra de coco	38,3	15,7	27,6	Neves <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

2.2.2 Celulose

A celulose, principal molécula utilizada para enfrentar os desafios da produção sustentável, corresponde ao biopolímero natural mais abundante da Terra, já que é o principal componente estrutural das plantas (Neves, Batista e Porciúncula, 2024). Estruturalmente, essa molécula é composta por unidades de D-glicose ligadas por meio de ligações β -1,4 glicosídicas, que promovem uma rotação alternada de 180° no eixo da cadeia, juntamente com três grupos hidroxilas reativos em cada unidade. A Figura 2 ilustra a estrutura molecular da celulose. A celobiose, dissacarídeo que compõe a estrutura da celulose, desempenha papel essencial na formação de ligações de hidrogênio intramoleculares (dentro da mesma molécula) e intermoleculares (entre as moléculas), além de interações de Van der Waals entre as moléculas adjacentes. Essas interações conferem elevada rigidez ao material e são cruciais para a organização e estabilidade das fibras de celulose (Barbosa, 2024; Mitsuhara, Moraes e Crestani, 2025).

Figura 2. Ilustração da estrutura molecular da celulose.



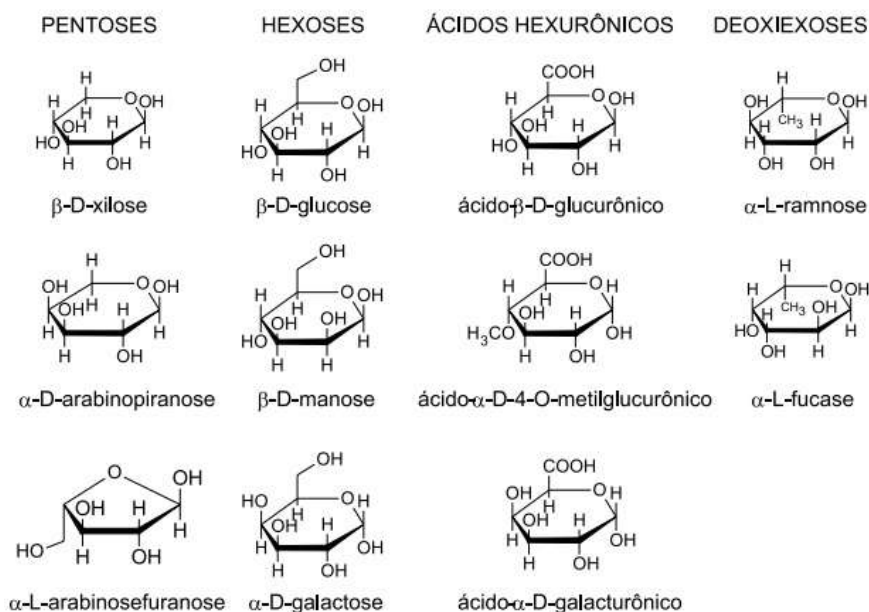
Fonte: Cordeiro (2016).

2.2.3 Hemicelulose

A hemicelulose consiste em um polímero heterogêneo e complexo, formado por unidades de pentoses, hexoses, pentosanas e hexosanas. Conforme elencado na Figura 3, essa molécula abrange compostos como glucose, manose, xilose, arabinose, ácido glucurônico e ácido metilglucurônico (Ruchala e Sibirny, 2021). Diferentemente da celulose, a hemicelulose possui baixo peso molecular, cadeias mais curtas e não possui um arranjo estrutural ordenado. Garcia *et al.* (2023) destacaram que em função da natureza amorfa dessa molécula, ela apresenta maior vulnerabilidade a hidrólise ácida, visto que é mais acessível a ácidos minerais utilizados como catalisadores. Vale destacar que, no contexto industrial, a hemicelulose pode ser

hidrolisada em açúcares como arabinose e xilose, importantes aditivos alimentares.

Figura 3. Representação dos componentes presentes na fração hemicelulósica.

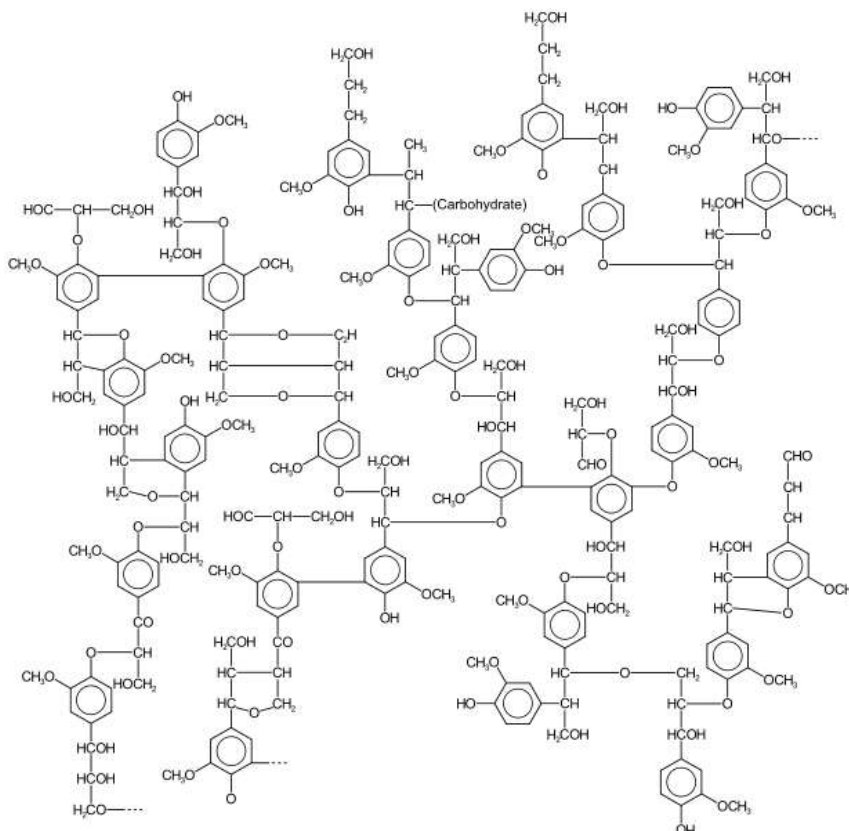


Fonte: Moraes, Nascimento e Melo (2005).

2.2.4 Lignina

A lignina corresponde a um heteropolímero amorfo, insolúvel em água e de alto peso molecular, responsável pela rigidez da parede celular e pela proteção contra degradação enzimática ou química (Rodrigues, Araújo e Albuquerque, 2022). Além disso, ela é formada por unidades de fenilpropano unidas por ligações não hidrolisáveis e sintetizada a partir de três alcoóis fenilpropiônicos. Na Figura 4 encontra-se uma ilustração da estrutura da lignina e suas ligações químicas, onde é possível perceber as unidades básicas conectadas por ligações C-C, C-O-C e ariléter. A lignina distribui-se em um arranjo irregular com as hemiceluloses em torno de filamentos de celulose nas paredes celulares primária e secundária (Costa *et al.*, 2021). O processo de degradação desse macrocomponente ocorre em múltiplas etapas, principalmente térmicas, que devem acontecer simultaneamente para que a sua estrutura seja quebrada.

Figura 4. Ilustração da estrutura química da lignina e suas ligações.



Fonte: Machado *et al.* (2016).

2.3 Pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos

Conforme abordado por Cruz-Santos *et al.* (2023), a hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos é limitada devido à recalcitrância da biomassa, influenciada pelos altos índices de lignina, baixa área superficial, o grau de polimerização da celulose e a forte interação dessa molécula com os demais constituintes, hemicelulose e lignina. Nesse contexto, o pré-tratamento emerge como uma alternativa promissora para desestruturação da matriz macromolecular vegetal, além de abrir caminho para a utilização da celulose em aplicações industriais.

A etapa de pré-tratamento é fundamental para garantir a eficiência dos processos subsequentes no uso biotecnológico de materiais celulósicos, incluindo a hidrólise enzimática, fermentação e destilação. Além disso, é o principal processo para reduzir a cristalinidade da celulose e aumentar a digestibilidade do material (Teixeira *et al.*, 2022; Yuan *et al.* 2023). Hoffman *et al.* (2021) acrescentam que para um pré-tratamento eficaz, devem ser alcançadas características como a redução da demanda de energia, a minimização da perda e degradação de açúcares formados e a limitação da produção de compostos inibidores. Logo, dentre os métodos de pré-tratamentos abordados na literatura, destacam-se os físicos, químicos e

biológicos, além da possibilidade de combinação dessas técnicas aplicadas ao material em estudo.

2.3.1 Pré-tratamento físico

O pré-tratamento físico compreende a fragmentação da biomassa lignocelulósica em frações menores. Nesse contexto, são utilizados agentes mecânicos, térmicos ou aplicação de radiação para promover o fracionamento do material. Consequentemente, esse processo aumenta a área superficial, melhorando a acessibilidade da biomassa e aumentando sua suscetibilidade ao ataque enzimático. Gueri *et al.* (2021) reportaram que esses aspectos são vantagens importantes indicadas nessa metodologia, porém sua destavagem está no elevado custo energético e na ação ineficiente sobre a lignina.

Os estudos atuais sobre pré-tratamentos físicos estão focados em sua aplicação combinada com outras metodologias. Uliana *et al.* (2024) descreveram a junção do pré-tratamento físico com abordagens químicas para hidrólise do bagaço de cana-de-açúcar na produção do etanol de segunda geração. Os autores indicaram que a combinação do tratamento ácido com micro-ondas foi eficiente na produção de açúcares redutores. Contudo, o tratamento com ultrassom associado ao ácido não apresentou eficácia, inviabilizando a fermentação alcoólica. Coelho *et al.* (2022) encontraram resultados promissores ao aplicarem o tratamento físico-químico no bagaço de cana-de-açúcar, capim-elefante e serragem da madeira, avaliando os teores de celulose e lignina em cada resíduo. A combinação desses métodos mostrou-se satisfatória para promover a deslignificação, resultando na redução do teor de lignina em 46,53% no bagaço, 28,45% na serragem de madeira e 62,16% no capim-elefante.

2.3.2 Pré-tratamento químico

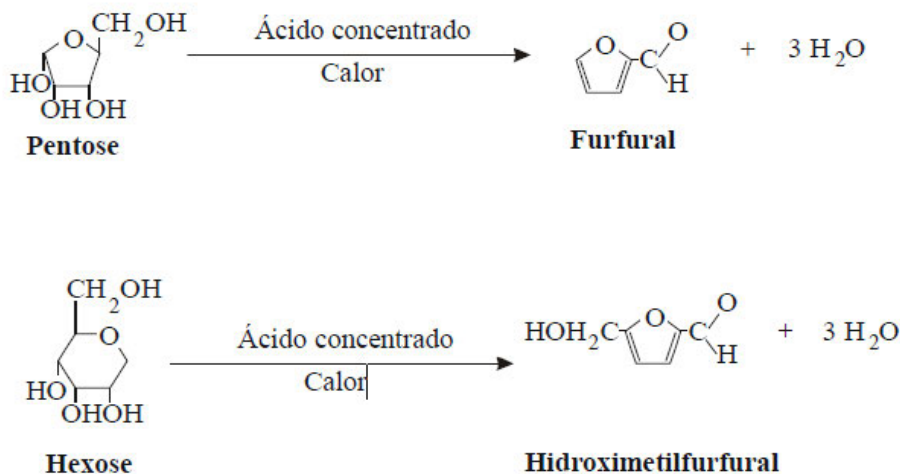
O pré-tratamento químico abrange métodos que utilizam substâncias ácidas, alcalinas ou solventes orgânicos objetivando a liberação de açúcares para serem empregados em processamentos industriais. Nesse cenário, aspectos de tempo e temperatura influenciam o processo podendo causar a degradação parcial da hemicelulose devido a sua ligação com a lignina. Para tanto, Silva *et al.* (2025) destacaram que a obtenção do produto final está atrelada ao composto químico escolhido e as condições de tratamento utilizadas.

2.3.2.1 Pré-tratamento ácido

O pré-tratamento ácido é amplamente utilizado por sua praticidade e pela maior disponibilidade dos reagentes requeridos no mercado. Esse mecanismo compreende o uso de soluções como ácido sulfúrico (H_2SO_4), nítrico (HNO_3), fosfórico (H_3PO_4) e clorídrico (HCl) para promover o rompimento da matriz lignocelulósica, causando a ruptura das ligações de Van der Waals, hidrogênio e ligações covalentes que compõe a biomassa aumentando a digestibilidade do material (Mitsuhara, Moraes e Crestani, 2025).

Segundo Souza e Dominices (2021) o pré-tratamento ácido é aplicado quando o objetivo consiste em obter um alto rendimento em açúcares de materiais lignocelulósicos. Entretanto, ele é responsável pela formação de produtos de degradação de açúcares, como: ácido acético, furfural, hidroximetilfurfural, ácido fórmico, ácido levulínico e compostos fenólicos. Esses inibidores, descritos na Figura 5, dificultam o processo de fermentação reduzindo o seu rendimento, por comprometerem a atividade microbiana, sendo necessário a adição da etapa de destoxificação aumentando os custos operacionais.

Figura 5. Produção de compostos inibidores a partir do pré-tratamento ácido de biomassa.



Fonte: Anjos e Pinto (2016).

Borges, Rosa e Silva (2021) destacaram a importância do pré-tratamento ácido ao aplicá-lo no bagaço de cana-de-açúcar. Observou-se que a maior concentração de glicose (6,0 g/L) foi obtida quando o catalisador utilizado foi o ácido sulfúrico, no tempo de reação mais prolongado (90 minutos). Vale ressaltar os aspectos mencionados por Paula *et al.* (2025), que apontam que hidrolisados provenientes de processos de pré-tratamento ácido de materiais lignocelulósicos têm sido investigados como substratos para a produção biológica de H_2 , visto

que esse é o método mais comum para a conversão de biomassa em açúcares fermentescíveis.

2.3.2.2 Pré-tratamento alcalino

O pré-tratamento alcalino corresponde a um dos métodos mais aplicados para separar a lignina da biomassa lignocelulósica, em razão da sua eficiência na remoção desse constituinte, o que beneficia a conversão das fibras de celulose na hidrólise enzimática. Nesse processo são utilizados compostos como hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), carbonato de sódio (Na₂CO₃), amônia (NH₃), entre outros (Rodrigues *et al.*, 2022). Comparado ao pré-tratamento ácido, essa metodologia utiliza temperaturas e pressões moderadas, além de apresentar baixo custo dos reagentes utilizados.

Conforme atribuído por Reis *et al.* (2024), o pré-tratamento alcalino proporciona o rompimento das ligações de hidrogênio presentes nas cadeias de celulose, atuando como um agente de inchamento para aumentar a área superficial do material e promover a sua despolimerização. Entretanto, como mencionado anteriormente, uma fração da hemicelulose também é degradada durante esse processo, visto que ela está ligada com a lignina. A lignina resultante ao final do processo apresenta uma coloração negra e contém quantidades de enxofre, o que permite seu isolamento por acidificação do licor negro e precipitação (Assis, 2024).

2.3.3 Pré-tratamento biológico

O pré-tratamento biológico envolve a utilização de microrganismos, como fungos, bactérias e associações microbianas, que degradam a biomassa lignocelulósica degradando o material por meio de enzimas celulolíticas, aumentando o acesso à celulose. Essa abordagem apresenta baixo custo energético e reduzida geração de poluentes; entretanto, não se caracteriza como uma alternativa eficiente, pois demanda elevado tempo de residência e resulta em baixos rendimentos de açúcares (Chaves, Carvalho e Oliveira, 2022).

2.3.4 Pré-tratamento hidrotérmico e tratamento com água quente

O pré-tratamento hidrotérmico de resíduos lignocelulósicos tem despertado interesse no âmbito biotecnológico por tratar-se de uma proposta eficiente e ecológica para separação das macromoléculas que compõe as biomassas utilizadas no processo. De forma semelhante, o tratamento com água quente destaca-se como uma alternativa sustentável, tendo em vista que

ambos dispensam o uso de reagentes químicos. Esses métodos promovem o rompimento das ligações estabelecidas entre a lignina e os demais componentes estruturais da biomassa, favorecendo a acessibilidade a celulose (Longati, Manicardi e Baioni, 2024).

Segundo Sun *et al.* (2021), a diferença entre esses métodos consiste está no fato de que, no pré-tratamento hidrotérmico os elevados índices de pressão e temperatura deslocam o equilíbrio da água para a formação de íons de hidrogênio. Em contrapartida, no tratamento com água quente, utiliza-se apenas água em temperaturas elevadas. Assim, ocorre a auto-hidrólise na presença de íons H^+ , gerados a partir da própria água e de grupos acetila provenientes da hemicelulose. Os autores acrescentam que a lignina tem suas ligações β -O-4 quebradas, expondo grupos hidroxila que antes estavam protegidos pela sua estrutura amorfa. Wells *et al.* (2020) aplicaram o tratamento com água quente em capim-elefante, obtendo 73% de glicose a partir da fração sólida do resíduo, sem a presença de inibidores.

Portanto, torna-se essencial entender as diversas vertentes que estão inseridas no pré-tratamento hidrotérmico e no tratamento com água quente para otimizar a aplicação desses métodos em processamentos industriais. As modificações nas frações químicas e no arranjo estrutural influenciam diretamente as etapas seguintes de hidrólise e fermentação, reforçando a importância desses métodos na conversão de biomassa em produtos de valor agregado.

2.4 Análise estatística e planejamento experimental

A análise estatística e o planejamento experimental consistem em técnicas fundamentais na otimização da produção de etanol celulósico, garantindo a obtenção de um processo mais eficiente e economicamente viável. O *Design of Experiments (DOE)* é uma metodologia do planejamento experimental que combina técnicas matemáticas para condução, análise e interpretação de arranjos experimentais (Lopes, Lopes e Faria, 2022). Assim, esse processo avalia os efeitos das variáveis estudadas por meio de métodos como análise de variância – ANOVA, análise de regressão e gráficos, para criar equações que descrevam fenômenos reais em determinada região de interesse (Galvan e Bona, 2024).

Na Tabela 4 apresenta-se um conjunto de variáveis de entrada definidas para análises estatísticas relacionadas à utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de etanol. Nesse sentido, o fator temperatura e tempo aparecem destacados na maioria dos estudos retratando a relevância dessas variáveis no processo de desconstrução da estrutura lignocelulósica. Esse aspecto é confirmado por Santos (2021) ao discorrer que a variável temperatura foi estatisticamente significativa no pré-tratamento hidrotérmico do sabugo de milho. Já Souza

(2023) acrescenta que a junção dos fatores concentração de H_2SO_4 e tempo favorece o pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar, premissa também confirmada por Marinho *et al.* (2020).

Tabela 4. Conjunto de variáveis de entrada definidas para análises estatísticas relacionadas à utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de etanol.

Biomassa	Variáveis de entrada	Referência
Casca de laranja	• Concentração de enzimas; • Tempo.	Rosa e Pinheiro (2021)
Bagaço de cana-de-açúcar	• Concentração de aditivos químicos (Tween 80 e NaOH).	Simões, Brondi e Farinas (2022)
Sabugo de milho	• Tempo; • Temperatura.	Santos (2021)
Bagaço de abacaxi	• Tempo; • Temperatura; • Concentração de aditivos químicos (H_2O_2);	Pereira <i>et al.</i> (2023)
Bagaço de cana-de-açúcar	• Concentração de aditivos químicos (H_2SO_4); • Tempo.	Souza (2023)
Casca de coco	• Concentração de aditivos químicos (H_2SO_4); • Tempo.	Correia (2022)
Palha de cana-de-açúcar	• Tempo; • Temperatura; • Concentração de aditivos químicos (H_2SO_4);	Marinho <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estudo bibliométrico e análise de conteúdo

3.1.1 Método de revisão

Para atingir os objetivos propostos no presente estudo, foi adotada a bibliometria e a análise de conteúdo como métodos de revisão, visando compreender as premissas relacionadas ao pré-tratamento hidrotérmico e ao tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol. A bibliometria é uma ferramenta essencial para o embasamento quantitativo de temas científicos, fornecendo informações detalhadas sobre autores, instituições e palavras-chave, o que facilita a avaliação crítica do tema em análise. Essa metodologia fundamenta-se em três leis principais: a Lei de Bradorford, que trata da identificação dos periódicos mais relevantes em um campo de estudo; a Lei de Zipf, relacionada à frequência de palavras-chave e termos recorrentes nos estudos da área; e a Lei de Lotka, que analisa o impacto da produção científica de um autor dentro de sua especialidade (Chueke; Amatucci, 2022).

A análise de conteúdo foi adotada devido ao seu potencial para identificar lacunas na literatura por meio da análise, classificação e categorização dos conteúdos pertinentes. Teodoro e Oliveira (2024) destacaram que essa metodologia de pesquisa pode ser utilizada para descrever e interpretar conteúdos provenientes de diferentes formas de comunicação. Desenvolvida por Bardin, a análise de conteúdo baseia-se em procedimentos sistemáticos que permitem inferências sobre conteúdos verbais, visuais ou escritos, elucidando questões significativas da investigação e proporcionando conclusões mais embasadas sobre os dados analisados em relação ao tema abordado (Cordeiro *et al.*, 2024).

3.1.2 Coleta de dados

O processo de coleta de dados foi desenvolvido com o objetivo de selecionar publicações de relevância científica, utilizando as bases de dados *Web of Science* e *Scopus*. A escolha dessas bases considerou seu amplo alcance em diversas áreas do conhecimento, como Ciência, Tecnologia, Medicina, Ciências Sociais, entre outras (Sánchez, Vázquez e Riba, 2023). Além disso, ambas oferecem ampla cobertura de artigos relevantes e disponibilizam ferramentas eficientes para o tratamento dos dados obtidos.

