VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA AGRÍCOLA COMO ESTRATÉGIA PARA A TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL NA MICRORREGIÃO DO EXTREMO SUL CATARINENSE

ENERGY VALORIZATION OF AGRICULTURAL BIOMASS AS A STRATEGY FOR SUSTAINABLE TRANSITION IN THE EXTREME SOUTHERN SANTA CATARINA MICROREGION

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LA BIOMASA AGRÍCOLA COMO ESTRATEGIA PARA LA TRANSICIÓN SOSTENIBLE EN LA MICRORREGIÓN DEL EXTREMO SUR DE SANTA CATARINA

Apresentação: Comunicação Oral

Kahique de Castro Tristão[1]; Gessica Candiotto Possamai[2]; Carlos Rafael Silva de Oliveira[3]; Luiz Fernando Belchior Ribeiro[4]; Afonso Henrique da Silva Júnior[5]

DOI: https://doi.org/10.31692/2526-7701.VCOINTERPDVAgro.0012

RESUMO

Este artigo de pesquisa objetivou investigar o potencial da biomassa agrícola como fonte renovável para a geração descentralizada de energia na microrregião de Araranguá, localizada no extremo sul do estado de Santa Catarina. A fundamentação teórica contempla os princípios da transição energética justa, do desenvolvimento rural sustentável e da eficiência técnico-econômica de diferentes rotas de conversão energética da biomassa. A metodologia adotada é de natureza exploratória e descritiva, com análise do contexto socioambiental e energético regional. Foram utilizados dados secundários de instituições como EPAGRI, EMBRAPA e IBGE, processados por meio de estimativas técnico-comparativas para avaliar o potencial energético de rotas como produção de biogás, bio-óleo, carvão vegetal, *syngas*, etanol e combustão direta. A análise considerou parâmetros como produtividade agrícola (t/ha), geração de resíduos por hectare, composição química dos resíduos (celulose, hemicelulose, lignina, umidade e cinzas), poder calorífico inferior (PCI) e rendimentos específicos de cada tecnologia. Na área de estudo, identificou-se a presença de diversas culturas agrícolas, entre elas soja, milho, arroz, feijão, mandioca, trigo, banana e tabaco, além de resíduos agroindustriais associados, como palhas, cascas e sabugos. Os resultados indicaram que o milho apresenta o maior rendimento energético, especialmente nas rotas de produção de biogás (até 795.171,7 MJ/ha) e bio-óleo. Mandioca e arroz demonstraram alto potencial para bio-óleo e carvão vegetal, enquanto a soja destacou-se para biogás e etanol. Culturas como banana e feijão, embora menos expressivas na matriz energética industrial, revelaram-se promissoras para biogás e bio-óleo. Conclui-se que a valorização dos resíduos agrícolas para fins energéticos

[1] Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), kahique.tristao@grad.ufsc.br
[2] Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), gessica.candiotto.possamai@posgrad.ufsc.br
[3] Programa de Pós-Graduação em Nanociência, Processos e Materiais Avançados (PPGNPMAT), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), carlos.oliveira@ufsc.br
[4] Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGES), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), luiz.ribeiro@ufsc.br
[5] Doutor em Engenharia Química, Departamento de Energia e Sustentabilidade (EES), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), afonso.silva@ufsc.br

pode fortalecer a bioeconomia regional, promover a autossuficiência energética de pequenos produtores e incentivar a inovação no campo, desde que apoiada por políticas públicas, capacitação técnica e incentivos à geração distribuída.
Palavras-Chave: Biomassa Agrícola, Transição Energética Sustentável, Rotas de Conversão Energética, Resíduos Agroindustriais, Bioenergia Descentralizada.