Para estruturar a busca bibliográfica, foram definidos dois eixos de pesquisa: (I) Tratamento térmico e (II) Tipo de resíduo lignocelulósico sucroalcooleiro. Em seguida, foram definidas palavras-chave para cada eixo: Eixo I - pré-tratamento hidrotérmico, tratamento com água quente e etanol (*hydrothermal pretreatment, hot water treatment, ethanol*); Eixo II - bagaço de cana-de-açúcar e palha de cana-de-açúcar (*sugar cane bagasse, sugar cane straw*). As palavras-chave dos dois eixos foram combinadas por meio dos operadores booleanos AND e OR resultando na seguinte estratégia de busca: “*hydrothermal pretreatment*” OR “*hot water treatment*” AND “*sugar cane bagasse*” OR “*sugar cane straw*” AND “*ethanol**”. Vale destacar que o “*” foi utilizado para incluir variações e sinônimos do termo *ethanol*, ampliando a abrangência da busca e garantindo maior precisão nos resultados obtidos.

3.1.3 Análise de dados

Para a análise dos dados, foram utilizados os *softwares RStudio* e *Bibliometrix*. O RStudio foi escolhido pelo seu potencial na identificação de artigos duplicados nas bases de dados adotadas, além de ser amplamente utilizado em análises estatísticas e bibliométricas no âmbito acadêmico. Esse *software* opera com a linguagem R, permitindo a realização de cálculos estatísticos e a geração de gráficos para uma melhor compreensão da temática analisada (Santos *et al.*, 2020; Cruz, 2022). Em suma, as buscas resultaram em 2.930 publicações, sendo 1.230 documentos provenientes da *Scopus* e apenas 1.700 da *Web of Science*. Após a remoção de 180 artigos duplicados, o total de publicações consideradas para a análise bibliométrica foi de 2.750, que foram processadas no *software Bibliometrix*.

O Bibliometrix é uma ferramenta de código aberto utilizada para organizar e analisar dados quantitativos da literatura científica, abrangendo os principais conceitos explorados nos artigos. Esse *software* desempenha um papel fundamental nos campos da bibliometria e cientometria, permitindo a análise descritiva dos dados bibliográficos, a criação de redes de acoplamento dos dados (cocitação, colaboração e ocorrência bibliográfica) e a normalização desses dados para identificar padrões de similaridade entre eles (Juvêncio, Silva e Freire, 2024; Moraes, Piovesan e Irala, 2022).

O processo de análise de dados envolveu a definição de critérios para a inclusão das publicações mais relevantes. Inicialmente, as 2.750 publicações passaram por filtros para a seleção de artigos científicos e de revisão, publicados entre 2020 e 2025, em diferentes idiomas, incluindo português, alemão, coreano, inglês, chinês, francês, russo, japonês, turco e espanhol. Esses critérios foram estabelecidos para garantir um alinhamento mais preciso das publicações

com o tema pré-tratamento hidrotérmico e tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol, resultando em 118 artigos. A partir desse conjunto de dados, foram analisados os seguintes aspectos: produção científica anual; produção por país; relevância dos periódicos; autores mais citados; ocorrência das palavras-chave; e, colaboração entre autores. O processo metodológico adotado na pesquisa está ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1. Fluxograma do processo metodológico seguido no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

Definição das bases de dados e palavras-chave:	Processo de filtração:	Análise de Conteúdo:
• Web of Science e Scopus; • String de busca: “hydrothermal pretreatment” OR “hot water treatment” AND “sugar cane bagasse” OR “sugar cane straw” AND “ethanol*”; • Foram encontrados 1.230 artigos na Scopus e 1.700 na Web of Science;	• Foram removidos 180 artigos duplicados; • As 2.750 publicações seguiram para análise bibliométrica; • Foram aplicados filtros quanto a presença de artigos científicos e de revisão, publicados entre 2020 e 2025, em diferentes idiomas, incluindo português, alemão, coreano, inglês, chinês, francês, russo, japonês, turco e espanhol.	• Os 118 artigos foram analisados quanto a presença das palavras-chave nos títulos e nos resumos; • Os critérios de avaliação foram: tipo de tratamento térmico utilizado, melhores condições de processo e mudanças estruturais após o tratamento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise de conteúdo foi realizada utilizando a metodologia do *Proknow-C*, estabelecida por Linhares *et al.* (2019), com modificações. Para tanto, o portfólio bibliográfico com 118 publicações passou por uma seleção quanto a presença das palavras-chave utilizadas na construção da pesquisa. Logo, os títulos e os resumos desses materiais foram lidos na íntegra buscando o reconhecimento desses termos. Assim, 23 artigos foram selecionados para análise de conteúdo, buscando a identificação de parâmetros de processo relevantes, bem como as nuances que envolvem a relação estabelecida entre o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

3.2 Obtenção e preparação dos resíduos

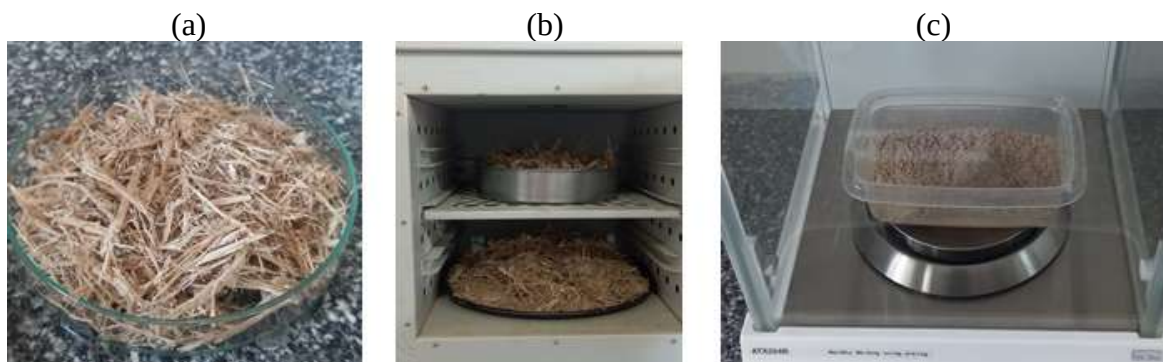
As amostras de palha e bagaço de cana-de-açúcar foram cedidas pela Usina Monte Alegre, conforme descrito no Anexo I, situada no município de Mamanguape-PB, e encaminhadas ao Laboratório de Materiais e Química Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (LABMAQ/UFPB). Inicialmente, os materiais passaram por processos de secagem e uniformização. A secagem foi realizada em uma estufa com circulação e renovação de ar (MARCONI-MA035) a 105 °C por 3 h, visando a remoção da umidade. Em seguida, os resíduos lignocelulósicos foram moídos em um moinho de facas (SOLAB – SL31) e, posteriormente, peneirados em uma peneira granulométrica de 40 *mesh* ABNT (abertura de 427 μm). Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os registros fotográficos das amostras de palha e bagaço de cana-de-açúcar utilizadas neste trabalho.

Figura 6. Amostras de palha de cana-de-açúcar: (a) “*in natura*”, (b) secagem e (c) resíduo uniformizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 7. Amostras de bagaço de cana-de-açúcar: (a) “*in natura*”, (b) secagem e (c) resíduo uniformizado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.3 Caracterização dos resíduos lignocelulósicos

3.3.1 *Análise imediata e elementar*

A análise imediata consiste na determinação da umidade, teor de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo. Para a determinação da umidade (U), aproximadamente 1 g dos resíduos foi pesado em uma balança de umidade (A&D COMPANY-MS50), seguindo o método %U da norma ASTM E1755-24. A quantificação do teor de cinzas (Z) foi realizada de acordo com a norma ASTM E1755-24, mediante calcinação da amostra em mufla (QUIMIS – Q318M) por 250 °C por 30 minutos e, posteriormente, a 550 °C até atingir peso constante. O teor de materiais voláteis (MV) foi calculado conforme a norma ASTM E872-24, sendo o material aquecido em mufla (QUIMIS – Q318M) a 950 °C por 7 minutos em atmosfera inerte. Por fim, o teor de carbono fixo (CF) foi determinado utilizando a Equação 1, e os valores foram expressos em base seca.

$$CF = 100 - Z (\%) - MV(\%) \quad (1)$$

Em que:

- CF: percentual em massa de carbono fixo (%);
- MV: percentual de matéria volátil presente no material (%);
- Z: percentual de cinzas presente no material (%).

Os índices de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), em base seca, foram determinados por meio das Equações 2, 3 e 4 seguindo as premissas citadas por Shen, Gu e Bridgwater (2010).

$$C = 0,635 * CF + 0,460 * MV - 0,95 * Z \quad (2)$$

$$H = 0,059 * CF + 0,060 * MV + 0,010 * Z \quad (3)$$

$$O = 0,340 * CF + 0,469 * MV - 0,023 * Z \quad (4)$$

3.3.2 *Poder calorífico superior e inferior*

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), foi utilizada uma bomba

calorimétrica IKA C200, seguindo os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D5865M-19. O método consiste na combustão completa da amostra em uma cápsula hermética sob atmosfera controlada, o que permite a medição precisa do calor liberado. Já o poder calorífico inferior (PCI) foi estimado utilizando a Equação 5, a qual considera o teor de H% determinado na seção anterior, possibilitando a avaliação do potencial energético da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.

$$\text{PCI} = \text{PCS} - (0,2183 \times \text{H}\%) \quad (5)$$

3.3.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR)

A espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR) foi realizada utilizando a técnica de *Attenuated Total Reflectance* (ATR) com o objetivo de analisar a interação da radiação eletromagnética com os componentes presentes na palha e no bagaço de cana-de-açúcar. Essa técnica permite identificar variações e modos de interação molecular dos grupos funcionais presentes nos resíduos. As análises foram realizadas em um espectrofotômetro (Shimadzu – IRPrestige – 21), com o comprimento de onda variando de 600 a 4000 cm^{-1} .

3.3.4 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

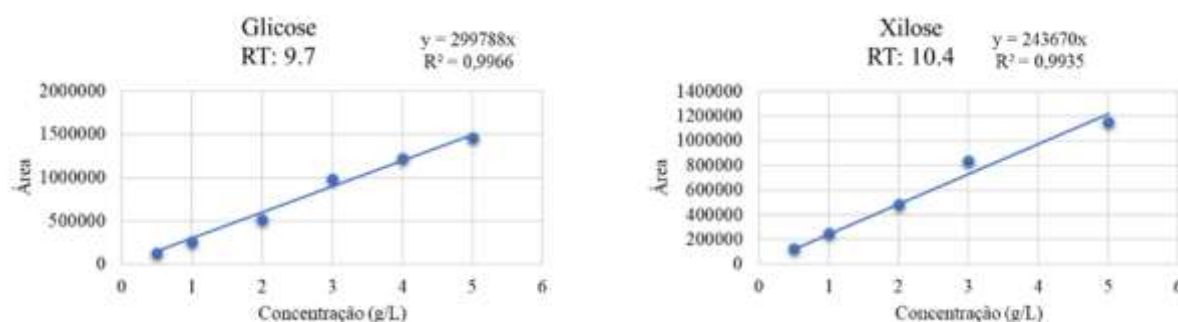
As análises termogravimétricas (TG/DTG) foram realizadas para a amostra de melhor desempenho no tratamento com água quente, tendo como objetivo a caracterização térmica e a confirmação das alterações estruturais promovidas pelo tratamento. As análises foram realizadas utilizando 10 mg das amostras, sendo acondicionadas em um suporte de alumina. As condições experimentais foram razão de aquecimento a 10°C/minuto, numa variação de temperatura, partindo da ambiente a 1000°C, sob uma atmosfera de gás nitrogênio, com vazão de 100mL/minuto. Vale ressaltar que a análise termogravimétrica foi realizada apenas para essas amostras em decorrência de limitações operacionais do laboratório, que impossibilitaram a execução de ensaios adicionais no equipamento durante o período experimental.

3.3.5 Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC)

A identificação e quantificação dos compostos presentes nos hidrolisados, obtidos a partir dos tratamentos, foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), coluna

HPX87H (BIO-RAD), nas seguintes condições: temperatura 35 °C, fase movel H₂SO₄ 5 mM, fluxo 0,6 mL/min e o volume de injeção de 20 uL. A quantificação dos componentes presentes nos licores, glicose e xilose, foi realizada tendo como base as curvas de padrão expressas na Figura 8.

Figura 8. Curvas padrão para determinação de glicose, xilose no HPLC.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4 Planejamento experimental fatorial completo

3.4.1 No tratamento com água quente

Nesta seção são descritos os sete passos da pesquisa experimental aplicados à modelagem e otimização de processos, seguindo as premissas citadas por Montgomery (2013). A definição do problema, primeiro passo proposto, foi determinada estabelecendo como objetivo a otimização do pré-tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar visando à produção de etanol. Posteriormente, foram adotadas as variáveis dependentes ou respostas, sendo a concentração de açúcares redutores e o rendimento do pré-tratamento.

Entre os passos estabelecidos na pesquisa, destaca-se a definição dos fatores analisados/variáveis independentes e de seus respectivos níveis, incluindo variáveis como tempo (20 e 80 min, com ponto central em 50 min), temperatura (60 e 100 °C, com ponto central em 80°C) e proporção da relação entre os resíduos palha e bagaço de cana-de-açúcar (25 e 75%, com ponto central em 50 %). Para tanto, realizou-se o planejamento experimental fatorial completo ²³, com três pontos centrais e nove combinações, totalizando 11 ensaios. Nas Tabelas 5 e 6 estão descritos os níveis experimentais e a matriz do planejamento experimental, respectivamente.

Os últimos passos constituem a execução dos experimentos e a análise estatística dos dados obtidos, avaliando a influência das variáveis independentes sobre as respostas. Assim,

foram estabelecidas conclusões e recomendações por meio das condições mais favoráveis à otimização do processo.

Tabela 5. Níveis codificados utilizados no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

Fatores	Níveis experimentais		
	-1	0	+1
Tempo (min)	20	50	80
Temperatura (°C)	60	80	100
	25	50	75
Proporção palha/bagaço (%)	(10g palha/ 30g bagaço)	(20g palha/ 20g bagaço)	(30g palha/10g bagaço)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Tabela 6. Matriz do planejamento fatorial completo 2³ aplicado ao tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

Ensaio	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Proporção (%)
1	20 (-1)	60 (-1)	25 (-1)
2	80 (+1)	60 (-1)	25 (-1)
3	20 (-1)	100 (+1)	25 (-1)
4	80 (+1)	100 (+1)	25 (-1)
5	20 (-1)	60 (-1)	75 (+1)
6	80 (+1)	60 (-1)	75 (+1)
7	20 (-1)	100 (+1)	75 (+1)
8	80 (+1)	100 (+1)	75 (+1)
9	50 (0)	80 (0)	50 (0)
10	50 (0)	80 (0)	50 (0)
11	50 (0)	80 (0)	50 (0)

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

3.4.2 Projeção do Steepest Ascent

Com base nos resultados obtidos no planejamento experimental atribuído ao tratamento com água quente, o método do *Steepest Ascent* foi aplicado com objetivo de avaliar a existência de uma direção de máxima resposta que indicasse melhorias adicionais na liberação de açúcares redutores, além de confirmar a proximidade da região ótima já identificada. Nesse âmbito, Montgomery (2013) destaca a atribuição de passos, no modelo de primeira ordem, a serem dados de acordo com o coeficiente de regressão.

Na Tabela 7 está apresentada a matriz do planejamento experimental utilizada na aplicação do método *Steepest Ascent* no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

Tabela 7. Projeção do método *Steepest Ascent* no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

Ensaio Origem Passo	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Proporção (%)
	50 + 5,0	80 - 5,0	50 +7
1	55	75	57
2	60	70	64
3	65	65	71
4	70	60	78
5	75	55	85
6	80	50	92
7	85	45	99

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.4.3 No pré-tratamento hidrotérmico

O pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar foi conduzido com o objetivo de avaliar a influência da pressão na solubilização dos componentes lignocelulósicos da biomassa. Os experimentos seguiram os passos da pesquisa experimental aplicados à modelagem e otimização de processos, conforme descrito na seção 3.4.1. Para o delineamento experimental, adotou-se um planejamento fatorial 2^2 , com três replicações no ponto central. Os ensaios foram realizados em autoclave sob pressão de 1 bar, avaliando como variáveis independentes o tempo de residência (20 e 80 min, com ponto central em 50 min) e a proporção de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar (50% e 90%, com ponto central em 70%), analisando os efeitos desses índices sobre a liberação de açúcares redutores e o rendimento da fração sólida.

Na Tabela 8 está apresentada a matriz do planejamento experimental utilizada no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar, contemplando as combinações dos níveis e das variáveis independentes avaliadas em cada ensaio.

Tabela 8. Matriz do planejamento fatorial 2^2 aplicado ao pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

Ensaio	Tempo (min)	Proporção (%)
1	20 (-1)	50 (-1)
2	80 (+1)	50 (-1)
3	20 (-1)	90 (+1)
4	80 (+1)	90 (+1)
5	50 (0)	70 (0)
6	50 (0)	70 (0)
7	50 (0)	70 (0)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

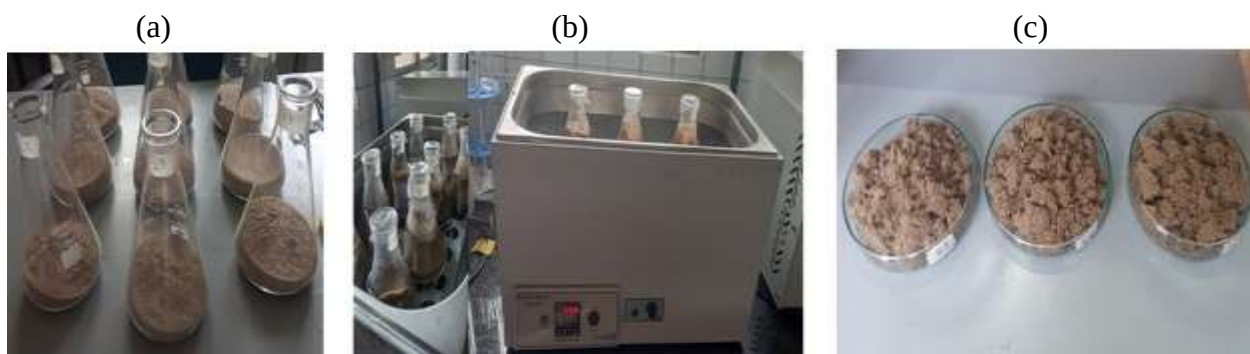
3.5 Tratamentos térmicos aplicados à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar

3.5.1 Tratamento por água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar

O tratamento com água quente foi realizado em banho termostático (CIENLAB), empregando as condições de tratamento definidas no planejamento experimental. Para isso, foram adicionados 40 g do resíduo uniformizado em *erlenmeyers* de 500 mL, juntamente com 400 mL de água destilada. A mistura foi devidamente homogeneizada, vedada com filme plástico e transferida ao banho termostático sob os parâmetros descritos na Tabela 5. Todos os ensaios foram conduzidos em triplicata para assegurar a confiabilidade dos resultados.

Após o tratamento com água quente, as amostras foram submetidas à filtração em tecido de algodão, resultando em frações: sólida e líquida. A fração sólida foi lavada duas vezes com 200 mL de água destilada. Em seguida, o material foi seco em estufa a 105 °C por 12 horas e posteriormente pesado para quantificação do rendimento do processo. A fração líquida, por sua vez, foi armazenada em tubos Falcon de 15 mL e encaminhada para análise de açúcares redutores, visando identificar a concentração máxima dessas moléculas, indicador da eficiência do tratamento proposto. O processo completo de tratamento segue ilustrado na Figura 9.

Figura 9. Etapas do tratamento térmico com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar: (a) amostras antes do tratamento, (b) processo em banho termostático, (c) fração sólida resultante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os ensaios conduzidos pelo método do *Steepest Ascent* foram realizados utilizando as mesmas vidrarias, equipamentos e condições experimentais descritas para o tratamento com água quente. Entretanto, variando apenas os níveis das variáveis conforme a estratégia de otimização adotada.

3.5.2 Pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar

O pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço da cana-de-açúcar foi conduzido de forma análoga ao tratamento com água quente descrito na seção 3.5.1, diferenciando-se pela aplicação de pressão e das proporções empregadas no processo. Os ensaios foram realizados com apoio do Laboratório de Microbiologia do Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional (CTDR – UFPB). Os experimentos foram realizados seguindo a matriz do planejamento experimental, utilizando 40 g de resíduo e 400 mL de água destilada. Após homogeneização, o material foi vedado e colocado em autoclave sob pressão de 1 bar.

Concluído o tempo de reação, a mistura foi filtrada. A fração líquida foi encaminhada para análise de açúcares redutores, enquanto a fração sólida foi lavada duas vezes com 200 mL de água destilada para remoção de possíveis impurezas. Em seguida, o material sólido foi seco em estufa a 105°C por 12 horas, permitindo a determinação do rendimento do processo. Por fim, as amostras secas foram armazenadas em sacos plásticos para as etapas subsequentes.

3.6 Avaliação do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares

A avaliação do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares foi realizada por gravimetria, tendo como base a diferença de peso antes e após os tratamentos empregados à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar, de acordo com as Equações 6 e 7 conforme estabelecido por Gade *et al.* (2025).

$$y = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

- y: Rendimento da fração sólida (%);
- M_f: Massa final da amostra após o tratamento (g);
- M_i: Massa inicial da amostra antes do tratamento (g).

$$Scm = 100 - y \quad (7)$$

Em que:

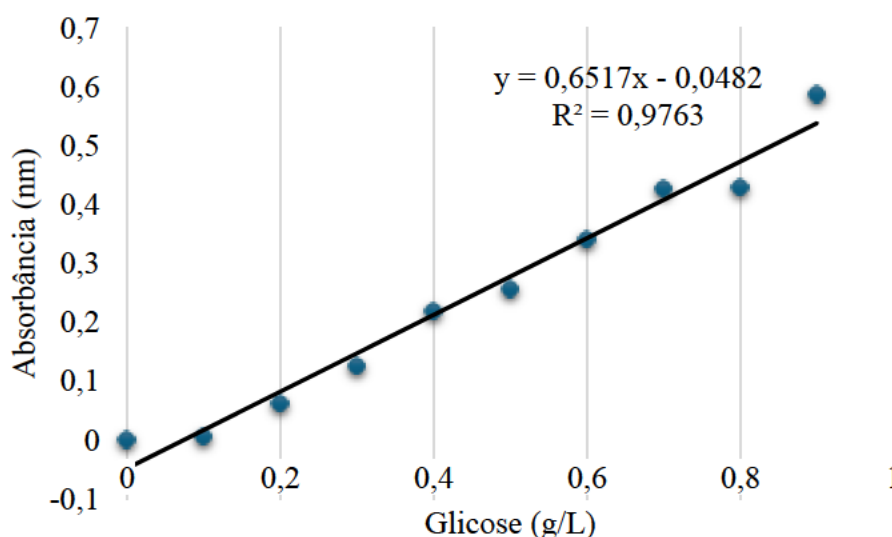
- Scm: Solubilização dos componentes macromoleculares da palha e do bagaço de cana-de-açúcar (% m/m);
- y: Rendimento da fração sólida (%).

3.7 Análise de açúcares redutores

A fração líquida obtida após os tratamentos realizados foi centrifugada em centrífuga de bancada (CE – 1161) a 400 rpm por 5 minutos, visando à separação do sobrenadante e dos sedimentos ainda presentes. A análise de açúcares redutores foi realizada segundo o método descrito por Miller (1959), com algumas adaptações. Dessa forma, construiu-se de uma curva padrão de glicose, determinando a equação da reta para cálculo dos açúcares redutores. A partir de uma solução padrão de glicose, foram preparadas diluições entre 0,1 e 1,0 g/L. Os ensaios foram compostos por 1 mL de cada diluição e 1 mL de DNS (Ácido 3,5-dinitrosalicílico), acondicionados em tubos Falcon de 15 mL. Em seguida, os tubos foram submetidos a banho termostático a 100 °C por 5 minutos. Após o aquecimento, as amostras foram resfriadas em banho de gelo e receberam a adição de 4 mL de água destilada. Após homogeneização, as leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro a 540 nm.

Na Figura 10 descreve-se a curva de calibração construída com base na relação entre a absorbância (540 nm) e a concentração de glicose no meio (g/mL). Destaca-se que o coeficiente de correlação (R^2) foi próximo de 1, indicando um ajuste adequado ao modelo.

Figura 10. Curva padrão de glicose para determinação da concentração de açúcares redutores no pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço para produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A análise de açúcares redutores foi realizada transferindo-se 0,5 mL do sobrenadante para tubos Falcon contendo 0,5 mL do reagente DNS. Vale ressaltar que todas as análises foram

executadas em triplicata. Em seguida, as amostras foram submetidas a um banho termostático a 100 °C por 5 minutos para permitir a reação. Posteriormente, os tubos foram resfriados e adicionaram-se 4 mL de água destilada às amostras. Após homogeneização, as leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro a 540 nm.

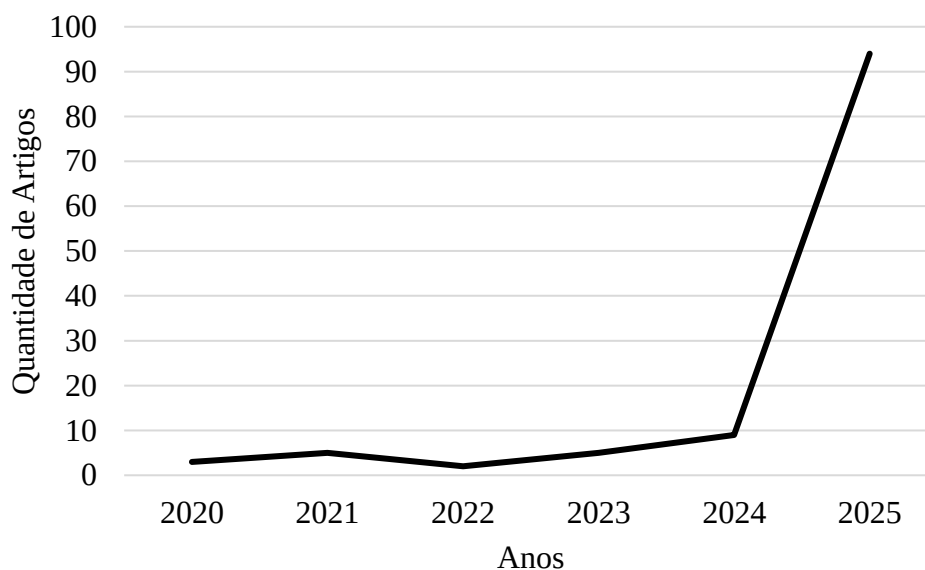
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo bibliométrico e análise de conteúdo

As pesquisas acadêmicas são desenvolvidas por meio de documentos científicos que embasam o referencial teórico sobre um determinado tema, permitindo a identificação de lacunas na literatura (Peixe; Pinto, 2021). Nesse contexto, a bibliometria e a análise de conteúdo foram aplicadas para obter *insights* mais aprofundados sobre o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar na produção de etanol.

O aspecto temporal das publicações analisadas está apresentado na Figura 11. O ano de 2025 registrou o maior número de publicações, totalizando 94 artigos, o que representa 79,66% dos 118 documentos analisados. Esse aumento pode estar relacionado ao aumento da demanda global por combustíveis de baixo carbono. Por outro lado, o ano de 2022 registrou o menor número de publicações, com apenas 2 artigos, correspondendo a 1,69% do total. Nota-se uma tendência de crescimento entre os anos de 2023 a 2025, possivelmente impulsionada pelo crescente interesse em alternativas sustentáveis alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma pauta cada vez mais relevante no cenário global.

Figura 11. Evolução da produção científica entre os anos de 2020 e 2025 sobre o tema pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2025).

Referente aos periódicos de maior relevância, na Tabela 9 estão descritas as 10 principais fontes que abordam o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol, bem como seus respectivos fatores de impacto. É importante destacar os aspectos discutidos por Pliego (2023) sobre a aplicação do fator de impacto e do fator de influência como métricas fundamentais para a avaliação científica de periódicos, uma vez que ambos refletem princípios essenciais de boas práticas científicas. Portanto, os periódicos *Bioresource Technology*, *Chemical Engineering Journal* e *Industrial Crops and Products* foram os que apresentaram o maior número de publicações, com 5 artigos em cada periódico. O *Bioresource Technology* e o *Chemical Engineering Journal* registraram os maiores fatores de impacto, com 9.0 e 13.2, respectivamente. Esses periódicos se destacam por abordarem o aproveitamento de biomassa e outras matérias-primas em processos de conversão termoquímica, proteção ambiental e modelagem para a produção de biocombustíveis.

Tabela 9. Relevância dos periódicos e seus respectivos fatores de impacto no estudo do pré-tratamento hidrotérmico e do tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.

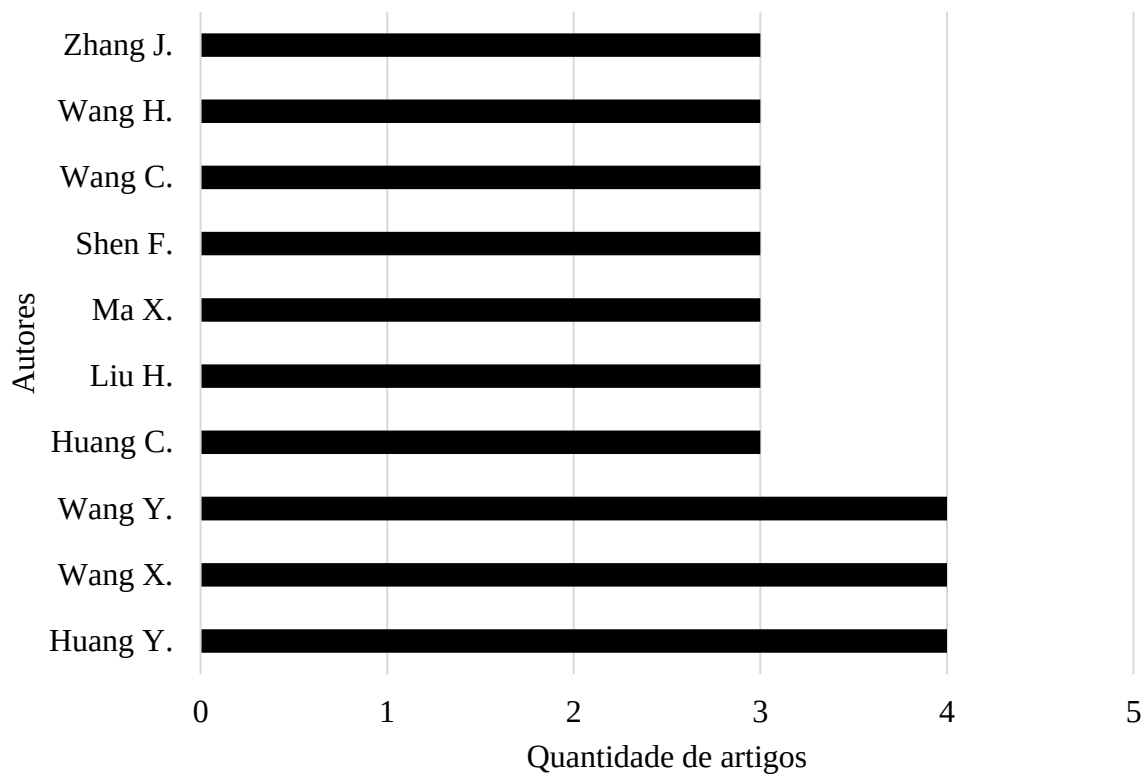
Periódicos	Artigos	Fator de Impacto
Bioresource Technology	5	9.0
Chemical Engineering Journal	5	13.2
Industrial Crops and Products	5	6.2
Bioenergy Research	4	3.0
Waste and Biomass Valorization	4	2.8
Biofuels Bioproducts \& Biorefining-biofpr	3	2.9
Biomass \& Bioenergy	3	5.8
Energy \& Fuels	3	5.3
International Journal of Biological Macromolecules	3	8.5
Journal of Environmental Chemical e Engineering	3	7.2

Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2025).

A etapa subsequente da análise bibliométrica consiste na verificação dos principais autores com base na quantidade de artigos publicados entre os anos de 2020 a 2025 abordando o tema da pesquisa, conforme descrito na Figura 12. Os autores Huang Y., Wang X. e Wang Y. foram os mais prolíferos, com 4 publicações cada autor. Além disso, artigos como “*Continuous enzymatic saccharification and its rheology profiling under high solids loading of lignocellulose biomass*” e “*Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept*”, dos autores Wang Y. e Kumar V., apresentam números consideráveis de citações e abordam as tecnologias de pré-tratamento

aplicadas à biomassa lignocelulósica, em conjunto com a presença de inibidores operacionais gerados em cada etapa do processo.

Figura 12. Principais autores por quantidade de artigos publicados entre os anos de 2020 e 2025 abordando o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor com uso do Bibliometrix (2025).

Na etapa seguinte, a Figura 13 destaca os 06 *clusters* (grupos) resultantes da análise de coautoria, dispondo a correlação existente entre os autores por meio do *software* Bibliometrix. Observa-se que os grupos expressos em verde, vermelho e azul apresentam uma relação de coautoria, indicada pela presença de *links* entre os resultados. Dessa forma, é possível inferir que esses autores colaboraram entre si como coautores de alguns artigos científicos. Ao correlacionar os resultados, verifica-se que autores como Wang Y., Huang Y. e Wang X. aparecem entre os que mais publicaram e exibem uma correlação que sugere colaboração na temática de produção de etanol celulósico.

solução eficaz para o fracionamento dos componentes da biomassa, resultando na remoção da hemicelulose e na reorganização da lignina na parede celular vegetal (Jo; Kim; Lee, 2025). A depender do tipo de pré-tratamento adotado, a lignina pode migrar para a superfície da biomassa e formar partículas hidrofóbicas ao redor das microfibras de celulose, dificultando o processo (Simonsen; Djajadi; Thomsen, 2025; Long *et al.*, 2025; Hu *et al.*, 2025).

Manokhoon *et al.* (2023) destacaram os diversos tipos de pré-tratamentos aplicados à biomassa lignocelulósica, contemplando abordagens químicas (alcalino e ácido), físicas, em duas etapas, com uso de sais orgânicos, além de métodos hidrotérmicos. Nesse cenário, Anand *et al.* (2025) explicam que os métodos hidrotermais possuem vantagens econômicas e operacionais quanto ao baixo custo, eficiência energética, ausência da necessidade de reciclagem de produtos e menor impacto ambiental. Em contrapartida, os demais métodos de pré-tratamento apresentam limitações relacionadas a degradação da celulose, agressividade do processo, consumo energético e menor eficiência na recuperação do sólido.

Conforme estabelecido por An *et al.* (2025) o pré-tratamento hidrotérmico reduz significativamente a resistência biológica da biomassa, resultando em um aumento expressivo de açúcares. Além disso, o processo promove o rompimento das ligações éter e éster, presentes entre o complexo hemicelulose-lignina, facilitando o ordenamento cristalino das fibras de celulose. Já Alves *et al.* (2025) acrescentam que esse processo expõe a biomassa a altas temperaturas e pressões, promovendo a desconstrução do complexo celulose, hemicelulose e lignina. Ma *et al.* (2025) discorrem que o pré-tratamento hidrotérmico utiliza temperaturas situadas entre 140 a 220 °C, promovendo a quebra da hemicelulose em oligossacarídeos solúveis e ácidos orgânicos, o que reduz o pH do sistema e facilita a auto-hidrólise das ligações glicosídicas.

Chireshe, Petersen e Görgens (2025) destacam que o tratamento com água quente associado a reciclagem térmica e a nanofiltração corresponde a solução mais equilibrada entre custo operacional e sustentabilidade ambiental. Os autores especificam que o processo ocorre com o uso de água em altas temperaturas, sem a aplicação da pressão, para solubilizar a biomassa. Zhang *et al.* (2025) fazem referência a essa metodologia destacando seu potencial no aumento de 30 a 50% do rendimento de glicose em comparação com o pré-tratamento com ácido. Vale ressaltar que as variáveis de tempo e temperatura influenciam diretamente a extração de açúcares, proteínas e ácidos graxos em biorrefinarias, como elencado por Rouabhia *et al.* (2025).

É importante frisar as premissas citadas por Pińkowska *et al.* (2024) ao reforçarem a aplicação de técnicas estatísticas para modelagem e otimização do processo de produção do

etanol lignocelulósico. Assim, a Otimização de Design Experimental (DOE) permite identificar as variáveis do pré-tratamento que maximizam a obtenção de açúcares redutores. Os autores identificaram temperaturas ideais em torno 174 a 200 °C, trabalhando o pré-tratamento hidrotérmico atrelado ao uso de ácido diluído para a obtenção de monossacarídeos e 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), produtos essenciais para a indústria química e de biocombustíveis. Em contraste, Manzoor, Elsayed e Hassan (2025) realizaram o pré-tratamento hidrotérmico do sabugo de milho utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), determinando a temperatura ideal na faixa de 160 °C a 90 minutos.

Referente aos aspectos ambientais, Salimifard *et al.* (2025) retratam que a economia circular e a sustentabilidade no âmbito industrial estão fortalecidas pela metodologia do resíduo zero. Assim, estimulando o uso de resíduos como bagaço e palha de cana-de-açúcar em processos para obtenção de produtos de valor agregado, como biocombustíveis e insumos químicos. Similarmente, Sushkova (2025) destaca a importância da integração de coprodutos no setor açucareiro para reduzir o custo de produção do bioetanol, evidenciando o xilitol utilizado na indústria alimentícia e farmacêutica, bem como os xilo-oligossacarídeos que atuam como probióticos.

Em síntese, a literatura evidencia que o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente são alternativas eficientes e ambientalmente sustentáveis na valorização de biomassas lignocelulósicas, como palha e bagaço de cana-de-açúcar, para a produção de etanol. Os trabalhos analisados abordam a desconstrução da matriz vegetal, destacando a solubilização da hemicelulose e a reorganização da lignina, aumentando a acessibilidade à celulose. Logo, a ausência de reagentes químicos agressivos, atrelada a técnicas de otimização estatística reforçam a implementação dos métodos como alternativas promissoras alinhadas aos princípios da sustentabilidade industrial. Além disso, as escolhas das variáveis de processamento são fatores determinantes para o desempenho e a viabilidade dos processos abordados.

4.2 Caracterização dos resíduos lignocelulósicos: análise imediata e elementar

Na Tabela 10 estão descritos os resultados da análise imediata, referentes aos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo para a palha e o bagaço de cana-de-açúcar, visando à produção de etanol de segunda geração por meio de processos térmicos.

Tabela 10. Resultados da análise imediata da palha e do bagaço de cana-de-açúcar visando à produção de etanol.

Biomassa	Umidade (%)	Cinzas (%)	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)
Palha de cana-de-açúcar	15,7	4,8	83,6	11,6
Bagaço de cana-de-açúcar	21,4	6,3	83,4	10,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme observado nos resultados, o teor de umidade da palha de cana-de-açúcar permaneceu abaixo de 16%, apresentando valor semelhante ao de outras biomassas destacadas na Tabela 11. Em contrapartida, o bagaço de cana-de-açúcar apresentou uma umidade de 21,4%, o que difere do resultado obtido por Magalhães *et al.* (2023), que, ao trabalharem com o mesmo resíduo, determinaram uma umidade de 12,1%. Assim, o índice de umidade é um aspecto importante no uso de biomassa como combustível, pois prejudica o armazenamento devido à proliferação de microrganismos, além de indicar uma relação inversa com o poder calorífico (Nalevaiko, Cremonez e Teleken, 2021).

O teor de cinzas encontrado foi de 4,8% para a palha de cana-de-açúcar e 6,3% para o bagaço de cana-de-açúcar. Processos termoquímicos são beneficiados por baixos teores de cinzas, pois isso reduz a deposição e acúmulo nos reatores durante a conversão térmica da biomassa. Os valores determinados são semelhantes aos resultados de Alves (2020) para a palha de cana-de-açúcar. No entanto, no caso do bagaço, é possível inferir que o elevado índice de cinzas tenha sido causado pela umidade presente no material, o que dificultou a separação entre a matéria orgânica e inorgânica.

Tabela 11. Resultados referentes a análise imediata de outras biomassas aplicadas a produção de etanol.

Biomassa	Umidade (%)	Cinzas (%)	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Referência
Palha de cana-de-açúcar	12,3	4,6	78,1	17,3	Alves (2020)
Capim Elefante BRS	5,2	8,7	72,9	18,5	Petricoski, Costa e Oliveira (2024)
Sorgo Forrageiro	11,1	3,2	76,0	20,8	Melo <i>et al.</i> (2023)
Sorgo lignocelulósico	6,1	3,9	77,8	18,1	Silva <i>et al.</i> (2022)
Bagaço de cana-de-açúcar	12,1	3,1	85,1	11,7	Magalhães <i>et al.</i> (2023)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O índice de materiais voláteis encontrado foi de 83,6 % para a palha de cana-de-açúcar e 83,4 % para o bagaço. Os materiais voláteis compreendem os componentes que são facilmente vaporizados durante a decomposição da matriz lignocelulósica desses resíduos. Nesse contexto, esses componentes possuem um papel importante no processo de ignição para degradação da biomassa, pois uma grande quantidade de carbono é formada durante a decomposição (Juppa *et al.*, 2024). Quanto ao carbono fixo, a palha de cana-de-açúcar apresentou um teor de 11,6 %, enquanto o bagaço apresentou 10,3 %, sendo esse aspecto relacionado à quantidade de energia presente no material. Assim, levando a inferir que, quanto maior o índice de carbono fixo, maior será o tempo de queima e a eficiência do material.

Os resultados observados na análise imediata estão alinhados com os dados encontrados para análise elementar, descritos na Tabela 12, que contemplam os índices de carbono, hidrogênio e oxigênio, reforçando a relação entre a composição química e o comportamento térmico dos materiais em estudo.

Tabela 12. Análise elementar das amostras de palha e bagaço de cana-de-açúcar “*in natura*”.

Biomassa	Hidrogênio (%)	Carbono (%)	Oxigênio (%)
Palha de cana-de-açúcar	5,74	41,26	43,04
Bagaço de cana-de-açúcar	5,67	38,91	42,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A palha de cana-de-açúcar apresentou os maiores percentuais de carbono (41,26 %), oxigênio (43,04 %) e hidrogênio (5,74 %), resultados semelhantes aos determinados por Melo *et al.* (2023), ao trabalharem as frações de hidrogênio e carbono no sorgo forrageiro (6,33 %H; 42,81 %C), e por Silva (2024), com a proporção de oxigênio na palha de arroz (45,88 %O). O bagaço de cana-de-açúcar indicou o menor índice de carbono (38,91 %) e alta concentração de oxigênio (42,47 %), seguido pelo hidrogênio (5,67 %). Vale ressaltar que o índice de oxigênio para a palha de cana-de-açúcar foi superior ao determinado por Alves (2020), que encontrou 40,93% para esse mesmo resíduo. A proporção de carbono identificada na palha e no bagaço de cana-de-açúcar evidencia a composição da estrutura química, rica em compostos orgânicos, como celulose e hemicelulose, que são potenciais fontes de açúcares fermentescíveis, além da lignina.