RESUMEN
Este artículo de investigación tuvo como objetivo investigar el potencial de la biomasa agrícola como fuente renovable para la generación descentralizada de energía en la microrregión de Araranguá, ubicada en el extremo sur del estado de Santa Catarina, Brasil. El marco teórico contempla los principios de la transición energética justa, el desarrollo rural sostenible y la eficiencia técnico-económica de distintas rutas de conversión energética de la biomasa. La metodología adoptada es de carácter exploratorio y descriptivo, con análisis del contexto socioambiental y energético regional. Se utilizaron datos secundarios de instituciones como EPAGRI, EMBRAPA e IBGE, procesados mediante estimaciones técnico-comparativas para evaluar el potencial energético de rutas como biogás, bioaceite, carbón vegetal, gas de síntesis, etanol y combustión directa. El análisis consideró parámetros como productividad agrícola (t/ha), generación de residuos por hectárea, composición química de los residuos (celulosa, hemicelulosa, lignina, humedad y cenizas), poder calorífico inferior (PCI) y rendimientos específicos de cada tecnología. En la zona de estudio se identificó la presencia de diversos cultivos agrícolas, entre ellos soja, maíz, arroz, frijol, yuca, trigo, plátano y tabaco, además de residuos agroindustriales como pajas, cáscaras y mazorcas. Los resultados indicaron que el maíz presenta el mayor rendimiento energético, especialmente en las rutas de biogás (hasta 795.171,7 MJ/ha) y bioaceite. La yuca y el arroz mostraron alto potencial para bioaceite y carbón vegetal, mientras que la soja se destacó en biogás y etanol. Cultivos como el plátano y el frijol, aunque menos representativos en la matriz energética industrial, también demostraron rendimientos prometedores en bioaceite y biogás. Se concluye que la valorización energética de los residuos agrícolas puede contribuir significativamente al fortalecimiento de la bioeconomía regional, promover la autosuficiencia energética de pequeños productores e incentivar la innovación en el medio rural, siempre que esté acompañada de políticas públicas, capacitación técnica e incentivos a la generación distribuida.
Palabras Clave: Biomasa Agrícola, Transición Energética Sostenible, Rutas de Conversión Energética, Residuos Agroindustriales, Bioenergía Descentralizada.

ABSTRACT
This research article aimed to investigate the potential of agricultural biomass as a renewable source for decentralized energy generation in the microregion of Araranguá, located in the extreme south of the state of Santa Catarina, Brazil. The theoretical framework considers the principles of just energy transition, sustainable rural development, and the techno-economic efficiency of various biomass energy conversion routes. The adopted methodology is exploratory and descriptive in nature, involving an analysis of the regional socio-environmental and energy context. Secondary data from institutions such as EPAGRI, EMBRAPA, and IBGE were used and processed through technical-comparative estimates to assess the energy potential of conversion routes such as biogas, bio-oil, charcoal, syngas, ethanol, and direct combustion. The analysis considered parameters such as agricultural productivity (t/ha), waste generation per hectare, chemical composition of residues (cellulose, hemicellulose, lignin, moisture, and ash), lower heating value (LHV), and specific yields of each technology. The study area revealed the presence of various crops, including soybean, corn, rice, beans, cassava, wheat, banana, and tobacco, in addition to agro-industrial residues such as straw, husks, and cobs. The results indicated that corn has the highest total energy yield, especially through the biogas (up to 795,171.7 MJ/ha) and bio-oil routes. Cassava and rice showed high potential for bio-oil and charcoal, while soybean performed well for biogas and ethanol. Crops such as banana and beans, although less prominent in the industrial energy matrix, also showed promising yields in bio-oil and biogas conversion. It is concluded that the energy valorization of agricultural residues can significantly contribute to strengthening the regional bioeconomy, promoting energy self-sufficiency for small producers, and fostering innovation in rural areas, provided it is supported by public policies, technical training, and incentives for distributed generation.
Keywords: Agricultural Biomass, Sustainable Energy Transition, Energy Conversion Routes, Agro-industrial Residues, Decentralized Bioenergy.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, a crescente demanda por energia e a necessidade de descentralização da matriz energética brasileira impõem desafios significativos à sustentabilidade do setor energético nacional. Desde a abertura econômica da década de 1990, impulsionada por processos de globalização, o Brasil vem passando por transformações estruturais que impactaram diretamente seu planejamento energético. No entanto, a elevada dependência da geração hidrelétrica revelou vulnerabilidades, como evidenciado pelos apagões dos anos 1990, pelas recorrentes crises hídricas e pela adoção do sistema de bandeiras tarifárias, reflexos diretos da instabilidade no fornecimento e da escassez hídrica (LUCENA et al., 2009).

Além dessas limitações, observa-se a dificuldade persistente das distribuidoras em garantir o fornecimento de energia elétrica de forma universal e de qualidade, sobretudo em áreas rurais (SLOUGH; URPELAINEN; YANG, 2015). Diante desse cenário, a biomassa agrícola desponta como alternativa estratégica para uma transição energética justa, ao associar renovabilidade, aproveitamento de resíduos agroindustriais e maior autonomia energética, especialmente em territórios com forte vocação agropecuária.