4.3 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico refere-se à quantidade de energia liberada na forma de calor quando a biomassa é completamente queimada. Vieira e Farias (2021) explicam que o poder calorífico inferior (PCI) considera a energia liberada no processo, no qual a água é expelida na forma de vapor, enquanto o poder calorífico superior (PCS) inclui a energia adicional proveniente da condensação completa da água presente nos gases de combustão. Na Tabela 13 estão evidenciados os resultados determinados para análise de poder calorífico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. Nesse contexto, o PCS encontrado para a palha foi de 18,43 MJ/Kg e para o bagaço de 18,46 MJ/Kg. Quanto ao PCI, a palha de cana-de-açúcar apresentou 17,17 MJ/Kg e o bagaço 17,22 MJ/Kg. Esses resultados foram superiores aos descritos por Coelho *et al.* (2019), que trabalharam com bagaço de cana-de-açúcar determinando um PCS de 18,16 MJ/Kg, e aos valores abordados por Canettieri *et al.* (2018), com um PCS de 17,3 MJ/Kg para a palha de cana-de-açúcar, destacando o potencial desses resíduos derivados do processamento de cana-de-açúcar como potenciais fontes de energia.

Tabela 13. Poder calorífico dos resíduos lignocelulósicos analisados.

Biomassa	PCS (MJ/Kg)	PCI (MJ/Kg)
Palha de cana-de-açúcar	18,43	17,17
Bagaço de cana-de-açúcar	18,46	17,22

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4 Avaliação dos tratamentos térmicos aplicados à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar

4.4.1 Tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar

Conforme mencionado anteriormente, o objetivo do pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos é remover frações indesejáveis, facilitando o acesso à celulose, polímero linear de glicose, viabilizando a produção de etanol celulósico. Nesse contexto, a identificação dos açúcares redutores liberados no processo de tratamento é fundamental para viabilizar os processos subsequentes de hidrólise enzimática, fermentação e destilação. Assim, na Tabela 14 estão apresentados os resultados da análise de Açúcares Redutores Totais – ART obtidos após a aplicação do tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. Observa-se que o ensaio 6, realizado a 60 °C por 80 min e com uma proporção de 75 % entre palha e bagaço de cana-de-açúcar, resultou na maior liberação de açúcares redutores entre todos os

ensaios, atingindo 5,50 g/L.

A literatura denota diversos níveis de açúcares redutores atribuídos a aplicação do tratamento com água quente. Nesse contexto, Jimenez-Gutierrez *et al.* (2021) trabalharam a aplicação desse método em lascas de madeira, determinando uma concentração de 2,33 g/L para açúcares redutores, na escala laboratorial, após 120 minutos de tratamento. Já Souza *et al.* (2023), em função da aplicação da variável pressão, demonstraram resultados promissores ao trabalharem resíduos como casca de abacaxi e bagaço de maçã, seguindo o tratamento com explosão a vapor com pressão de 1,8 Kgf/cm² e temperatura de 130 °C por 15 min, obtendo 9,6 g/L para o resíduo de abacaxi e 18,8 g/L para o bagaço de maçã.

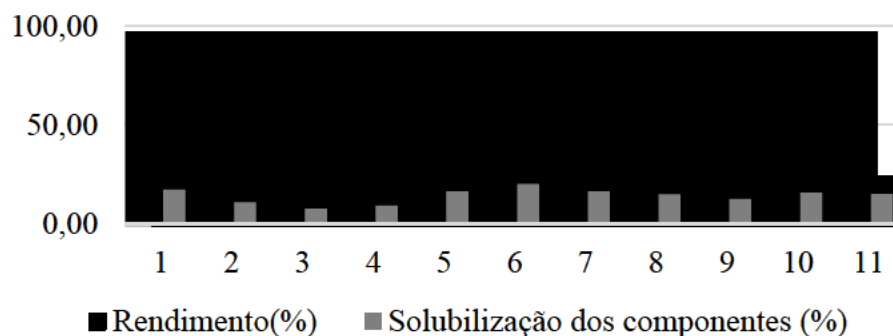
Tabela 14. Resultados obtidos com a fração líquida após o pré-tratamento com água quente do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.

Ensaio	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Proporção (%)	ART (g/L)
1	20 (-1)	60 (-1)	25 (-1)	2,72
2	80 (+1)	60 (-1)	25 (-1)	2,40
3	20 (-1)	100 (+1)	25 (-1)	1,62
4	80 (+1)	100 (+1)	25 (-1)	2,12
5	20 (-1)	60 (-1)	75 (+1)	3,79
6	80 (+1)	60 (-1)	75 (+1)	5,50
7	20 (-1)	100 (+1)	75 (+1)	3,47
8	80 (+1)	100 (+1)	75 (+1)	4,31
9	50 (0)	80 (0)	50 (0)	3,25
10	50 (0)	80 (0)	50 (0)	2,89
11	50 (0)	80 (0)	50 (0)	2,76

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O rendimento e a solubilização dos componentes macromoleculares correspondem a um indicativo importante da eficiência do tratamento com água quente proposto; os resultados estão expressos na Figura 16.

Figura 16. Resultado do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares para o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A redução do rendimento mássico está associada a maior solubilização dos componentes do complexo lignocelulósico durante o processo de tratamento, refletindo na remoção parcial de frações da hemicelulose e da lignina. Correlacionando os ensaios, o experimento 6 indicou o menor rendimento da fração sólida (79,71 %) e a maior solubilização dos componentes macromoleculares (20,29 %). Consequentemente, destacou-se como o ensaio que apresentou maior liberação de açúcares. Acredita-se que esse aspecto possa ser atribuído às condições experimentais que o ensaio foi exposto, como o tempo de 80 min, temperatura de 60 °C e 75 % na proporção de palha e bagaço de cana-de-açúcar utilizada. Os ensaios 2, 3 e 4 apresentaram as menores concentrações de açúcares redutores, consequentemente, demonstraram os maiores índices de rendimento mássico (88,99 % - 92,10 % - 90,62 %), indicando pouca remoção do complexo celulose, hemicelulose e lignina. Barbosa *et al.* (2020) também relataram elevados rendimentos mássicos após o tratamento com água quente do bagaço de cana-de-açúcar, reforçando a influência das condições operacionais sobre a solubilização do complexo lignocelulósico.

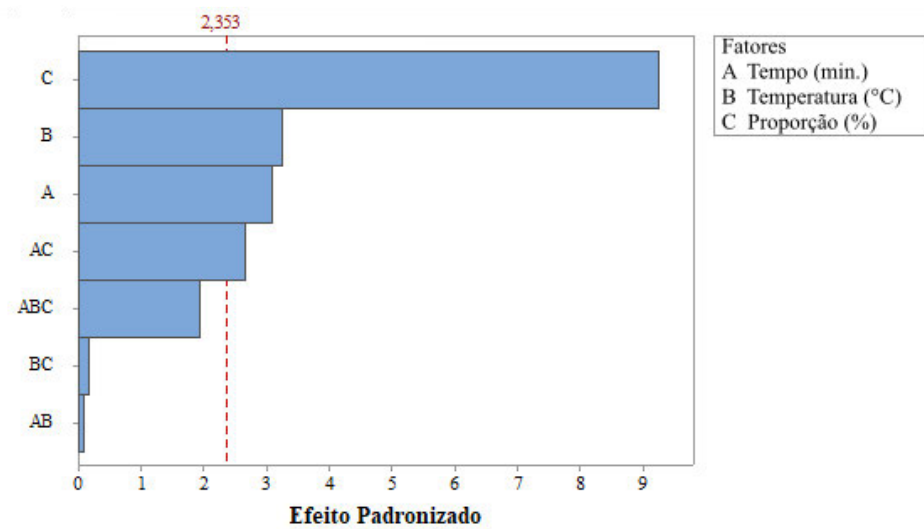
A metodologia do planejamento experimental propõe determinar um modelo empírico capaz de prever o processo em estudo por meio das variáveis de entrada: temperatura, tempo e proporção de resíduo. O Diagrama de Pareto, apresentado na Figura 17, indica que os efeitos das variáveis proporção (C), temperatura (B), tempo (A) e a interação entre tempo e proporção (A*C) são significativos a um nível de 90 % de confiança para os açúcares redutores. Assim, é possível inferir que a proporção foi o fator de maior destaque, especialmente considerando sua interação com o tempo, o que pode resultar em maiores concentrações de açúcares redutores disponíveis no licor após o tratamento. Quanto ao rendimento do tratamento com água quente, indicado na Figura 18, observa-se que os efeitos das variáveis proporção (C), temperatura (B) e da interação entre esses fatores com o tempo (A) também são significativos ao nível de confiança de 90 %.

O modelo matemático de 1ª ordem que representa a concentração de açúcares redutores e do rendimento é expresso nas equações de regressão 8 e 9, respectivamente.

$$\text{ART (g/L)} = 11,23 - 0,1278 A - 0,1022 B - 0,0655 C + 0,00306 A*C \quad (8)$$

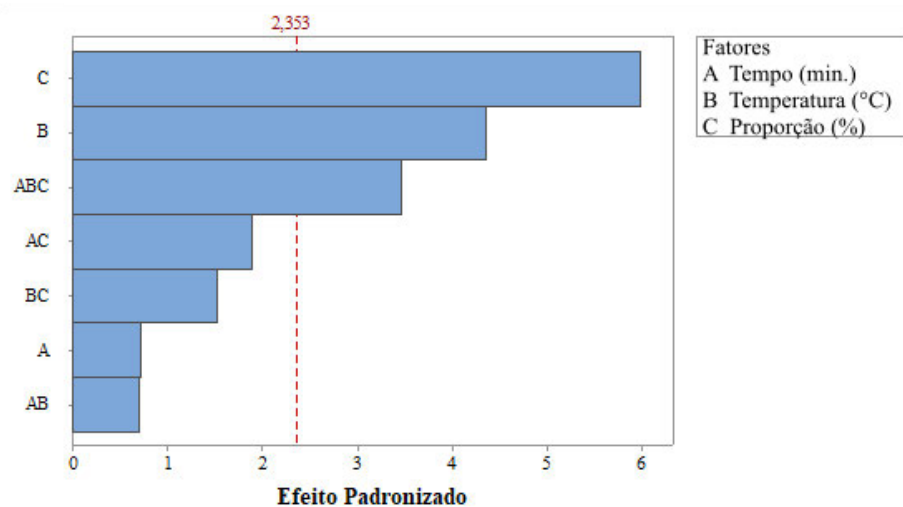
$$\text{Rendimento (\%)} = 49,66 + 0,552 A + 0,476 B + 0,499 C - 0,00602 A*B - 0,00993 A*C - 0,00690 B*C + 0,000109 A*B*C \quad (9)$$

Figura 17. Diagrama de Pareto para os açúcares redutores liberados na fração líquida obtida após o tratamento com água quente ($\alpha=0,10$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 18. Diagrama de Pareto para o rendimento da fração sólida obtida após o tratamento com água quente ($\alpha=0,10$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os dados da análise de variância (ANOVA) para as variáveis dependentes estão descritos na Tabela 15. O modelo que representa os açúcares redutores após o tratamento com água quente demonstrou ser significativo, apresentando um bom coeficiente de determinação R^2 igual a 91,65%, com um valor F 16,67 e P-value 0,021. O coeficiente de determinação (R^2) indica o grau de representatividade da variável independente (X) na explicação do comportamento da variável dependente (Y). Assim, ele avalia a proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas (Tischer e

González, 2022). Embora o R^2 para o rendimento tenha apresentado um valor de 86,96 %, a significância do modelo pode ser observada pelo valor F de 10,53 e P-value de 0,040. Logo, os coeficientes significativos ainda representam uma mudança na resposta para uma unidade de mudança preditora, mantendo outras funções do modelo constantes.

Tabela 15. Análise de variância (ANOVA) para as variáveis dependentes no tratamento com água quente.

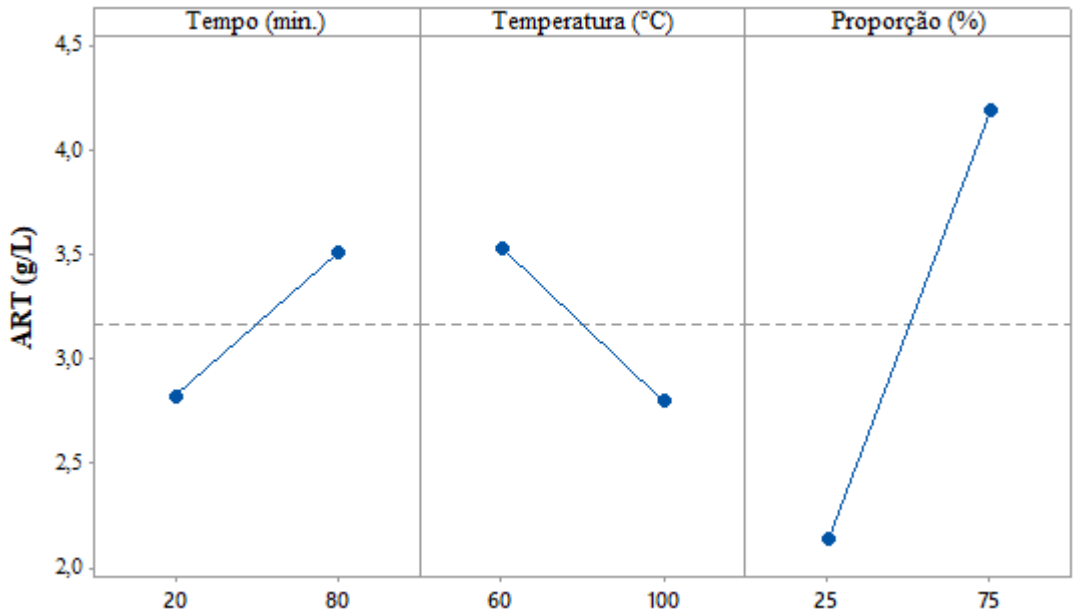
Modelos	Grau de liberdade	Valor F	P-value	R^2 (%)	Decisão
Modelo para os Açúcares Redutores	7	16,67	0,021	91,65	Distribuição normal
Modelo para o Rendimento	7	10,53	0,040	86,96	Distribuição normal

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Vale destacar que a adequação dos modelos para as variáveis dependentes foi avaliada por meio da análise de normalidade dos resíduos. Os testes indicaram que os resíduos apresentaram distribuição normal, não sendo observada a presença de problemas para ajuste dos modelos.

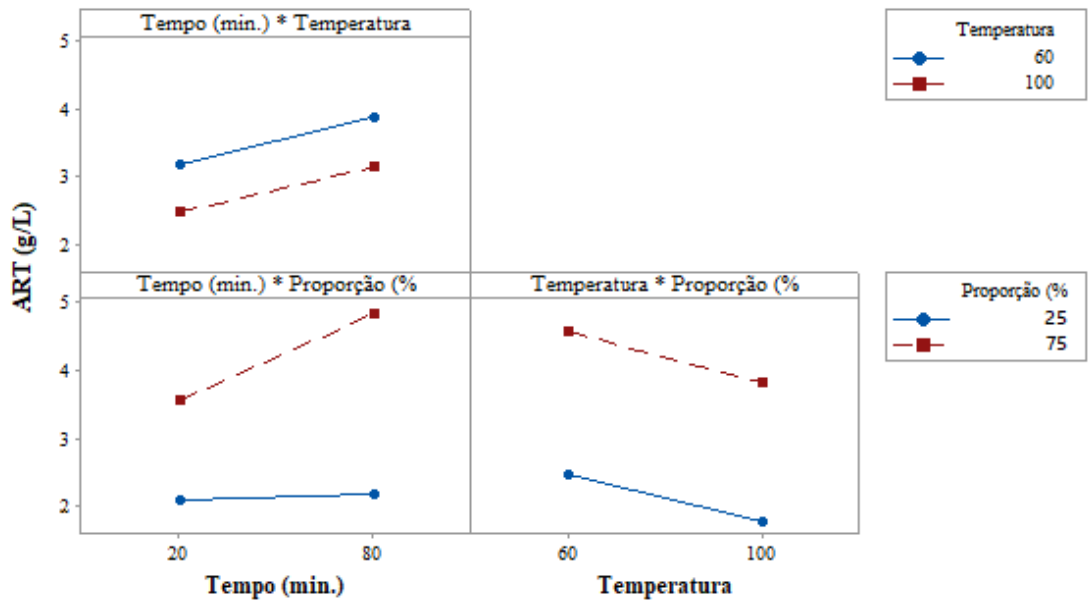
A influência dos efeitos principais de temperatura, tempo e proporção de resíduo sobre os açúcares redutores é apresentada na Figura 19. Os dados destacam que a proporção foi o fator mais relevante, seguida pelo tempo de tratamento. Observa-se que, em condições de baixa temperatura, maior proporção de palha em relação a bagaço e longos tempos de permanência no tratamento, há maior liberação de açúcares redutores. Já na Figura 20, está ilustrada a interação entre essas variáveis com o objetivo de maximizar a obtenção da resposta. Nota-se uma interação significativa apenas entre os fatores tempo e proporção, indicando que sua combinação em faixas elevadas aumenta a liberação de açúcares redutores no meio, contribuindo para as etapas de hidrólise enzimática, fermentação e destilação, como já mencionado. Por outro lado, as interações entre tempo e temperatura, assim como entre temperatura e proporção, não foram significativas, sendo representadas por tendências paralelas.

Figura 19. Influência dos efeitos principais sobre a resposta Açúcares Redutores no tratamento com água quente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 20. Interação entre as variáveis independentes em relação a resposta Açúcares Redutores no tratamento com água quente.

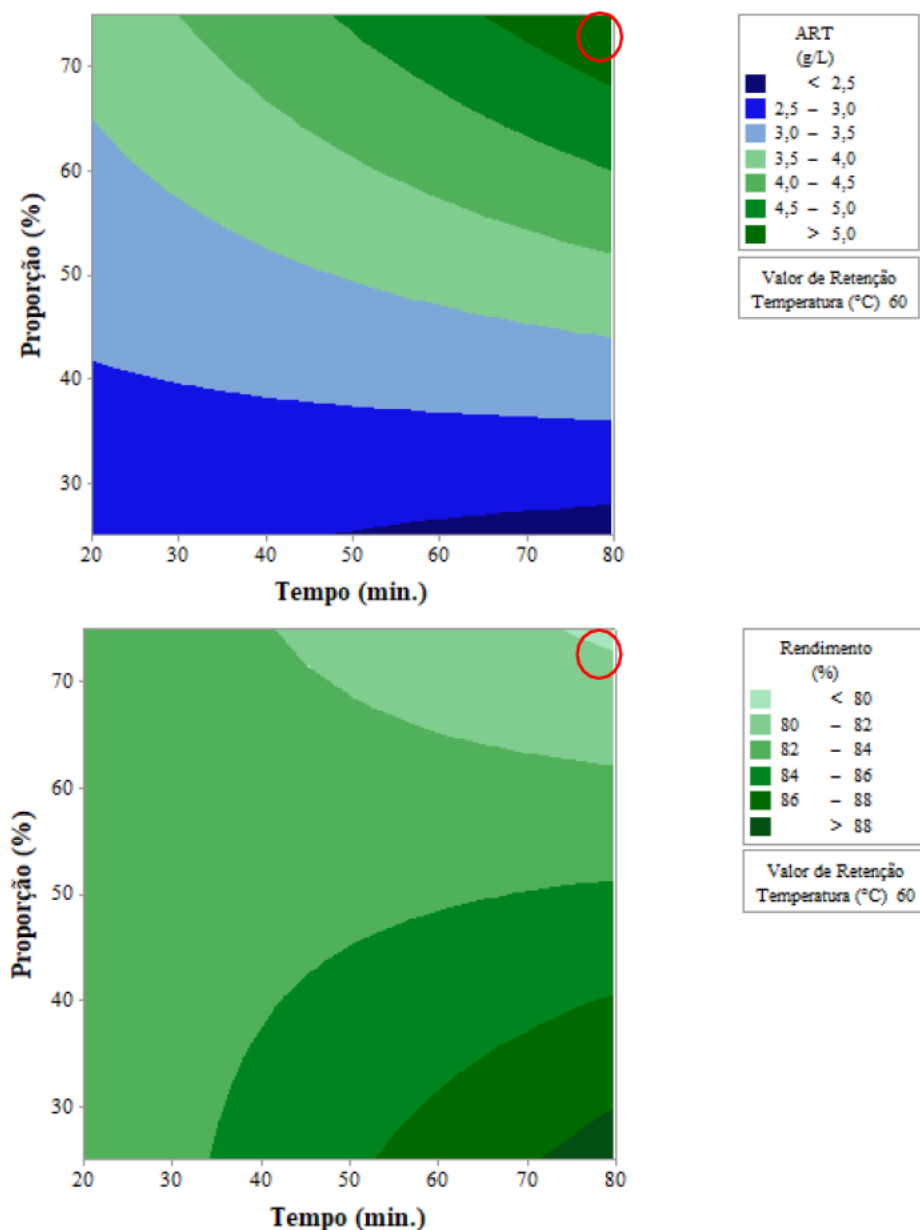


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os gráficos de contorno apresentados na Figura 21 destacam as condições ideais de tratamento que maximizam a obtenção de açúcares redutores, ao mesmo tempo em que minimizam o rendimento do processo, com base nas variáveis de maior interação identificadas

no estudo. A concentração de açúcares redutores alcança níveis máximos em condições específicas, como temperatura de 60 °C, proporção de resíduo superior a 74% e tempo de permanência no processo acima de 79 minutos, resultando em concentrações superiores a 5,39 g/L. Assim, o ensaio 6, realizado em condições de 60 °C, 80 min e proporção de 75 % (30 g de palha e 10 g de bagaço de cana-de-açúcar), apresentou resultados compatíveis com os valores previstos pelo modelo estatístico. Referente ao gráfico de rendimento, os valores expressos em verde claro (< 80) indicam uma eficiente solubilização do complexo lignocelulósico, resultando em menores rendimentos da fração sólida, os quais são desejáveis para o processo.

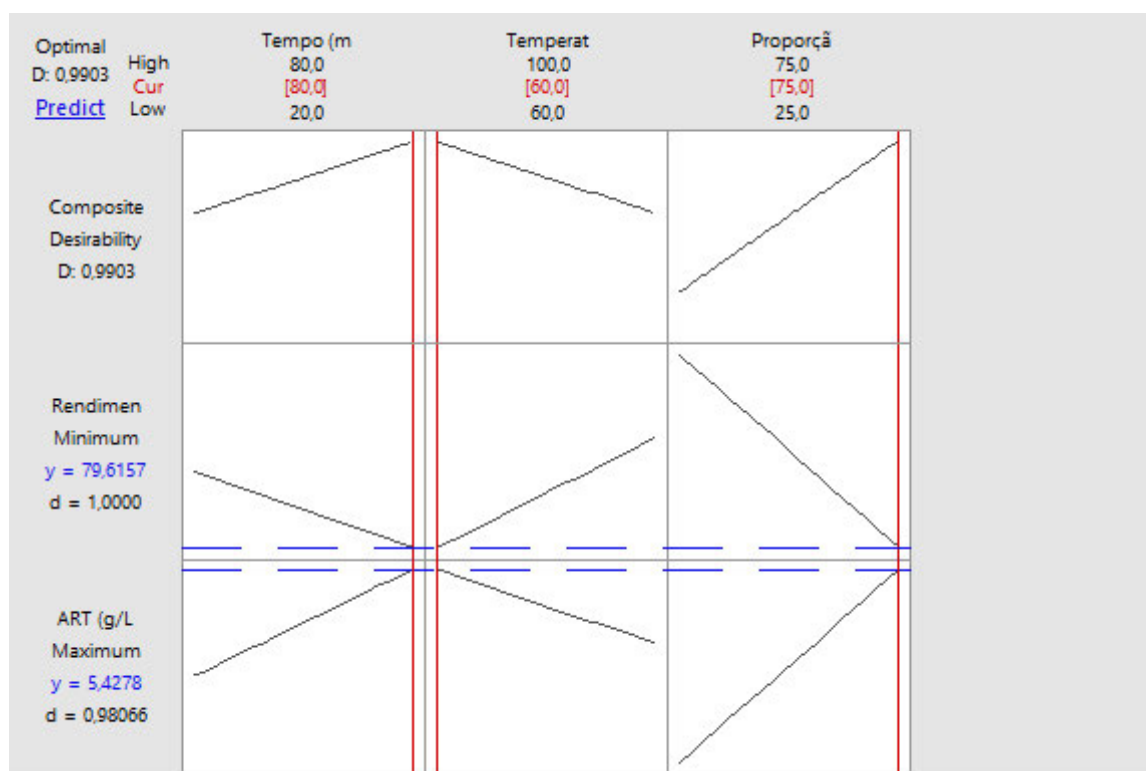
Figura 21. Gráfico de contorno para as respostas Açúcares Redutores e Rendimento no tratamento com água quente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A otimização das variáveis dependentes no estudo do tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol está descrita na Figura 22. A desejabilidade composta (d) foi maximizada, apresentando valores próximos e iguais a 1 para o rendimento e os açúcares redutores. Esses resultados evidenciam que as condições experimentais propostas são boas para alcançar uma eficiência relevante dentro dos intervalos estabelecidos. Logo, os fatores investigados oferecem uma visão ampla sobre o processo e, além disso, contribuem para a obtenção das respostas. Nesse contexto, na seção seguinte, o método *Steepest Ascent* foi aplicado para verificar a possibilidade de ampliação ou deslocamento da região ótima identificada, bem como avaliar a sensibilidade do processo às variações simultâneas das variáveis tempo, temperatura e proporção de resíduo.

Figura 22. Otimização das variáveis dependentes no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.4.2 Projeção do método *Steepest Ascent* para avaliar o tratamento com água quente

A metodologia do *Steepest Ascent* foi aplicada para investigar a variação simultânea das variáveis operacionais, além de examinar o comportamento do sistema no entorno da região de

melhor desempenho já identificada. Assim, a Tabela 16 apresenta os “passos” delimitados para cada variável em estudo, considerando os aspectos abordados no planejamento experimental, com objetivo de reduzir a temperatura e aumentar as variáveis tempo e proporção.

Tabela 16. Definição do passo para o *Steepest Ascent* para o tratamento com água quente.

Variável de controle	Passo em escala natural
Tempo (min)	5,0
Temperatura (°C)	5,0
Proporção (%)	7,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 17 estão descritos os resultados obtidos com a fração líquida após a aplicação do método *Steepest Ascent* no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. O ensaio 7, realizado com tempo de 85 min, temperatura de 45 °C e proporção de 99% de palha em relação ao bagaço, apresentou a maior concentração de açúcares redutores com 4,86 g/L. Observa-se que não houve incremento progressivo da resposta em relação ao valor máximo anteriormente observado no planejamento fatorial. Os resultados mostraram uma tendência de estabilização, seguida de redução dos valores de ART a medida que as variáveis se afastam da região de ótima.

Tabela 17. Resultados obtidos com a fração líquida após a aplicação do método *Steepest Ascent* no tratamento com água quente do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.

Ensaio Origem Passo	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Proporção (%)	ART (g/L)
	50	80	50	2,96
	+ 5,0	- 5,0	+7	-
1	55	75	57	3,53
2	60	70	64	3,88
3	65	65	71	4,37
4	70	60	78	4,25
5	75	55	85	4,65
6	80	50	92	4,12
7	85	45	99	4,86

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados obtidos no método *Steepest Ascent* confirmam que o valor máximo de açúcares redutores totais ocorre nas condições de tempo em 80 minutos, temperatura de 60°C e proporção de 75% de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, no tratamento com água quente, uma vez que nenhum dos ensaios realizados superou o desempenho de 5,50 g/L. Entretanto, os passos poderiam ter gerado mais ensaios, porém em função das condições de laboratório foram realizados apenas 7 experimentos. Logo, essa metodologia reforça a região

de melhor desempenho e evidencia a adequação dos intervalos experimentais inicialmente abordados.

4.4.3 Pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar

O pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar foi avaliado com o objetivo de investigar a ação da pressão na solubilização dos componentes lignocelulósicos do compósito produzido. Nesse sentido, na Tabela 18 estão apresentados os resultados obtidos com a fração líquida após o pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. Verifica-se que o ensaio 4, realizado na proporção de 90% de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar e com um tempo de permanência em 80 minutos, apresentou a maior liberação de açúcares redutores com 6,64 g/L. Rouabhia, Álvarez-Gallego e Fernández-Guelfo (2025) investigaram a aplicação do pré-tratamento hidrotérmico em resíduos lignocelulósicos, como casca de arroz e bagaço de cervejaria, obtendo concentrações de açúcares redutores de 3,9 e 4,9 g/L, respectivamente, valores inferiores aos observados no presente estudo. Outras abordagens são relatadas na literatura, associando o pré-tratamento hidrotérmico a métodos ácidos ou alcalinos. Embora essas estratégias promovam maior liberação de açúcares redutores, elas podem favorecer a formação de subprodutos indesejáveis, como furfural e hidroximetilfurfural, em virtude da severidade do processo (Silva *et al.*, 2020; Massardi, Massini e Silva, 2020).

Tabela 18. Resultados obtidos com a fração líquida após o pré-tratamento hidrotérmico do bagaço e da palha de cana-de-açúcar.

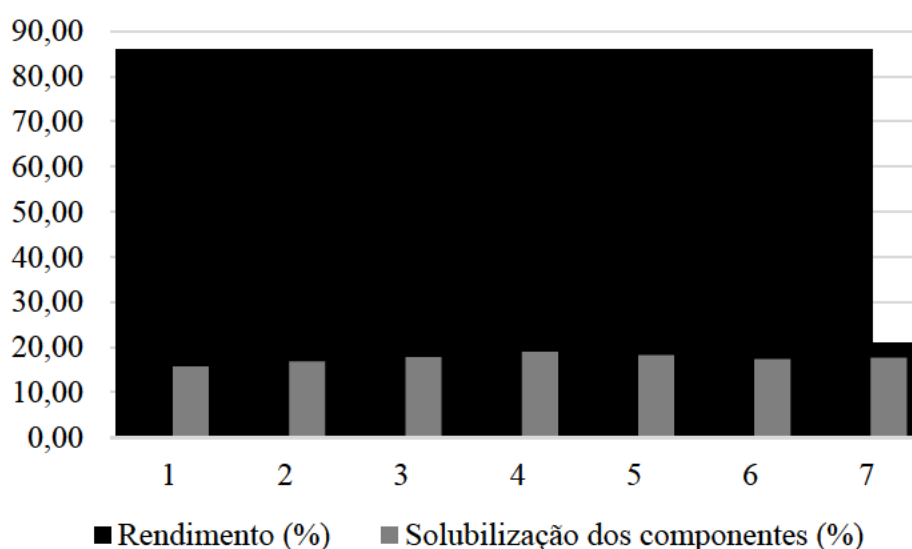
Ensaio	Tempo (min)	Proporção (%)	ART (g/L)
1	20 (-1)	50 (-1)	3,63
2	80 (+1)	50 (-1)	3,65
3	20 (-1)	90 (+1)	5,49
4	80 (+1)	90 (+1)	6,64
5	50 (0)	70 (0)	4,52
6	50 (0)	70 (0)	4,18
7	50 (0)	70 (0)	4,36

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados para o rendimento e a solubilização dos componentes macromoleculares no pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar estão ilustrados na Figura 23. Os ensaios 4 e 5 apresentaram os menores índices de rendimento mássico com 81,03

e 81,75%, respectivamente, os quais estão associados a maior liberação de açúcares redutores e a maior solubilização dos componentes macromoleculares no meio reacional, conforme indicado pelos valores de 18,98 e 18,25%. Em contraste com outros métodos de pré-tratamento descritos na literatura, Oliveira, Nunes e Sousa (2020) abordam o pré-tratamento químico e a caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol, analisando a eficiência do tratamento básico com hidróxido de sódio (NaOH) a 2% (m/v), atrelado ao ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 1,5% (v/v), em autoclave sob diferentes tempos. Os autores constataram que após 30 minutos de aquecimento, o rendimento do pré-tratamento alcançou 83,05%, indicando pouca solubilização do complexo lignocelulósico.

Figura 23. Resultado do rendimento e da solubilização dos componentes macromoleculares para o pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.



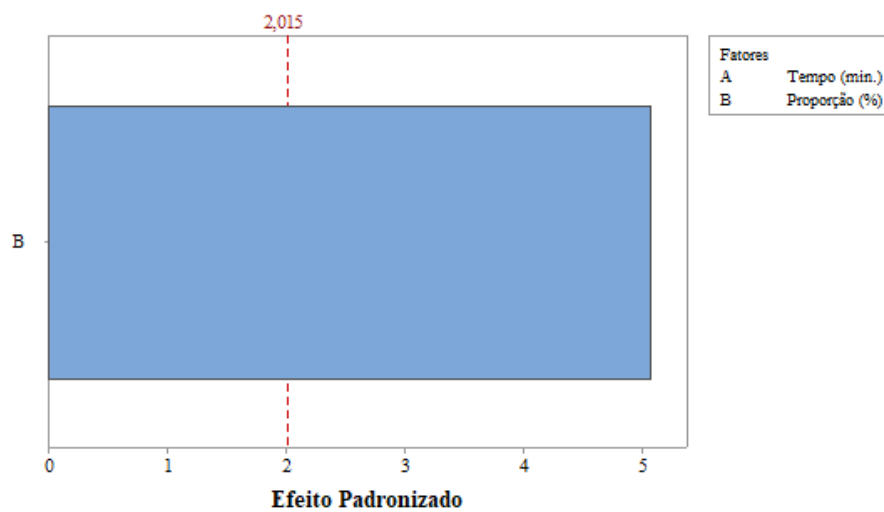
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base nas premissas abordadas por Montgomery (1991) acerca do uso de métodos estatísticos no planejamento experimental, a condução correta de experimentos deve estar fundamentada no conhecimento técnico científico do problema, para além dos aspectos puramente estatísticos. Nesse sentido, a metodologia do planejamento experimental foi adotada buscando determinar um modelo que permita a obtenção de resultados passíveis de ajustes e refinamentos ao longo do planejamento, destacando-se, principalmente, o efeito da variável pressão em relação a obtenção das respostas durante o processo.

Na Figura 24 está ilustrado o Diagrama de Pareto para os açúcares redutores liberados na fração líquida obtida após o pré-tratamento hidrotérmico. Observa-se que apenas a variável proporção (B) foi significativa a um nível de 90% de confiança para os açúcares liberados no

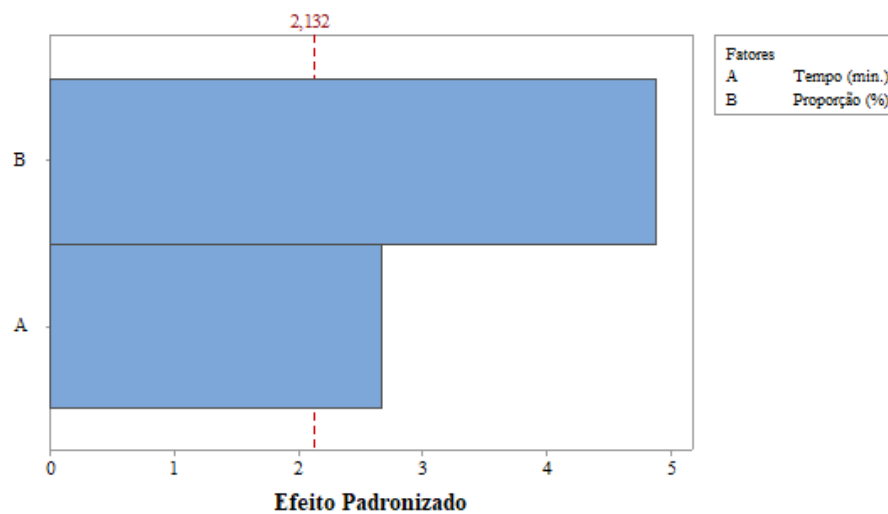
processo. Logo, as variações no tempo, dentro do intervalo de ensaios realizados, não provocaram alterações estatisticamente significativas na resposta. Ademais, é possível inferir que a quantidade de açúcares redutores é mais sensível a composição do material do que ao tempo de permanência, no intervalo de ensaios propostos. Por outro lado, o Diagrama de Pareto para o Rendimento, expresso na Figura 25, indicou que os efeitos das variáveis tempo (A) e proporção (B) foram significativos ao nível de 90% de confiança. Assim, ambas exercem influência sobre a quantidade de fração sólida recuperada após o pré-tratamento.

Figura 24. Diagrama de Pareto para os açúcares redutores liberados na fração líquida obtida após o pré-tratamento hidrotérmico ($\alpha=0,10$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 25. Diagrama de Pareto para o rendimento da fração sólida obtida após o pré-tratamento hidrotérmico ($\alpha=0,10$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As Equações 10 e 11 descrevem o modelo matemático que representa a concentração de açúcares redutores e o rendimento expressos para o pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol. Vale ressaltar que essas expressões sintetizam o comportamento do processo e permitem interpretações operacionais.

$$\text{ART (g/L)} = 0,401 + 0,0606 B \quad (10)$$

$$\text{Rendimento (\%)} = 87,133 - 0,01917 A - 0,0525 B \quad (11)$$

A discussão dos resultados da análise de variância (ANOVA), descritos na Tabela 19, permite avaliar a adequação do modelo em estudo, bem como a significância dos fatores e de suas interações na reposta experimental. Nesse sentido, o modelo proposto que representa os açúcares redutores após o pré-tratamento hidrotérmico apresentou um coeficiente de determinação R^2 igual a 80,49%, com um valor de F 25,76 e P-value 0,004. Já o modelo estabelecido para o rendimento indicou um R^2 de 82,85%, com um valor de F 15,49 e P-value em 0,013. Referente aos valores de R^2 , Montgomery (2009) justifica que valores extremamente elevados não são um requisito exclusivo para validação do modelo. Logo, a significância do modelo pode ser observada nos valores de F e P-value. Além disso, o teste de *Lack-of-fit* indicou que o modelo representa bem a região experimental.

Tabela 19. Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis dependentes no pré-tratamento hidrotérmico.

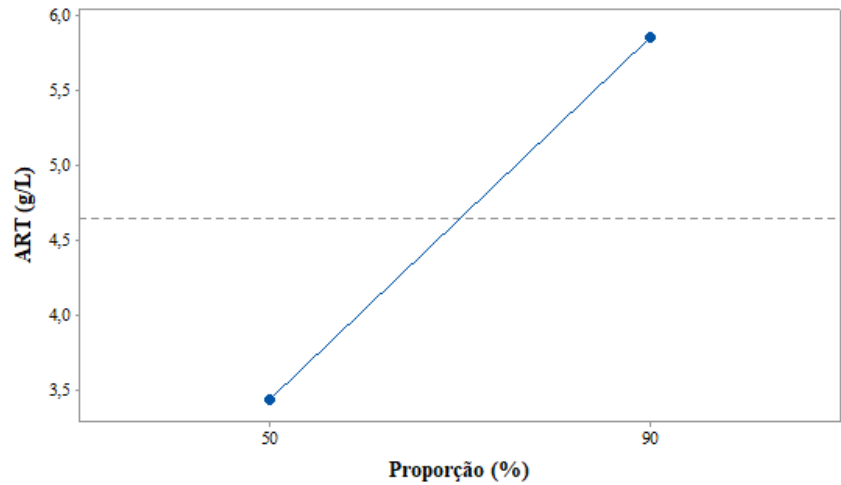
Modelos	Grau de liberdade	Valor F	P-value	R^2 (%)	Decisão
Modelo para os Açúcares Redutores	1	25,76	0,004	80,49	Resíduos normais
Modelo para o Rendimento	2	15,49	0,013	82,85	Resíduos normais

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A influência dos efeitos principais de tempo e proporção sobre os açúcares redutores e o rendimento está ilustrada nas Figuras 26 e 27, respectivamente. No que diz respeito aos açúcares redutores, os resultados indicam que a proporção foi a variável mais relevante. Assim, elevados

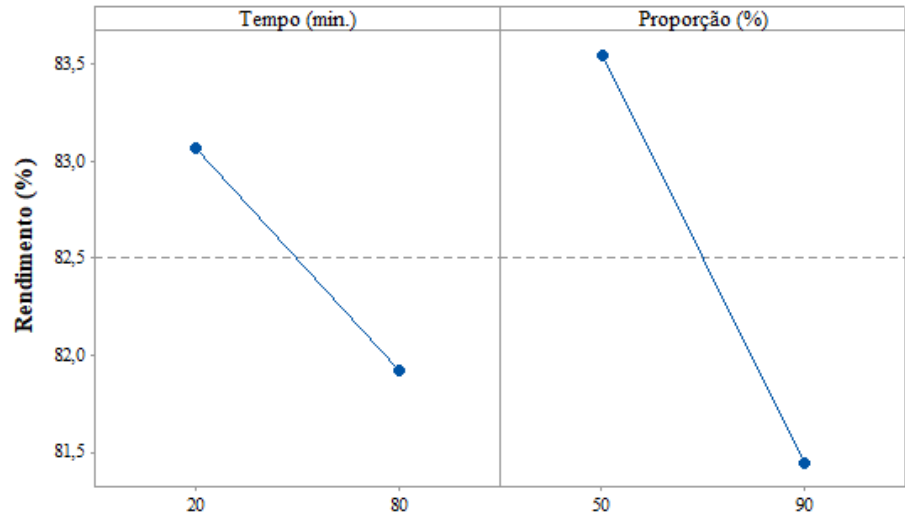
índices de proporção de palha em relação ao bagaço potencializam a obtenção de açúcares. Já para o rendimento da fração sólida, observa-se que sua redução é expressiva em elevados índices de proporção, considerando que a composição da biomassa exerce influência sobre a solubilização dos componentes estruturais. O tempo também foi significativo considerando sua capacidade de intensificar o pré-tratamento e promover o rompimento da matriz celulose, hemicelulose e lignina.

Figura 26. Influência dos efeitos principais sobre a resposta Açúcares Redutores no pré-tratamento hidrotérmico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 27. Influência dos efeitos principais sobre a resposta Rendimento no pré-tratamento hidrotérmico.