A biomassa agrícola compreende tanto produtos do agronegócio, como grãos, tubérculos, frutas e hortaliças, quanto subprodutos e resíduos gerados ao longo das cadeias produtivas, incluindo cascas, caules, folhas e sabugos. Os biocombustíveis derivados dessa biomassa são, em geral, classificados como de primeira ou segunda geração. Os de primeira geração utilizam matérias-primas alimentícias e contam com tecnologias de conversão consolidadas e economicamente viáveis, ainda que em detrimento da segurança alimentar. Já os de segunda geração empregam resíduos lignocelulósicos, sendo ambientalmente mais sustentáveis por não competirem com o setor alimentício, embora suas tecnologias ainda estejam em processo de desenvolvimento e escalonamento industrial (SIMS et al, 2010).

As características físico-químicas da biomassa influenciam diretamente a escolha das rotas tecnológicas de conversão. Biomassas lignocelulósicas, ricas em celulose, hemicelulose e lignina, são mais adequadas a processos termoquímicos, como a combustão, gaseificação e pirólise, resultando em energia térmica, elétrica e biocombustíveis sólidos, como o carvão vegetal. Já biomassa de origem oleaginosa é direcionada à produção de biocombustíveis líquidos, principalmente o biodiesel, via transesterificação dos óleos vegetais. A escolha da rota ideal deve considerar a composição química, a disponibilidade logística e os aspectos econômicos da biomassa, visando maximizar a eficiência energética e a viabilidade dos sistemas descentralizados.

Com base nessas premissas, este artigo tem como objetivo analisar o potencial da biomassa agrícola

como vetor de transição energética no Brasil, com foco na microrregião do Extremo Sul Catarinense (AMESC). Busca-se evidenciar a importância da valorização de recursos locais para integrar sustentabilidade ambiental, desenvolvimento regional e inovação tecnológica. A experiência da AMESC poderá, assim, servir de modelo replicável para outras regiões do país que compartilham características semelhantes e que almejam fomentar uma economia de baixo carbono.

A estrutura deste artigo contempla, inicialmente, uma abordagem teórica sobre o papel da biomassa agrícola na transição energética sustentável. Em seguida, será apresentada uma caracterização da microrregião da AMESC, incluindo aspectos geográficos, econômicos e produtivos. Na terceira seção, será realizada uma análise do potencial energético dos resíduos agrícolas locais, considerando diferentes rotas de conversão e tecnologias disponíveis. Por fim, o artigo apresenta as conclusões e recomendações, traçando caminhos para a viabilização técnica, econômica e ambiental da bioenergia descentralizada na região.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transição energética configura-se como um processo estrutural de reorganização dos sistemas de produção, distribuição e consumo de energia, caracterizado pela substituição progressiva de fontes fósseis por fontes renováveis, de menor impacto ambiental e maior sustentabilidade sistêmica (HEFFRON, 2022). Ao longo da história, transições energéticas ocorreram em períodos de profundas transformações tecnológicas e econômicas, como a substituição da lenha pelo carvão mineral durante a Revolução Industrial e, posteriormente, a ascensão do petróleo como principal fonte energética no século XX.

No contexto brasileiro, a transição energética apresenta especificidades derivadas da estrutura da matriz elétrica nacional, historicamente baseada em recursos hídricos. Atualmente, cerca de 60% da capacidade instalada de geração elétrica no país é oriunda de usinas hidrelétricas, o que confere um perfil predominantemente renovável. Contudo, essa dependência torna o sistema suscetível às variabilidades climáticas, sobretudo em períodos de estiagem prolongada, implicando riscos à segurança energética. A diversificação da matriz, portanto, emerge como estratégia fundamental, especialmente com a inclusão de fontes como a biomassa agrícola, capazes de complementar a geração e promover maior estabilidade e resiliência ao sistema.

A concepção de transição energética justa amplia esse debate ao incorporar dimensões sociais e territoriais, ao preconizar uma transição segura, equitativa e sustentável, assegurando que comunidades e trabalhadores anteriormente dependentes de cadeias energéticas convencionais não sejam excluídos do processo (IEA, 2021). No Brasil, essa perspectiva é respaldada por marcos normativos como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), o Plano

Nacional de Energia (PNE) e, mais recentemente, pela Lei nº 14.300/2022, que institui o novo marco regulatório da micro e minigeração distribuída, consolidando o papel das energias renováveis descentralizadas como vetor de desenvolvimento regional.