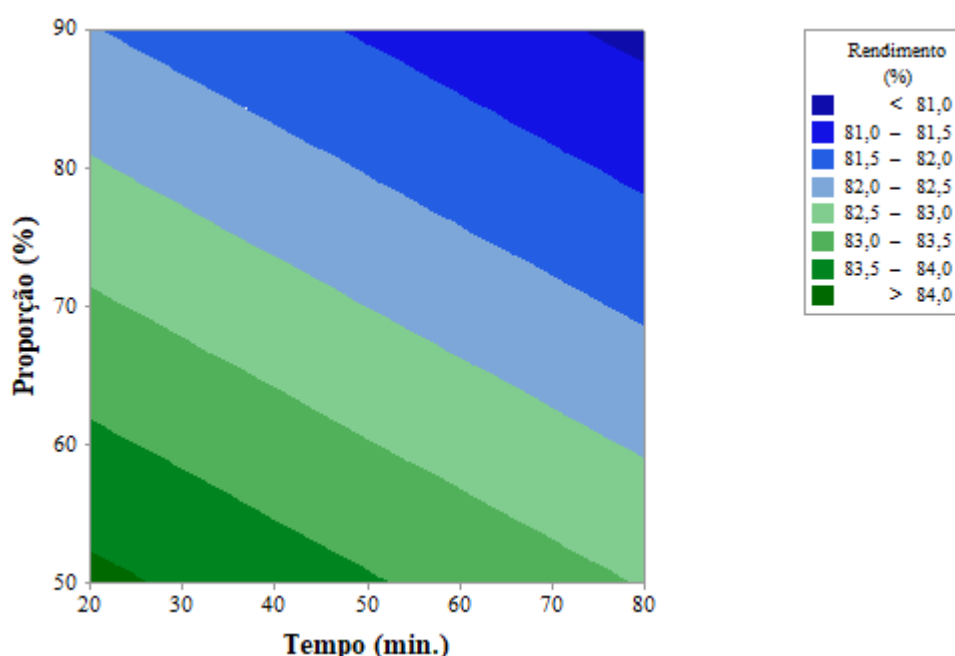


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 28 está ilustrado o gráfico de contorno atribuído a resposta rendimento da

fração sólida para o pré-tratamento hidrotérmico. Os resultados indicam que a região em azul escuro abrange os menores valores de rendimento mássico, indicando a maior solubilização da matriz lignocelulósica. O ensaio 4, realizado na proporção 80% de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar e tempo de permanência em 80 minutos, apresentou rendimento da fração sólida de 81,03%. Assim, esse resultado foi superior ao esperado para proporções menores de resíduo, visto que o programa estipulou uma fração de 89% de palha em relação ao bagaço para atingir valores próximos a esse mesmo rendimento. Ressalta-se que o fator tempo não foi estatisticamente significativo para a resposta açúcares redutores; por isso, não foi apresentado gráfico de contorno para essa variável dependente.

Figura 28. Gráfico de contorno para a resposta Rendimento no pré-tratamento hidrotérmico.

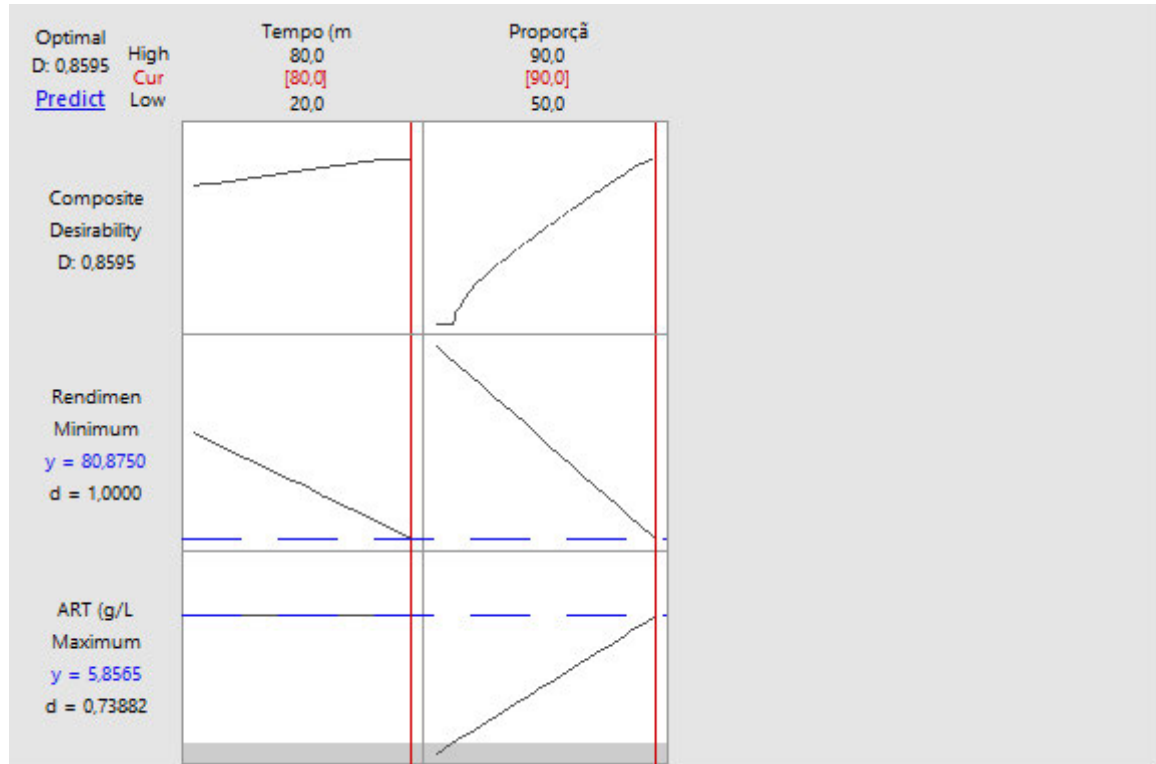


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 29 está ilustrado a função de otimização (*Desirability*) das variáveis dependentes no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol. A desejabilidade composta (D) apresentou valor de 0,85, próximo de 1, indicando que a combinação de tempo em 80 minutos e a proporção de 90% de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar é altamente desejável para minimizar o rendimento e maximizar a liberação de açúcares redutores, obtendo 5,86 g/L. Entretanto, o ensaio 4 foi realizado com apenas 80% de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar e indicou 6,64 g/L de açúcares redutores. Vale ressaltar que a interação entre as variáveis tempo e proporção, apesar de não significar na análise ANOVA, não impede que o ponto ótimo esteja nos níveis

máximos dos fatores.

Figura 29. Otimização das variáveis dependentes no estudo do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

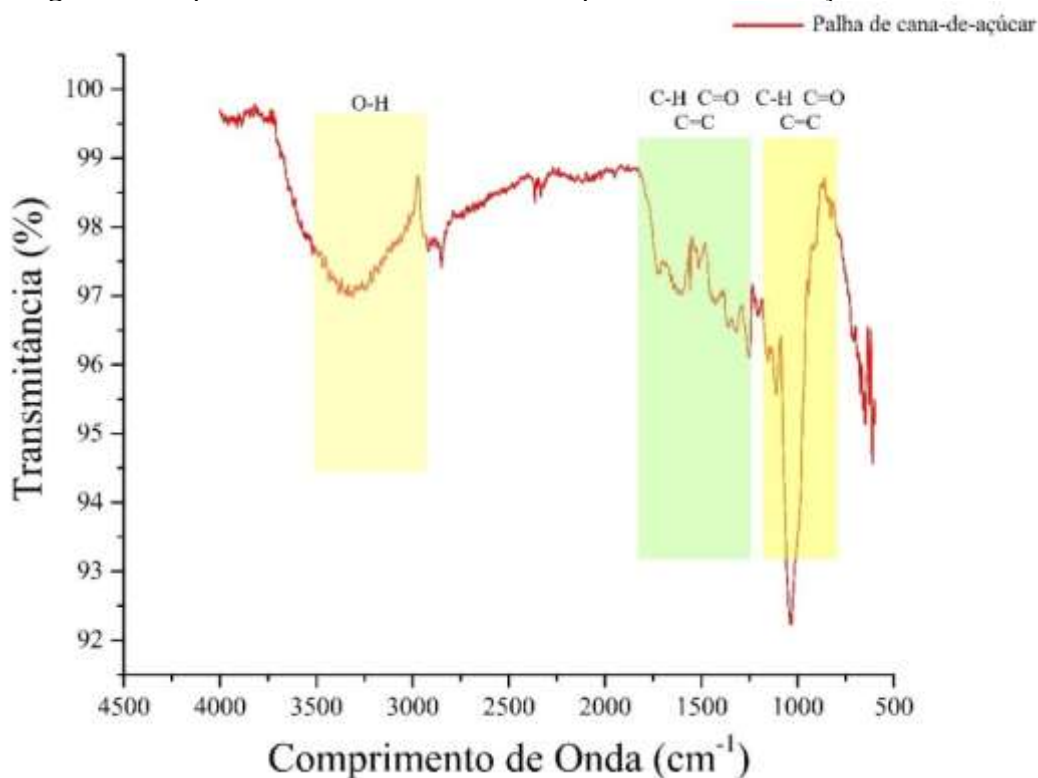
Em síntese, as análises estatísticas permitiram caracterizar o comportamento do processo de pré-tratamento hidrotérmico e do tratamento com água quente aplicados à palha e ao bagaço de cana-de-açúcar, visando à produção de etanol. A otimização das variáveis possibilitou a identificação das regiões de melhor desempenho com base nos ensaios propostos. A aplicação do método *Steepest Ascent* indicou a exploração de rotas fora do domínio experimental, contudo, sem resultar em um aprimoramento significativo da resposta. No pré-tratamento hidrotérmico, observou-se efeito da variável pressão, evidenciado pelo elevado índice de açúcares redutores totais, de 6,64 g/L. De forma comparativa, o tratamento com água quente promoveu a liberação de açúcares em níveis significativos sob condições de baixa severidade, enquanto o pré-tratamento hidrotérmico operou em condições de maior severidade, associando temperatura e pressão, o que favoreceu a ruptura da estrutura lignocelulósica e resultou em maior liberação de açúcares.

4.5 Caracterização da palha e do bagaço de cana-de-açúcar

4.5.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR-ATR)

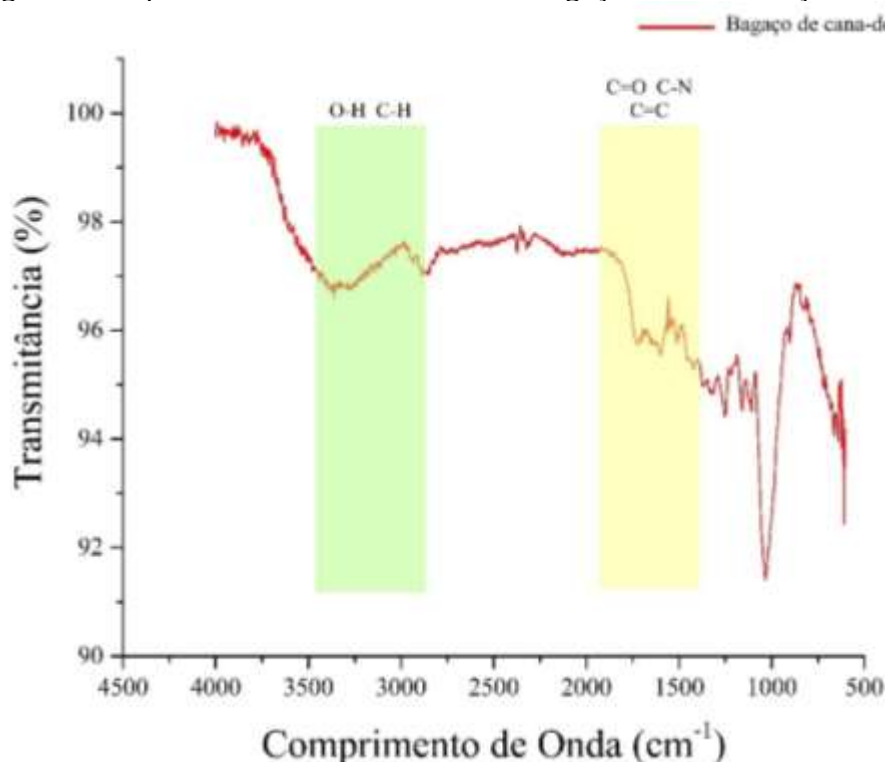
A análise de espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR-ATR) foi realizada para identificar grupos funcionais e caracterizar a composição química da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com as Figuras 30 e 31, é possível observar bandas características de ligações O-H ($2900\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$), mais acentuadas no espectro da palha, e grupos carbonila em 1500 e 1650 cm^{-1} para ambos resíduos (Rodrigues *et al.*, 2020). Raszl *et al.* (2024) reportaram que as bandas próximas a 3300 cm^{-1} podem ser atribuídas à presença de ligações de hidrogênio entre as moléculas de glicose. A presença da celulose pode ser identificada nas amostras pelas bandas em 1429 cm^{-1} , enquanto a hemicelulose é encontrada nas faixas entre 1245 e 1735 cm^{-1} , onde são observadas ligações C-H e C=O (Jia *et al.*, 2022). Já Chen e Jhou (2020) descreveram que as bandas atribuídas aos comprimentos 2848 e 2922 cm^{-1} correspondem ao estiramento assimétrico e simétrico de ligações C-H em grupos metila e metileno, derivados de lipídeos e cadeias alifáticas da hemicelulose.

Figura 30. Espectro de FTIR da amostra de palha de cana-de-açúcar *in natura*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 31. Espectro de FTIR da amostra de bagaço de cana-de-açúcar *in natura*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

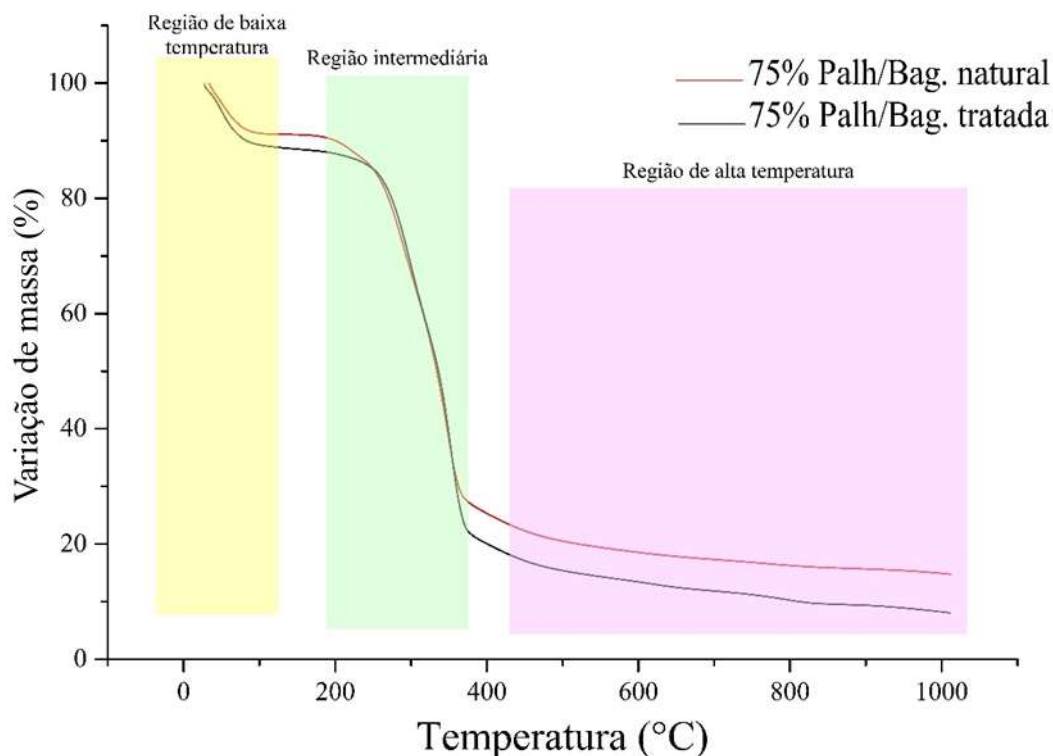
4.5.2 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) fornecem informações fundamentais para compreender o comportamento térmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar sob condições de pirólise lenta. Na Figura 32 está ilustrada a curva de TG do material antes e após a aplicação do tratamento com água quente, considerando a melhor condição encontrada, correspondente a proporção de 75% de resíduo.

Observa-se que a região de baixa temperatura (20-150°C) é caracterizada pela perda inicial de massa em função da umidade do material. A amostra tratada apresenta uma perda de massa menor nessa faixa, fator que pode ser causado pela remoção de grupos hidrofílicos e componentes amorfos. Já na região intermediária (200-380°C) a amostra tratada apresenta maior taxa de perda de massa, levando a considerar a decomposição dos polissacarídeos estruturais. Esse aspecto leva a inferir que a hemicelulose foi removida parcialmente, aumentando a exposição da celulose, tendo em vista que esse comportamento de curva é comum em materiais submetidos a tratamentos hidrotermais. A região de alta temperatura (390-1000°C) é responsável pela degradação da lignina, devido a sua natureza amorfa, e a formação do resíduo carbonáceo. A amostra tratada apresentou um menor índice de resíduo ao final do

processo em 1000°C, sugerindo a maior redução do teor de lignina e alteração da estrutura lignocelulósica.

Figura 32. Curva de TG expressa para o ensaio 6 antes e após a aplicação do tratamento com água quente a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.

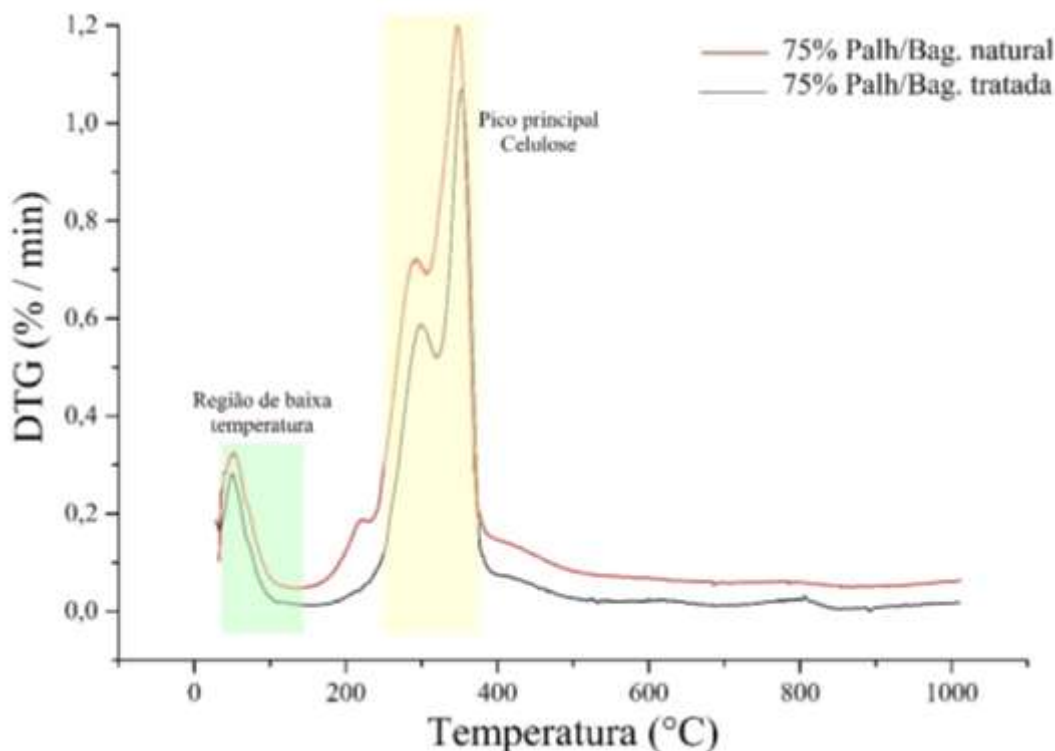


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Segundo Marques *et al.* (2022) o comportamento observado nesses resultados é comum para resíduos lignocelulósicos como palha e bagaço de cana-de-açúcar, sendo caracterizado pela remoção de água em aproximadamente 100 °C, pela degradação da hemicelulose e exposição da celulose em torno de 350 °C, além da degradação da lignina em temperaturas mais elevadas, justificada pela sua maior complexidade estrutural e estabilidade térmica. De forma distinta, Grotto *et al.* (2021) destacam que a hemicelulose se decompõe em faixas térmicas de 275-305°C, enquanto a celulose é degradada entre 300-325°C, resultando em uma perda de massa de 22% nessa etapa.

Na Figura 33 está apresentada a curva de DTG antes e após a aplicação do tratamento com água quente para o ensaio 6, proporção de 75% de resíduo.

Figura 33. Curva de DTG expressa para o ensaio 6 antes e após a aplicação do tratamento com água quente a uma taxa de aquecimento de 10°C/min.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As curvas de DTG exibem o pico de baixa intensidade associado a umidade do material, entrando em concordância com a curva da TG. Além disso, destaca-se o pico principal correspondente a degradação da celulose mais acentuado para a amostra *in natura*. Enquanto para a amostra tratada o pico apresenta-se mais deslocado e estreito, indicando maior reatividade térmica do material com a degradação mais concentrada em uma faixa estreita de temperatura. Os picos expressos nas faixas de 180, 213, 301 e 421°C podem ser relacionados a energia necessária para a quebra das ligações químicas ligadas a liberação de energia. Najafi, Sani e Sobati (2024) salientam que a desvolatilização da celulose ocorre em 370 °C, no estágio de pirólise ativa. Já Santos *et al.* (2022) discorrem que o pico indicado em 230 °C é derivado da presença de lignina na biomassa lignocelulósica. No presente estudo, a amostra tratada apresentou redução da intensidade desse pico, inferindo uma remoção ou modificação estrutural da lignina promovida pelo tratamento aplicado.

4.5.3 Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC)

Os açúcares, os ácidos orgânicos e os produtos de degradação presentes nos hidrolisados

obtidos no pré-tratamento hidrotérmico e no tratamento com água quente foram identificados e quantificados por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). Nesse sentido, as concentrações desses componentes estão descritas na Tabela 20. Os perfis cromatográficos para os 3 ensaios estão ilustrados no Apêndice A.

Tabela 20. Composição química dos hidrolisados obtidos após o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.

Ensaio	Condição de tratamento	Glicose	Xilose
6	Tratamento com água quente 80 min – 60°C – 75%P/B	2,29	2,55
7	<i>Steepest Ascent</i> 85 min – 45°C – 99%P/B	1,74	1,86
4	Pré-tratamento Hidrotérmico 80 min – 1 bar – 90%P/B	2,78	2,96

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De acordo com os dados observados, o ensaio 4 apresentou a maior concentração de glicose (2,78 g/L) e xilose (2,96 g/L), semelhante aos dados encontrados por Jafari e Sourki (2024), considerando a eficiência do pré-tratamento na quebra estrutural da biomassa e na solubilização dos polissacarídeos. Alves *et al.* (2025) trabalharam resíduos como palha e bagaço de cana-de-açúcar, destacando a maior liberação de xilose (açúcar C5) nos licores devido a estrutura heterogênea das hemiceluloses. Além disso, esse fator pode ser justificado mediante a maior severidade do processo, facilitando a ruptura das ligações β -1,4-glicosídicas da matriz lignocelulósica. Por outro lado, o ensaio 7 apresentou a menor concentração de xilose e glicose, no método do *Steepest Ascent*, indicando que apesar da elevada proporção de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar (99%), a baixa temperatura utilizada (45°C) foi um fator limitante para a extração dos açúcares estruturais. A sacarose e o glicerol foram detectados em menor quantidade, bem como a sacarose não foi observada no pré-tratamento hidrotérmico.

5 CONCLUSÕES

A palha e o bagaço de cana-de-açúcar têm demonstrado crescente potencial para a geração de etanol, abrindo novas possibilidades de aplicação para esses resíduos e promovendo uma maior integração entre o setor industrial e o meio ambiente.

A aplicação do planejamento experimental completo ao tratamento com água quente permitiu identificar a significância das variáveis operacionais em estudo. Logo, o ensaio 6 correspondente a 80 minutos, 60°C e 75% de palha em relação ao bagaço de cana-de-açúcar apresentou a maior liberação de açúcares com 5,50 g/L. A aplicação do método *Steepest Ascent* não resultou em ganhos adicionais ao processo, indicando que a região inicial já se encontrava próximo da condição ótima, validando a eficiência do planejamento adotado.

No pré-tratamento hidrotérmico observou-se um aumento da severidade do processo, associada ao efeito combinado do tempo, proporção de resíduo e pressão, fator que aumentou de forma significativa a solubilização dos componentes lignocelulósicos presentes nos materiais. O ensaio 4 realizado em autoclave, com 80 minutos e proporção de 90%, apresentou a maior liberação de açúcares redutores com 6,64 g/L, acompanhada da redução do rendimento mássico da fração sólida. A análise estatística confirmou a significância dos modelos, com coeficientes de determinação positivos e validados por ANOVA, assegurando a confiabilidade dos dados.

O pré-tratamento hidrotérmico demonstrou ser mais eficiente na liberação de açúcares redutores quando comparado o tratamento com água quente, principalmente em função da ação da pressão que intensifica o rompimento das ligações lignina-carboidrato. Entretanto, o tratamento com água quente, nas condições propostas, pode ser considerado uma alternativa mais simples, considerando as estratégias de economia de água e energia.

Dessa forma, o pré-tratamento hidrotérmico e o tratamento com água quente são alternativas promissoras e ambientalmente adequadas para a valorização de resíduos lignocelulósicos aplicados à produção de etanol. Além disso, o estudo está alinhado aos critérios Environmental, Social and Governance (ESG) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9, 12 e 13 da ONU, ao incentivar o uso de fontes renováveis, o desenvolvimento tecnológico sustentável e a redução das emissões de GEE.

REFERÊNCIAS

- AI, B. *et al.* Biodegradable Cellulose Film Prepared From Banana Pseudo-Stem Using an Ionic Liquid for Mango Preservation. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, n. February, p. 1-10, 2021.
- ALVES, M. S. *et al.* Organosolv and Hydrothermal Pretreatments of Sugarcane Bagasse and Straw and Enzymatic Hydrolysis of Hemicellulosic Liquor. **Fermentation**, v. 11, n. 10, p. 550, 2025.
- ALVES, V. R. S. Pré-tratamento da palha de cana-de-açúcar: Avaliação do potencial dos processos de torrefação e lixiviação para remoção de contaminantes. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 14, 2020.
- AN, D. *et al.* Autocatalytic hydrothermal pretreatment for eucalyptus wood and model construction of lignin dissolution and enzymatic hydrolysis processes. **Industrial Crops and Products**, v. 237, p. 122018, 2025.
- ANAND, K. T. *et al.* Production of renewable fuels and chemicals by combining hydrothermal pretreatment with thermochemical conversion of woody biomass towards solid waste management. **Indian Journal of Chemical Technology (IJCT)**, v. 32, n. 5, p. 614-622, 2025.
- ANJOS, R.; PINTO, T. M. Laboratório com cinco sentidos. *Revista de Ciência Elementar*, v. 4, n. 2, p. 021, 2016. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2016/021/>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. ANP divulga dados consolidados do setor regulado em 2024. Brasília, 30 jun. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-divulga-dados-consolidados-do-setor-regulado-em-2024. Acesso em: 20 fev. 2026.
- ARAÚJO, N. D. Pré – tratamento organossolve de palha e sabugo de milho, e de palha e bagaço de cana-de-açúcar, visando a produção de etanol 2G. 2022. 57 f. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5082>.
- ASSIS, A. H. C. Processo de produção de celulose e de papel. 1. ed. Curitiba: Editora InterSaberes, 2024. 417 p. ISBN 978-85-227-0564-1.
- ASSIS, E. T. C. M.; PEREIRA, J. S.; SANTOS, T. A. Um novo olhar sobre a parede celular vegetal: uma revisão de literatura. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 57-57, 2021.
- BARBOSA, G. U. Avaliação da toxicidade de nanofibras de celulose provenientes do bagaço de azeitona em *Artemia salina*. 2024. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2024.
- BARBOSA, K. L. *et al.* Pré-tratamento de explosão a vapor, caracterização química e morfológica do bagaço da cana-de-açúcar usado para produção de Etanol 2G. **Revista virtual**

de química, v. 12, 2020.

BARROS, J. P. A. A. *et al.* Application of ionizing radiation technology in agro-industrial waste: A review. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 243, 113690, 2026.

BENALI, M.; TOYIR, J. The role of biofuels in the global energy transition. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, 2026.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-34088-8.00115-4>.

BORGES, C.; ROSA, V.; SILVA, M. Pré-tratamento de material lignocelulósico em bancada. **Enciclopedia biosfera**, v. 18, n. 38, 2021.

BRAGA, L. E. C.; MEIRA, S. C. Hidrólise enzimática da palha da cana-de-açúcar: um review dos avanços tecnológicos para produção de etanol de segunda geração. **Anais do CENAR**, v. 5, 2023.

BRASIL. CNPE passa a ter competência para fixar teor de etanol anidro na gasolina. *Ministério de Minas e Energia*, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-passa-a-ter-competencia-para-fixar-teor-de-etanol-anidro-na-gasolina#:~:text=O%20etanol%20anidro%20%C3%A9%20misturado,%25%20e%2027%2C5%25>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CANETTIERI, E. V. *et al.* Physicochemical and thermal characteristics of sugarcane straw and its cellulignin. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, p. 1-13, 2018.

CARVALHO, N. *et al.* Caracterização física e química de biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Química Nova**, v.44, n. 1, p.35-40, 2021.

CASTRO, F. S. *et al.* Impacto das projeções de mudanças climáticas globais do IPCC no zoneamento agroclimático da cultura da cana-de-açúcar na América do Sul. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28410-28427, 2020.

CHAVES, N. O.; CARVALHO, L. C. F.; OLIVEIRA, R. M. P. B. As principais técnicas utilizadas para remoção de corantes das águas residuais da indústria têxtil: uma revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693**, v. 14, 2022.

CHEN, H.; JHOU, T. Physicochemical properties of biochar derived from *silverskin* and its application. **Waste Management**, v. 102, p. 271-280, 2020.

CHIRESHE, F.; PETERSEN, A. M.; GÖRGENS, J. F. Evaluating integration and pretreatment options, for first-and second-generation bioethanol production by adjacent sugarcane mills. **Biochemical Engineering Journal**, p. 109796, 2025.

CHO, E. J. *et al.* Bioconversion of biomass waster into high value chemicals. **Bioresource Technology**, v.298, 2020.

CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M. Métodos de sistematização de literatura em estudos científicos: bibliometria, meta-análise e revisão sistemática. *Internext*, v. 17, n. 2, p. 284-292,

2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18568/internext.v17i2.704>. Acesso: 01 fev. 2025.

CNPEN - Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEN). **Alternativas de uma fibra vegetal**. Disponível em: <https://cnpem.br/alternativas-de-uma-fibra-vegetal/>. Acesso em: 24 jan. 2025.

COELHO, L. F.; BRAGAGNOLO, C. Fatores determinantes da eficiência técnica da cana-de-açúcar nos polos de produção do sudeste e centro-oeste brasileiros. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 54, n. 1, p. 167-204, 2024.

COELHO, R. D. *et al.* Effect of water stress on renewable energy from sugarcane biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 103, p. 399-407, 2019.

COELHO, T. C. C. C. *et al.* Análise da influência do pré-tratamento químico e físico sob a caracterização das frações celulose e lignina de diferentes biomassas e seu potencial para produção de etanol de segunda geração. **Fitoquímica: potencialidades biológicas dos biomas brasileiros**. Editora Científica Digital, 2022. p. 10-25.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de cana-de-açúcar na safra 2024/25 sofre redução devido a condições climáticas adversas. *Companhia Nacional de Abastecimento*, nov. 2024b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5841-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2024-25-sofre-reducao-devido-a-condicoes-climaticas-adversas#:~:text=Em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20ao%20etanol%2C%20a,em%20compa ra%C3%A7%C3%A3o%20C%C3%A0%20safra%20anterior>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de cana-de-açúcar na safra 2025/26 é atualizada para 668,8 milhões de toneladas. Brasília, 26 ago. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2025-26-e-atualizada-para-668-8-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 20 fev. 2026.

CORDEIRO M. A. Estudo da hidrólise enzimática do caroço de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) para a produção de etanol. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFPA-Brazil, 2016.

CORDEIRO, E. M. *et al.* Breves considerações a respeito da análise de conteúdo e da pesquisa qualitativa. **Cadernos da FUCAMP**, v. 28, 2024.

CORREIA, G. A. Otimização do pré-tratamento ácido da casca do coco para produção de bioetanol. 2022. Relatório (32º Encontro de Iniciação Científica) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/17411>. Acesso em: 01 fev. 2025.

COSTA, B. E. B. *et al.* Comparação entre a Hidrólise Química e Enzimática da Biomassa Lignocelulósica para a Produção de Bioetanol: uma Revisão. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 1, p. 1-18, 2021.

CRUZ, M. A. R. RStudio y su importancia en la educación. **Revista CNCI**, v. 1, n. 3, 2022.

CRUZ-SANTOS, M. M. *et al.* Production and application of pullulan from lignocellulosic biomass: challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 385, p. 129460, 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. Rio de Janeiro: 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 04 jan. 2025.

FÁVARO, V. R.; RECH, Â. F. Utilização de resíduos agroindustriais na alimentação de ruminantes. **Agropecuária Catarinense**, v. 35, n. 2, p. 14-16, 2022.

FÉO, D. C.; SOBRINHO, F. L. A. Agrofinanceirização do setor sucroenergético no estado de Minas Gerais. **Geopauta**, v. 8, p. e14292-e14292, 2024.

FERRERO, L. M. M.; ARÁOZ, M. E.; ROBLES, N. L. Life cycle assessment of furfural production from sugarcane bagasse within a circular biorefinery framework. **Biomass and Bioenergy**, v. 208, 108878, 2026.

GABRIEL, L. C. Geração termoeletrica no Brasil a partir da biomassa da cana-de-açúcar. **Revista do Clube Naval**, v. 1, n. 397, p. 14-19, 2021.

GADE, S. D.; ALVES, A. M. S.; BANDEIRA, R. R.; SILVA, I. S. Obtenção de biochar a partir da pirólise controlada de biomassa de açaí. **Open Science Research XX**. São Paulo: Editora Científica Digital Ltda., 2025. p. 31–42. DOI: 10.37885/250619576.

GALVAN, D.; BONA, E. Aplicativo gamma-gui: uma interface gráfica amigável para planejamento de experimentos no MATLAB. **Química Nova**, v. 47, n. 5, p. e-20240005, 2024.

GARCIA, G. A. *et al.* Pré-tratamento termo-ácido e hidrólise enzimática de uma mistura de casca de cacau e bagaço de malte. **Scientia Plena**, v. 19, n. 6, 2023.

GARCIA, J. R. O Brasil rural: interpretações da Economia Ecológica. **O Brasil rural**, p. 222, 2024.

GROTTO, C. G. L. *et al.* Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **ForScience**, v. 9, n. 1, p. e00928-e00928, 2021.

GUERI, M. V. D. *et al.* Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão. **Revista Geama**, v. 7, n. 3, p. 13-27, 2021.

HOANG, T. D.; NGHIEM, N. Recent developments and current status of commercial production of fuel ethanol. Fermentation. MDPI, 1 dez. 2021.

HOFFMANN, L. P. M. *et al.* Comportamento térmico de lignina residual de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 4, p. 353-363, 2021.

HU, Y. *et al.* Domain-specific lignin–carbohydrate interactions govern cell wall deconstruction in wheat straw. **Green Chemistry**, v. 27, n. 46, p. 14824-14837, 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cana-de-açúcar: Produção

agropecuária. *IBGE*, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/sp>. Acesso em: 23 jan. 2025.

JAFARI, S.; SOURKI, A. H. Development and validation of the HPLC method for simultaneous quantification of glucose and xylose in sugar cane bagasse extract. **Journal of Chromatographic Science**, v. 62, n. 8, p. 776-782, 2024.

JIA, Z. *et al.* Hydrothermal and photocatalytic synergistic pretreatment to improve the full utilization of corn stalk. **Bioresource Technology**, v. 363, p. 127989, 2022.

JIMENEZ-GUTIERREZ, J. M. *et al.* Liquid hot water pretreatment of lignocellulosic biomass at lab and pilot scale. **Processes**, v. 9, n. 9, p. 1518, 2021.

JO, H.; KIM, J. S.; LEE, J. Sequential ultrasonic and hydrothermal pretreatment enhances cell wall degradation and enzymatic hydrolysis of pine and yellow poplar. **Industrial Crops and Products**, v. 237, p. 122206, 2025.

JUPPA, A. M. *et al.* Pellets produzidos a partir da biomassa de capim elefante BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 11, n. 1, p. 209-217, 2024.

JUVÊNCIO, J. Q.; SILVA, W. N.; FREIRE, F. N. A. Bibliometric Study of Life Cycle Analysis Applied to Motor Vehicles. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 3, p. e04502-e04502, 2024. Disponível em: doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-042. Acesso em: 06 jun. 2024.

LINHARES, J. E. *et al.* Capacidade para o trabalho e envelhecimento funcional: análise sistêmica da literatura utilizando o proknow-c (knowledge development process-constructivist). *Ciência & Saúde Coletiva*, Paraná, v. 24, n. 1, p. 53-66, jan. 2019.

LONG, Y. *et al.* The evolution of Lignin's role in enzymatic Hydrolysis: From physical barrier to functional enhancer. **Biomass and Bioenergy**, v. 201, p. 108099, 2025.

LONGATI, A. A.; MANICARDI, T.; BAIONI, G. Modelagem, simulação e emissões de CO. **Brazilian congress on process systems engineering**, 3., 2024, São Paulo. São Paulo: USP, 2024. p. 259.

LOPES, B. S.; LOPES, B. G.; FARIA, G. A. Levantamento do planejamento experimental e análises de dados utilizados em experimentos com piscicultura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e115111335049-e115111335049, 2022.

MA, H. *et al.* Hydrothermal Pretreatment Unlocks Waste Paper's Sugar Potential: Enhanced Enzymatic Saccharification via Lignin Removal and Cellulose Decrystallization. **Processes**, v. 13, n. 7, p. 1994, 2025.

MACHADO, G. O. *et al.* Química da madeira no contexto energético. **São Carlos: EESC, USP**, 2016.

MAGALHÃES, G. V. *et al.* Combustível Sólido de Resíduos Silvo-Sucroacooleiro. **Engineering & Technology Scientific Journal**, v. 1, n. 1, 2023.

MANOKHOON, P. *et al.* Effects of combined chemical and hydrothermal pretreatment on papyrus cellulose structure. **Cellulose chemistry and technology**, v. 57, n. 9-10, p. 1041-1051, 2023.

MANZOOR, M. H.; ELSAYED, I.; HASSAN, E. B. Optimization of Hemicellulosic Carbohydrate Extraction from Corncobs via Hydrothermal Treatment: A Response Surface Methodology Approach. **Sustainable Chemistry**, v. 6, n. 3, p. 27, 2025.

MARINHO, C. C. P. *et al.* Pré-tratamento ácido da palha de cana-de-açúcar visando a produção de etanol de segunda geração. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, n. 41, p. 1-14, 2020.

MARQUES, C. A. *et al.* Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e31211124675-e31211124675, 2022.

MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. J. Caracterização química do bagaço de malte e avaliação do seu potencial para obtenção de produtos de valor agregado. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 1, p. 0083-0091, 2020.

MATTOS FILHO. Câmara dos Deputados aprova Projeto de Lei do Combustível do Futuro, 2024. Disponível em: <https://www.mattosfilho.com.br/unico/projeto-combustivel-futuro/#:~:text=O%20Projeto%20de%20Lei%20n%C2%BA,Capture%20and%20Storage%20%E2%80%93%20CCS%2C>. Acesso em: 2 fev. 2025.

MELO, B. P. *et al.* Caracterização físico-química de cultivares do sorgo para produção de bioenergia. **Observatório de la economía latinoamericana**, v. 21, n. 5, p. 2410-2430, 2023.

MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry** Washington, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.

MITSUHARA, A. T.; MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. Caracterização química do bagaço de laranja: potencial rota para uso desse resíduo. **Revista Principia**, v. 62, 2025.

MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, Inc., 7 edition, 2009.

MONTGOMERY, D.C., "Design and Analysis of Experiments", 3ª edição, John Wiley and Sons, 1991.

MORAES, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Chemical analysis of *Pinus oocarpa* wood PARTE I – quantification of macromolecular components and volatile extractives. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MORAES, V. C.; PIOVESAN, S. D.; IRALA, V. B. A importância do engajamento estudantil em vídeos educacionais: uma revisão bibliométrica. **Revista Educar Mais**, v. 6, p. 355-371, 2022.

MOREIRA FILHO, A. A. S.; COSTA, P. V. M. A. Créditos de Descarbonização (CBIOS):

Natureza Jurídica, Negociação e Regime Tributário. **Revista Direito Tributário Atual**, n. 58, p. 45-66, 2024.

NAJAFI, H.; SANI, A. G.; SOBATI, M. A. Thermogravimetric and thermo-kinetic analysis of sugarcane bagasse pith: a comparative evaluation with other sugarcane residues. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 2076, 2024.

NALEVAIKO, J. Z.; CREMONEZ, P. A.; TELEKEN, J. G. Use of agroindustrial by-products in the production of briquettes. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tup, v. 15, n. 1, p. 1–26, 2021. DOI: 10.18011/bioeng2021v15n1p1-26. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/980>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NAVARRETE, A. A. *et al.* As lições para o manejo do solo canavieiro nos primeiros 20 anos de colheita mecanizada no Brasil. Campo Grande, MS: Ed. UFMS, 2021.

NEVES, L. F.; BATISTA, J. L.; PORCIÚNCULA, C. B. Bioprospecção e Screening de bactérias do gênero *Bacillus* com potencial atividade para biodegradação de celulose. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. e10633-e10633, 2024.

NEVES, W. B. P. *et al.* Incorporação de fibra de coco na camada de revestimento asfáltico de pavimentos flexíveis. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 7, n. 1, p. 11-18, 2022.

OLIVEIRA, M. H. R. *et al.* Gestão dos resíduos pós colheita da cana-de-açúcar no cerrado: uso da palhada versus contribuição econômica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 3406-3421, 2020.

OLIVEIRA, R. M. M.; NUNES, M. T. A. S.; SOUSA, R. M. S. Pré-Tratamento Químico e Caracterização do Bagaço da Cana: uma Perspectiva para Produção de Etanol a partir de Resíduos Agroindustriais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 87865-87879, 2020.

OLMEDO, J. Z. R. *et al.* Análise Preliminar do potencial energético da casca de mandioca para formação de Biochar. **Engineering & Technology Scientific Journal**, v. 1, n. 1, 2023.

PAULA, G. P. *et al.* Anaerobic bacterial fermentation: A strategy for hydrogen production. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 1, p. e7814148081-e7814148081, 2025.

PEDRAZZI, C. *et al.* Química da madeira. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais. **Coleção de Ciências Rurais**, n. 27, p. 1984-6118, 2019.

PEIXE, A. M. M.; PINTO, J. S. P. Infometria nas Bases Web of Science e Scopus: Governança Corporativa, Informação e Tecnologia da Informação; Precificação de Ações e Riscos de Mercado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. e56110515433-e56110515433, 2021.

PEREIRA, M. B. *et al.* Otimização dos processos de obtenção de açúcares redutores totais (ART) a partir do bagaço de abacaxi. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 4, p. 13929-13939, 2023.

PETRICOSKI, S. M.; COSTA, M. S. S. M.; OLIVEIRA, A. F. Análise dos parâmetros físicos, químicos e energéticos para produção de pellets a partir de biomassa residual. **Revista Cultivando o Saber**, v. 17, p. 82-97, 2024.