Nesse cenário, a biomassa agrícola apresenta-se como uma alternativa promissora. Estima-se que o Brasil produza, anualmente, mais de 1 bilhão de toneladas de resíduos agrícolas, incluindo bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, casca de arroz e outros subprodutos oriundos das cadeias do agronegócio (EPE, 2022). Tais resíduos, frequentemente subutilizados ou descartados de forma inadequada, apresentam elevado potencial energético. Seu aproveitamento na geração de energia contribui para a redução da pressão sobre outras fontes convencionais, além de mitigar emissões de metano e outros gases de efeito estufa oriundos da decomposição natural da biomassa residual.

Ademais, o Brasil é signatário de acordos internacionais que reforçam a urgência de uma transição energética sustentável, como o Acordo de Paris (2015), e conta com programas nacionais como o RenovaBio e o Programa Nacional de Bioenergia, que incentivam o uso de fontes renováveis e a descarbonização do setor energético. Ainda assim, observa-se um subaproveitamento do potencial da biomassa agrícola no contexto nacional. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2023), a biomassa representa aproximadamente 9% da capacidade instalada de geração elétrica. Embora significativa, essa participação revela amplo espaço para expansão, considerando-se a disponibilidade territorial e a oferta contínua de resíduos agroindustriais.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza exploratória e descritiva, com abordagem quantitativa, cujo objetivo é avaliar o potencial energético de diferentes culturas agrícolas a partir da análise dos resíduos agroindustriais disponíveis na microrregião de Araranguá (SC), pertencente à Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC). A investigação busca fornecer subsídios técnicos para o aproveitamento energético da biomassa agrícola, considerando aspectos de viabilidade tecnológica, produtiva e estratégica.

O delineamento metodológico adotado fundamentou-se na revisão bibliográfica e na coleta de dados secundários oriundos de fontes oficiais e reconhecidas, como a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), além de artigos científicos e publicações técnicas especializadas na área de bioenergia.

Os dados agrícolas referentes à área plantada, produtividade média (t/ha) e tipos de resíduos gerados foram coletados para as principais culturas da região, com ênfase em milho, soja, arroz, trigo, feijão e mandioca. A quantificação dos resíduos disponíveis foi realizada com base em fatores de geração

por hectare extraídos da literatura técnica. Posteriormente, os resíduos foram classificados de acordo com suas características predominantes, lignocelulósicas, oleaginosas ou amiláceas, a fim de selecionar as rotas tecnológicas mais adequadas para sua conversão energética.

Para estimar o potencial energético das culturas agrícolas analisadas, foram realizados cálculos baseados em três parâmetros principais: a produtividade de resíduos (PR) em toneladas por hectare (t/ha), o rendimento do combustível (RC) obtido por quilograma de biomassa (em L/kg, m³/kg ou kg/kg), e o poder calorífico inferior (PCI) do combustível produzido (em MJ/L, MJ/m³ ou MJ/kg).

A **Equação (1)** utilizada para o cálculo do potencial energético por hectare cultivado (Ep) foi a seguinte (PIERRI et al. (2016)):

$$Ep=PR\times1.000\times RC\times PCI \quad (1)$$

Legendas:

Ep = Energia potencial (em MJ/ha)

PR = Produtividade de resíduos da cultura (em t/ha)

1.000 = Fator de conversão de toneladas para quilogramas

RC = Rendimento do combustível por kg de biomassa (L/kg, m³/kg ou kg/kg)

PCI= Poder calorífico inferior do combustível (MJ/L, MJ/m³ ou MJ/kg)

A conversão dos resíduos em energia foi estimada com base nos valores de Poder Calorífico Inferior (PCI), expressos em megajoules por tonelada (MJ/t). Para cada rota tecnológica de valorização (biogás, bio-óleo, carvão vegetal, *syngas*, biodiesel e etanol), aplicaram-se fórmulas de estimativa energética que consideraram parâmetros específicos como: teor de umidade, conteúdo de cinzas, fração de lignina e a eficiência média de conversão (%), conforme descrito na literatura.

Os resultados obtidos foram organizados em tabelas comparativas, com o objetivo de analisar a viabilidade técnica e estratégica das culturas avaliadas, considerando o potencial de rendimento energético por cultura no período de 2025 a 2025.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microrregião de Araranguá, situada no extremo sul do estado de Santa Catarina, é composta por 15 municípios que integram a Associação dos Municípios do Extremo Sul Catarinense (AMESC): Araranguá, Balneário Arroio do Silva, Ermo, Jacinto Machado, Maracajá, Meleiro, Morro Grande, Passo de Torres, Praia Grande, Santa Rosa do Sul, São João do Sul, Sombrio, Timbé do Sul e Turvo. A região apresenta clima subtropical úmido, com elevada pluviosidade anual e alta umidade relativa do ar, fatores que contribuem para uma reduzida amplitude térmica e invernos relativamente amenos quando comparados às regiões oeste e serrana do estado.

O relevo predominante é plano a suavemente ondulado, favorecendo a mecanização agrícola. Os solos

apresentam variação significativa, com áreas de baixa drenagem e textura arenosa, bem como regiões com solos mais férteis e bem drenados, aptos ao cultivo intensivo. Essas condições edafoclimáticas, aliadas à presença de cooperativas agrícolas, infraestrutura logística (proximidade da rodovia BR-101 e acesso a portos) e políticas de incentivo à produção agropecuária, consolidam a agricultura como a principal atividade econômica da região. A disponibilidade hídrica é outro fator estratégico: de 41 pontos de captação de água registrados, 13 são provenientes de rios ou cursos d'água, 6 de açudes e nascentes, e apenas um depende do abastecimento público (EPAGRI, 2021).

Em termos de produção agrícola, a região apresenta destaque para a rizicultura, com 58.848 hectares cultivados com arroz irrigado, seguida pela cultura do milho destinado à indústria (7.912 ha) e para silagem (4.859 ha). A soja ocupa a quarta posição em área plantada (1.448 ha), seguida pelo feijão (643 ha) e pelo trigo (550 ha). Na fruticultura, a produção é centrada nas variedades de banana prata (3.701 ha) e banana caturra (1.628 ha). Outras culturas relevantes incluem a mandioca para fins industriais (1.495 ha), a mandioca de mesa (513 ha) e o fumo (5.456 ha) (EPAGRI, 2024/2025).

Entre as culturas oleaginosas, destaca-se a soja (*Glycine max* (L.) Merr.), cuja produção na microrregião alcançou 4.933 toneladas no período de 2024 a 2025, com produtividade média de 3.407 kg/ha. Os municípios de Araranguá e Turvo concentram os maiores volumes de produção (EPAGRI, 2025).

A soja é uma leguminosa da família Fabaceae, com ciclo produtivo entre 90 e 122 dias, amplamente cultivada no Brasil para fins alimentícios, industriais e energéticos, especialmente como matéria-prima para a produção de biocombustíveis.

Do ponto de vista químico, a semente de soja apresenta elevado teor de lipídios (Tabela 1), predominando os triglicerídeos, seguidos por fosfolipídios e glicolipídios. A fração de amido é residual, geralmente inferior a 1% do peso seco, enquanto os açúcares solúveis variam entre 5,7% e 7% da massa total da semente. Entre os principais monossacarídeos e oligossacarídeos presentes destacam-se a sacarose, rafinose, glicose e frutose, os quais podem influenciar o comportamento térmico e energético da biomassa durante processos de conversão.

Tabela 1: Composição molecular do grão de soja (% m/m)

Componentes	Percentual da massa total
Lipídios	24,3
Açúcares	12
Amido	1
Celulose	7
Hemicelulose	5
Lignina	2
Cinzas	6

Umidade	9

Fonte: MIGLANI e SHARMA (2016); MORETTI et al. (2020); AGYENIM-BOATENG et al. (2023).

As culturas amiláceas e açucareiras são caracterizadas por elevados teores de carboidratos estruturais ou solúveis, como o amido e os açúcares simples, os quais constituem substratos ideais para processos fermentativos voltados à produção de etanol e biogás.

Milho (*Zea mays* L.)

Pertencente à família Poaceae, o milho é uma gramínea originária da América Central, com ampla adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, sendo cultivado tanto em ambientes úmidos quanto secos. Na safra de 2024/2025, a produção total da cultura (incluindo milho para comércio e silagem) alcançou 279.526 toneladas, com destaque para os municípios de Sombrio, Araranguá, Turvo e Jacinto Machado (EPAGRI, 2025). O milho é amplamente utilizado tanto para fins alimentares quanto para bioenergia, especialmente na produção de etanol de primeira geração e biogás.

Arroz (*Oryza sativa* L.)