PIŃKOWSKA, H. *et al.* Valorization of White Lupin Straw Through Mild Dilute Acid Hydrothermal Treatment: A Sustainable Route for Monosaccharide and 5-Hydroxymethylfurfural Production. **Energies**, v. 17, n. 22, p. 5668, 2024.

PLIEGO, J. R. JR. Avaliação dos cientistas: utilizamos as métricas corretas?. **Química Nova**, v. 46, p. 222-228, 2023.

RASZL, A. J. *et al.* Extração da Celulose do Bagaço de Cana-de-açúcar e Aplicação como Tecnologia de Fertilizantes de Eficiência Aprimorada. **Revista Virtual de Química**, v. 16, n. 5, 2024.

REIS, M. E. S. *et al.* Síntese e Caracterização Espectroscópica do Dióxido de Silício (SiO₂) Obtido a partir da Calcinação do Bagaço da Cana-de-Açúcar. **Revista Processos Químicos**, v. 19, n. 36, p. 75-82, 2024.

RODRIGUES, J. S. *et al.* Isolamento e caracterização de lignina acetossolve extraída do bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Virtual Química**, v. 12, n. 4, 2020.

RODRIGUES, J. S.; ARAÚJO, L. C.; ALBUQUERQUE, A. C. Hidrogéis derivados de lignina. **Hidrogéis derivados de polímeros naturais: Desenvolvimento e aplicações**, 2022.

RODRIGUES, T. L. *et al.* Efeitos das condições experimentais no processo de deslignificação dos resíduos da casca de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) via pré-tratamento alcalino. **Congresso brasileiro de sistemas particulados**. 2022.

ROSA, J. M. A.; PINHEIRO, I. R. Planejamento Experimental DCCR aplicando a Hidrólise Enzimática do bagaço de Laranja empregando as enzimas Celulases e Pectinases. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 3191-3208, 2021.

ROUABHIA, A. *et al.* Unlocking the Potential of Lignocellulosic Biomass: Microwave and Hydrothermal Pretreatment to Improve the Production of High Value-Added Biorefinery Compounds. **Energy & Fuels**, v. 39, n. 42, p. 20383-20396, 2025.

ROUABHIA, A.; ÁLVAREZ-GALLEGO, C. J.; FERNÁNDEZ-GÜELFO, L. A. Effect of hydrothermal pretreatment time on biochemical recovery and hydrogen production from lignocellulosic feedstocks. **Applied Sciences**, v. 15, n. 15, p. 8736, 2025.

RUCHALA, J.; SIBIRNY, A. A. Pentose metabolism and conversion to biofuels and high-value chemicals in yeasts. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 45, n. 4, p. fuaa069, 2021.

SALIMIFARD, A. *et al.* An in-depth analysis of the sugar industry's waste management approaches in the context of the circular economy framework: A comprehensive systematic review. **Waste Management & Research**, p. 0734242X251361736, 2025.

SÁNCHEZ, J. G. S.; VÁZQUEZ, D. J.; RIBA, S. S. Una revisión sistemática de la

importancia del ejercicio físico sobre la autoeficacia y aprendizaje del estudiante. **Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación**, n. 48, p. 911-918, 2023.

SANTOS, F. A. Produção de celulases por *Penicillium* sp. FSDE15 e hidrólise enzimática do sabugo de milho. 2021. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/21200>. Acesso em: 01 fev. 2025.

SANTOS, M. R. *et al.* Objetivos de desenvolvimento sustentável e a cultura da cana-de-açúcar para produção de etanol. **Caderno de Administração**, v. 31, n. 2, p. 134-155, 2023.

SANTOS, M. V. G. *et al.* A importância da visualização dos gráficos e tabelas para o complemento do aprendizado. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 6, n. 2, p. 11-11, 2020.

SANTOS, V. C. S. *et al.* FTIR and TGA/DTG characterization of sugarcane waste. **Blucher Engineering Proceedings**, v. 9, p. 142-149, 2022.

SHEN, R.; GU, S.; BRIDGWATER, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers*, v.82, p. 39-45, 2010.

SILVA, A. S. *et al.* Constraints and advances in high-solids enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: a critical review. *Biotechnology for Biofuels*, v. 13, p. 1-28, 2020. Disponível em: doi.org/10.1186/s13068-020-01697-w. Acesso em: 06 jun. 2020.

SILVA, E. P. Desenvolvimento de combustível compactado derivado de resíduos sólidos urbanos e biomassa: estudo do efeito da composição da biomassa e da adição de glicerol como aglutinante. **Revista UNICREA-Revista Técnico Científica da Universidade Corporativa do Crea-SC**, v. 2, n. 3, p. 54-80, 2024.

SILVA, G. A. *et al.* Fungo do cerrado com potencial para produção de enzima celulase. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 17, n. 2, 2020.

SILVA, H. D. M. *et al.* Produção e caracterização do biocarvão obtido de palha de cana-de-açúcar. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 4, p. e20230218, 2023.

SILVA, J. H. B. *et al.* Uso de vinhaça concentrada e enriquecida como biofertilizante na cana-de-açúcar: Uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 2, 2023.

SILVA, L. M. R. *et al.* Modelagem e estudo termodinâmico da valorização termoquímica de resíduos agroindustriais da Amazônia visando a produção de hidrogênio utilizando a tecnologia de gaseificação em água supercrítica. **Brazilian Journal of Development**, v. 11, n. 1, p. e76519-e76519, 2025.

SILVA, M. H. B. P. *et al.* Cinética de pirólise para o sorgo lignocelulósico: análise de dados termogravimétricos para aplicação do modelo de Friedman. **Química Nova**, v. 45, n. 02, p. 171-177, 2022.

SILVA, P. H. N. *et al.* Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica: Revisão. **Anais do II**

congresso da rede brasileira de bioquerosene e hidrocarbonetos sustentáveis de aviação. Editora Científica Digital, 2024. p. 45-47.

SILVA, R. B.; MANTESE, M. A.; FLORIAN, F. O bagaço da cana-de-açúcar na geração de energia. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 4, n. 1, p. e414526-e414526, 2023.

SILVA, T. A. L. *et al.* Avaliação do pré-tratamento hidrotérmico com descompressão rápida seguido de reações de deslignificação alcalina na hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar. **Congresso internacional de biomassa**, 5., 2020, Goiânia. *Anais eletrônicos*. Goiânia: [s.n.], 2020.

SIMÕES, I. R.; BRONDI, M. G.; FARINAS, C. S. Avaliação da combinação de aditivos para aumentar a eficiência do processo de sacarificação enzimática da biomassa lignocelulósica. 2022.

SIMONSEN, T. I.; DJAJADI, D. T.; THOMSEN, S. T. Modified Hydrothermal Pretreatment Conditions Enhance Alcohol Solubility of Lignin from Wheat Straw Biorefining. **Biomass**, v. 5, n. 2, p. 23, 2025.

SOUZA, L. R.; DOMINICES, K. M. C. Estudo da influência da concentração de ácido sulfúrico no pré-tratamento ácido das ramas da batata-doce para a obtenção de etanol de segunda geração. **Avanços em ciência e tecnologia de alimentos-volume 3**. Editora Científica Digital, 2021. p. 410-423.

SOUZA, L. S. S. Fracionamento de bagaço de cana-de-açúcar combinando tratamentos com solvente eutético profundo e ácido diluído. 2023. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/27984>. Acesso em: 01 fev. 2025.

SOUZA, N. M. *et al.* Eficiência da hidrólise ácida e explosão a vapor na liberação de pentoses e hexoses de resíduos agroindustriais. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 8, p. 12078-12095, 2023.

SUN, D. *et al.* Effects of hydrothermal pretreatment on the dissolution and structural evolution of hemicelluloses and lignin: a review. **Carbohydrate Polymers**, v. 281, p. 119050, 2022.

SUN, Q. *et al.* Ultrastructural change in lignocellulosic biomass during hydrothermal pretreatment. *Bioresource Technology*, v. 341, n. July, p. 125807, 2021. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125807.

SUSHKOVA, V. I. Analysis of flow process schemes for producing ethanol and its co-products from lignocellulose-containing raw materials (review). *Chemistry of Plant Raw Materials*, no. 2, pp. 5-27, 2025.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2024. 864 p. ISBN 9786558822127.

TEIXEIRA, A. J. *et al.* Hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos e caracterização

bromatológica para ração animal. **Ciência Rural**, v. 53, p. e20210720, 2022.

TEODORO, N. R.; OLIVEIRA, G. S. Análise de Conteúdo: um método de qualitativo. **Humanidades e tecnologia (FINOM)**, v. 46, n. 1, p. 55-62, 2024.

THAKUR, B.; SINGH, A.; KAUR, S. Chapter 15 - Digitalization for strategic and tactical planning for biofuel production from lignocellulosic feedstock. *Biofuels from Lignocellulosic Biomass*, v. 2: Biofuels Woodhead Series in Bioenergy, 2026, p. 419-440.

TISCHER, W.; GONZÁLEZ, M. A. S. A produção do espaço urbano em cidades médias a partir das novas demandas de classe média—a importância de garagens, suítes e dormitórios de apartamentos em Chapecó (SC). **Revista de Arquitetura IMED**, v. 11, n. 1, p. 56-70, 2022.

TOMASI, M. *et al.* O uso da fermentação para produção de alimentos e bebidas. **Anais da Feira de Ciência, Tecnologia, Arte e Cultura do Instituto Federal Catarinense do Campus Concórdia**, v. 6, n. 1, p. 49-49, 2023.

UDOP – UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. Expandir o cultivo de cana, milho e soja em terras degradadas pode triplicar produção de bioenergia no Brasil. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2025/11/24/expandir-o-cultivo-de-cana-milho-e-soja-em-terras-degradadas-pode-triplicar-producao-de-bioenergia-no-brasil>. Acesso em: 20 fev. 2026.

ULIANA, M. R. *et al.* Maximizando o etanol de segunda geração a partir de biomassa. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, p. e12577-e12577, 2024.

UNICA – União da Indústria de cana-de-açúcar. Uso do etanol evita 515 milhões de toneladas de CO₂, junho 2020. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evita-515-milhoes-de-toneladas-de-co2-na-atmosfera/>. Acesso em: 23 jan. 2025.

VEZARO, F. D. *et al.* Hidrólise com água subcrítica em modo semi-contínuo da palha de milho residual visando a obtenção de açúcares fermentescíveis. **Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás**, 12., 2024. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2024.

VIEIRA FILHO, J. R.; QUEIROZ, S.; LIMA, L. M. A utilização de resíduos da uva no desenvolvimento de novos produtos, no contexto da economia circular. **Revista de Iniciação Científica da Libertas**, v. 12, n. 1, 2024.

VIEIRA, E. M.; FARIAS, E. S. Estudo de Possíveis Fontes de Combustível com Base no Poder Calorífico e Exergia Química para Fundição de Alumínio. **Revista Ifes Ciência**, v. 7, n. 1, p. 01-09, 2021.

VIOLA, E.; MENDES, V. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e02462, 2022.

WELLS, J. M. *et al.* Hot water pretreatment of lignocellulosic biomass: Modeling the effects of temperature, enzyme and biomass loadings on sugar yield. **Bioresource Technology**, v. 300, p. 122593, 2020.

XAVIER, C. S. F. *et al.* Secagem e avaliação do bagaço de cana de açúcar como adsorvente de corantes têxteis presentes em soluções aquosas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e12937, 2021.

YUAN, J. C. *et al.* Facile production of cellulose nanofibers from raw elephant grass by an aluminum chloride-enhanced acidic deep eutectic solvent. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 246, p. 125687, 2023.

ZAMBELLO, I. U. *et al.* Techno-economic analysis of sugarcane bagasse and straw conversion into cellulosic ethanol via consolidated bioprocessing. **Renewable Energy**, v. 259, 125094, 2026.

ZHANG, Z. *et al.* Liquid hot water pretreatment technology: opening a new chapter in the green transformation and high-value utilization of biomass resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 203, p. 108278, 2025.

ANEXO I



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS
RENOVÁVEIS



REQUERIMENTO

Prezados Dr. Guilherme Cordeiro e Dr.^a Marlene Oliveira, venho respeitosamente solicitar a doação de palha e bagaço de cana-de-açúcar para fundamentar a pesquisa de mestrado que tem por título o “Estudo do pré- tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol”. A presente pesquisa é justificada em detrimento ao aproveitamento de biomassa residual para produção de etanol entrando em concordância com os princípios estabelecidos nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS e na Química Verde.

Discente Responsável
Lucas Vinicius Borges Pereira

Orientadora
Prof.^a Dr.^a Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

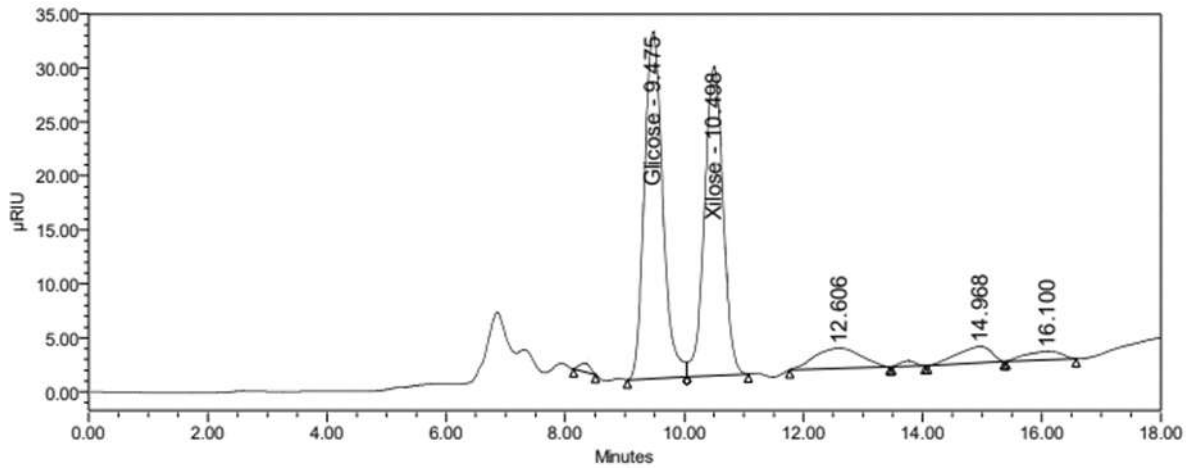


Documento assinado digitalmente
JOELDA DANTAS
Data: 01/09/2024 22:01:58-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Coorientadora
Prof.^a Dr.^a Joelda Dantas

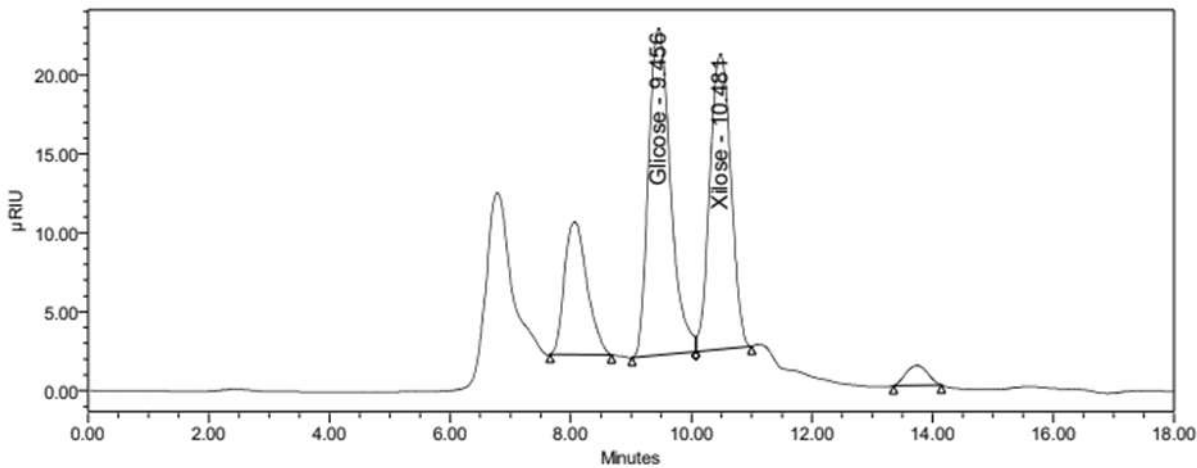
APÊNDICE A

Figura A.1 Cromatograma ilustrativo para o ensaio 6 referente ao tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.



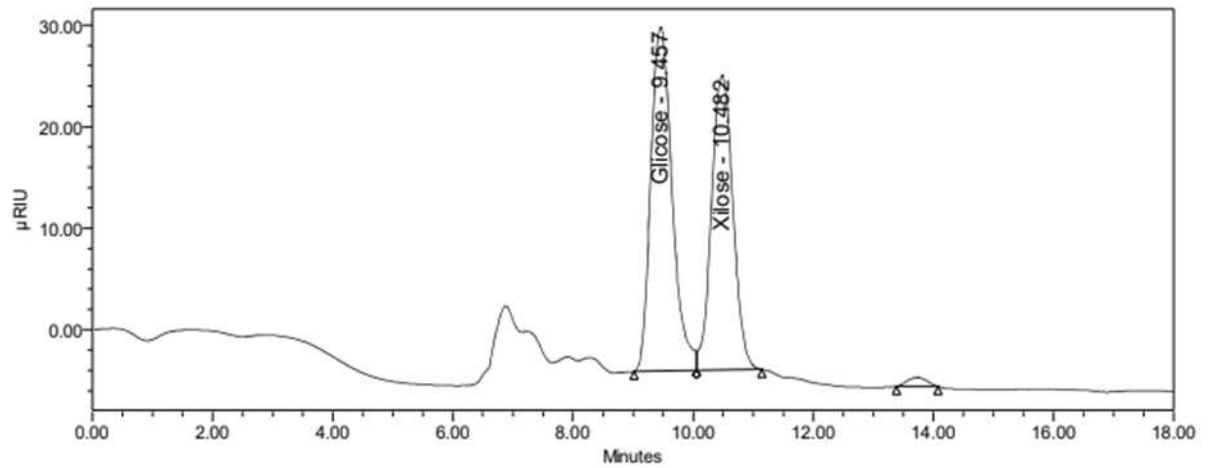
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura A.2 Cromatograma ilustrativo para o ensaio 7 referente a metodologia *Steep Ascent* no tratamento com água quente da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura A.3 Cromatograma ilustrativo para o ensaio 4 no pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

CURRÍCULO VITAE

- Artigos completos publicados em periódicos:

SOUSA, A. A. R.; DANTAS, J.; **PEREIRA, L. V. B.**; SILVA, K. C. G. WTP sludge: a bibliometric and systematic review on thermochemical conversion to bioproducts and sustainability. *Aracê – direitos humanos em revista*, v. 7, p. 14654-14677, 2025.

PEREIRA, L. V. B.; VASCONCELOS, S. M. ; FERNANDES, P. C. R. ; DANTAS, J. Sustentabilidade na gestão de resíduos do setor sucroalcooleiro: um estudo bibliométrico e sistemático. *Revista Ação Sustentável Global*, v. 5, p. 2-15, 2025.

- Capítulos de livros publicados:

SOUSA, A. A. R.; DANTAS, J.; **PEREIRA, L. V. B.**; SILVA, K. C. G. WTP sludge: a bibliometric and systematic review on thermochemical conversion to bioproducts and sustainability. *The Impact of Innovation: Navigating Through Multidisciplinary Research*. 1ed.: Seven Editora, 2025, v. 1, p. 97.

PEREIRA, L. V. B.; FERNANDES, P. C. R.; LEAL, E.; DANTAS, J. Revisão bibliométrica do pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar com a relação com a produção de etanol convencional. *Sustentabilidade, Meio Ambiente e Responsabilidade Social: Artigos Seleccionados - Volume 10*. 1ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2025, v. 10, p. 59-73.

- Trabalhos publicados em anais de congressos:

PEREIRA, L. V. B.; FERNANDES, P. C. R.; DANTAS, J. Pré-tratamento hidrotérmico da palha e do bagaço de cana-de-açúcar para produção de etanol: estudo bibliométrico e sistêmico. In: *SUSTENTARE & WIPIS 2024, 2025, PUC-Campinas e USP. Livro de Memórias do Sustentare & WIPIS*. Recife: Even3, 2024.

PEREIRA, L. V. B.; VASCONCELOS, S. M.; FERNANDES, P. C. R.; DANTAS, J.. Sustentabilidade na gestão de resíduos do setor sucroalcooleiro: um estudo bibliométrico e sistemático. In: *4º Congresso Brasileiro de Educação Empreendedora, Sustentabilidade e Inovação*, 2025, Rio de Janeiro. CVBEESI, 2025. p. 38-50.

DUARTE, J. R. H.; **PEREIRA, L. V. B.**; BEZERRA, F. C.; FERNANDES, P. C. R.; DANTAS, J. Tratamento alternativo de água potável com coagulantes naturais: uma abordagem bibliométrica. In: *SUSTENTARE & WIPIS 2024, 2025, PUC-Campinas e USP. Livro de Memórias do Sustentare & WIPIS*. Recife: Even3, 2024.

PEREIRA, L. V. B.; GONCALVES, L. C. T. C.; DANTAS, J. Xylitol Production from Sugar and Alcohol Industry Waste. In: *10th Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy*, 2024, Belgrado. Energetics, 2024. p. 307-314.

MOREIRA, P. P.; FRANÇA, L. M.; **PEREIRA, L. V. B.**; NETO, J. F. S; FERNANDES, P. C. R. Obtaining Optical Radiation Splitters for Hybrid Photovoltaic and Thermal Systems. In: 10th Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy, 2024, Belgrado. Energetics, 2024. p. 207-212.