Assim como o milho, o arroz pertence à família Poaceae. É a principal cultura da microrregião, com área cultivada de 58.848 hectares. A produção registrada para o período de 2024/2025 foi de 506.160 toneladas, com produtividade média de 8.601 kg/ha, concentrada principalmente nos municípios de Turvo e Meleiro (EPAGRI, 2025). O grão de arroz apresenta composição predominante de amido (71–77%), com teores secundários de lipídios (0,85–1,5%), açúcares solúveis (0,6–1,0%) e fibras (0,6–1,0%). O conteúdo de umidade do grão recém-colhido varia entre 12,6% e 14%, influenciando seu desempenho energético em processos termoquímicos ou fermentativos.

Trigo (*Triticum aestivum* L.)

Originário da região do crescente fértil, o trigo é uma gramínea da família Poaceae resultante de cruzamentos naturais entre espécies ancestrais. Na microrregião da AMESC, é a sexta cultura em área plantada, totalizando 550 hectares. A produção registrada para 2024/2025 foi de 1.690 toneladas, com produtividade média de 3.073 kg/ha, sendo Araranguá o principal município produtor (EPAGRI, 2025). O trigo possui alto teor de amido e proteínas, sendo aplicável à produção de bioetanol e valorização energética de resíduos pós-colheita.

Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

O feijão, pertencente à família Fabaceae, é uma leguminosa nativa das Américas Central e do Sul. Adapta-se bem a climas tropicais e subtropicais, com ciclo de cultivo variando entre 70 e 100 dias. Em 2024/2025, a produção totalizou 737 toneladas, com produtividade de 1.147 kg/ha, destacando-se os municípios de Araranguá e Meleiro como os principais produtores (EPAGRI, 2025). Além do valor nutricional, resíduos agrícolas derivados do feijão, como palhadas e cascas, podem ser empregados em processos de conversão termoquímica para bioenergia.

Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)

Planta perene da família Euphorbiaceae, a mandioca é originária da América do Sul e cultivada principalmente por suas raízes tuberosas ricas em amido. O ciclo de cultivo varia entre 6 e 18 meses, e os cultivares apresentam anatomia diferenciada entre as porções basais (mais lignificadas) e as superiores (menos rígidas). A produção entre 2024 e 2025 foi de 41.671 toneladas, com produtividade média de 27.874 kg/ha. Os municípios de Araranguá, São João do Sul e Sombrio concentram os maiores volumes produtivos (EPAGRI, 2025). Devido ao elevado teor de amido nas raízes, a mandioca é considerada uma das matérias-primas mais promissoras para produção de etanol de primeira geração e biogás.

A análise composicional dessas culturas permite identificar suas aptidões tecnológicas para diferentes rotas de conversão energética, considerando parâmetros como o teor de amido, a fração lignocelulósica e o conteúdo de umidade e cinzas, que afetam diretamente a eficiência dos processos e o rendimento energético. Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta uma comparação entre os principais constituintes moleculares dos grãos de arroz, milho, trigo, feijão e mandioca, expressos em percentual de massa, destacando lipídios, amido, glicose, proteínas, componentes lignocelulósicos, cinzas e umidade, variáveis-chave para a seleção e otimização das rotas bioenergéticas mais adequadas para cada cultura.

Tabela 2: Composição molecular comparativa dos grãos de arroz, milho, trigo, feijão e mandioca e banana (% m/m)

	Arroz	Milho	Trigo	Feijão	Mandioca	Banana
Amido	85	72	70	60	86	1,8
Açúcares	1	3	2	9	22,5	5,2
Lipídios	3	4	2	2,8	2,1	1,37
Celulose	1,5	3	2	7,5	3,5	0,3
Hemicelulose	1,5	8	8	37	–	–
Lignina	0,5	1,8	1,8	33	–	–
Cinzas	2	2,2	2	4,4	3,9	10
Umidade	15	15	14	16	65	77

Fonte: NIETO-ORTEGA et al. (2022); LIU et al. (2020); JAWORSKI et al. (2015); SUN et al. (2022); PUIȚEL et al. (2022); KAYISU; HOOD; VANSOEST (1981); PEDERSEN et al. (2014).

As biomassas lignocelulósicas oriundas da agricultura englobam tanto culturas cultivadas para fins energéticos quanto subprodutos e resíduos agrícolas gerados no pós-colheita. Essas biomassas são compostas majoritariamente por três polímeros estruturais: celulose, hemicelulose e lignina, os quais conferem rigidez às paredes celulares vegetais e dificultam a degradação microbiológica natural. Devido à sua composição, essas fontes são especialmente indicadas para rotas termoquímicas de conversão energética, como combustão direta, gaseificação e pirólise, além de constituírem matéria-prima para a produção de biocombustíveis de segunda geração, via processos fermentativos após pré-tratamentos adequados.

A seguir, a Tabela 3 apresenta a composição lignocelulósica estimada de diferentes resíduos agrícolas recém-colhidos da microrregião da AMESC, com destaque para celulose, hemicelulose, lignina e umidade, expressos em percentuais de massa.

Tabela 3: Composição lignocelulósica de resíduos agrícolas recém-colhidos da microrregião da AMESC

Sobras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Umidade (%)
Arroz	38-40	21	23	21
Milho	36,1	9,1	31	14,8
Trigo	38,2	29	16	9,2
Feijão	–	–	–	–
Mandioca	36	49,1	24	10
Banana	62,2	28	–	11,5

Fonte: TAN et al. (2019); OLUPOT; MIBULO; NAYEBARE (2023); KAYISU; HOOD; VANSOEST (1981); BERHANU et al. (2018).

.

A análise dos dados mostra que resíduos como os da banana e da mandioca apresentam elevados teores de celulose e hemicelulose, o que os torna altamente atrativos para rotas termoquímicas e bioquímicas (SUN et al., 2023). O arroz e o milho, por sua vez, combinam bom rendimento energético com teores significativos de lignina, característica vantajosa para processos de pirólise e produção de carvão vegetal. Já os teores de cinzas e umidade variam significativamente entre os resíduos, impactando diretamente o desempenho e a eficiência energética dos processos de conversão.

Entre a etapa de coleta da biomassa e sua conversão efetiva em energia, existe uma cadeia de processos técnicos que inclui o dimensionamento da planta, o controle de parâmetros operacionais, os pré-tratamentos da matéria-prima, o processo de conversão propriamente dito e, finalmente, a utilização ou distribuição da energia gerada. A definição das etapas e tecnologias envolvidas está diretamente relacionada às propriedades físico-químicas da biomassa, bem como à finalidade

energética do sistema.

As rotas de conversão energética da biomassa são geralmente classificadas conforme o agente transformador predominante: calor (rotas termoquímicas), produtos químicos sintéticos (rotas fisicoquímicas) ou micro-organismos/enzimas (rotas bioquímicas). Os produtos obtidos também variam amplamente, podendo incluir combustíveis líquidos (etanol, bio-óleo), gases (biogás, syngas), carvão vegetal, briquetes, calor ou eletricidade (OSMAN et al., 2021).

Entre as rotas termoquímicas, destacam-se os processos de combustão direta, gaseificação, pirólise e carbonização, nos quais a biomassa é submetida a temperaturas elevadas com diferentes níveis de oxigênio e controle térmico. A combustão direta é o método mais antigo, simples e amplamente utilizado para conversão de biomassa em energia térmica. Esse processo consiste na queima da biomassa na presença de oxigênio, resultando na liberação de calor que pode ser aproveitado para aquecimento direto ou geração de vapor, com posterior conversão em energia elétrica via turbinas.

Diversos parâmetros físico-químicos da biomassa influenciam a eficiência do processo de combustão. Um dos mais críticos é o teor de umidade, que deve ser mantido abaixo de 20% para evitar perdas energéticas significativas associadas à evaporação da água. Umidades elevadas reduzem o rendimento térmico, pois parte da energia liberada é consumida na vaporização. Outro parâmetro fundamental é o PCI, que representa a quantidade de energia efetivamente aproveitada por quilograma de biomassa queimada. Em geral, valores de PCI superiores a 15 MJ/kg são considerados satisfatórios para aplicações energéticas. Biomassas com altos teores de lignina e celulose tendem a apresentar maior PCI (GANI et al., 2024).

Além disso, a composição inorgânica da biomassa é determinante para a manutenção e durabilidade dos sistemas de combustão. Resíduos com teores elevados de cinzas (> 5%) podem causar acúmulo de resíduos sólidos nos componentes do sistema, aumentando o desgaste mecânico, obstruções e os custos de manutenção. A sílica, em particular, é um constituinte que, ao ser queimado, se funde em forma de escória, promovendo aderência a superfícies metálicas e danificando os equipamentos. Um exemplo clássico é a casca de arroz, que apesar de apresentar um bom PCI, possui alto teor de sílica, exigindo sistemas específicos e resistentes à abrasão para viabilizar sua combustão direta de forma eficiente e segura.

Para efeito comparativo, a Tabela 4 apresenta os valores médios de PCI e percentual de cinzas de diferentes resíduos agrícolas comuns na microrregião da AMESC, permitindo avaliar sua aptidão à combustão direta.

Tabela 4: Poder calorífico inferior (PCI) e teor de cinzas de resíduos agrícolas selecionados

Resíduo	PCI (MJ/kg)	Cinzas (% m/m)

Arroz	13-17	1-2
Banana	12-15	6-10
Feijão	14-16	3-4,4
Trigo	14-17	1-2
Mandioca (Raízes e Ramas)	15-17	1-3,9
Milho (Silagem)	15-18	1,2-2,2
Soja	15-17	6-10

Fonte: EROL; HAYKIRI-AÇMA; KÜÇÜKBAYRAK (2010); E. et al. (2023); RÍOS-BADRÁN et al. (2020); DE RAMOS E PAULA et al. (2011).

A análise dos dados indica que resíduos como o milho para silagem, o trigo e a mandioca apresentam elevado poder calorífico e baixo teor de cinzas, sendo mais adequados para combustão direta com menores restrições técnicas. Por outro lado, resíduos como os da banana e da soja, embora possuam PCI satisfatórios, apresentam altos teores de cinzas, o que exige tecnologias de combustão com maior resistência a incrustações e desgaste, ou rotas alternativas de aproveitamento energético (RABI et al., 2023).

O gás de síntese (*syngas*) é um combustível gasoso que pode ser obtido a partir da biomassa por meio de processos termoquímicos de decomposição controlada, sendo composto majoritariamente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2). Sua produção pode ocorrer diretamente por gaseificação ou por meio do tratamento do gás resultante da pirólise, com o objetivo de reduzir o teor de alcatrões e compostos inertes, elevando a pureza e o poder calorífico do gás.

O processo inicia-se com a preparação da matéria-prima, seguida pela pirólise térmica a temperaturas entre 750 °C e 900 °C, etapa na qual ocorre a fragmentação térmica dos compostos orgânicos, priorizando a liberação de CO e H_2. Na sequência, realiza-se a oxidação parcial, etapa em que se injeta um agente gaseificante (geralmente ar, oxigênio puro ou vapor d'água), promovendo reações exotérmicas que convertem compostos carbonáceos em CO, H_2, pequenas quantidades de CO_2 e H_2O. Em seguida, a biomassa carbonizada remanescente é submetida a uma reação endotérmica de redução, envolvendo vapor ou CO_2, que contribui para a produção adicional de *syngas* e permite o ajuste da razão molar H_2/CO, essencial para aplicações industriais como a síntese de combustíveis líquidos (Fischer-Tropsch) ou metanol (SIRINWARANON; ATONG; SRICHAORENCHAIKUL, 2020).

A eficiência da produção de *syngas* depende fortemente da composição elementar da biomassa. Materiais com elevado teor de carbono e baixas razões de umidade e cinzas favorecem o rendimento energético. Especificamente, biomassas com alta razão C/O e C/H tendem a produzir gases mais energéticos. Por outro lado, teores excessivos de cinzas e sílica promovem a formação de escórias nos equipamentos, aumentando os custos de operação e manutenção.

As principais culturas agrícolas da microrregião do Extremo Sul Catarinense possuem composição adequada para produção de *syngas*, com destaque para arroz, milho e mandioca. A Tabela 5 apresenta uma comparação entre a área cultivada, o poder calorífico inferior do *syngas* e o rendimento volumétrico médio por quilograma de biomassa seca para diferentes culturas agrícolas.

Tabela 5: Área cultivada, PCI do *syngas* e volume médio gerado por quilograma de biomassa

Resíduo	Área (ha)	PCI (MJ/m^3)	Volume (m^3/kg)
Arroz	58848	4-5	1,5-2,5
Banana (Prata e Caturra)	5239	4-6,7	1,5
Feijão (Duas Safras)	643	4-5	1-1,5
Trigo	550	4-6,7	1,5
Mandioca (Duas Safras)	2008	4-5	0,21-0,24
Milho (Silagem)	4859	4-4,5	1,2
Soja	1448	4-5	1-1,5

Fonte: RAMOS; ROUBOA (2020); HU et al. (2019a); HU et al. (2019b); ORE et al. (2022); SIRINWARANON; ATONG; SRICHAROENCHAIKUL (2020);EPAGRI(2025).

Os dados demonstram que culturas como milho e arroz possuem rendimentos elevados tanto em volume quanto em poder calorífico, sendo altamente promissoras para gaseificação em escala descentralizada. A mandioca, apesar do menor rendimento volumétrico, apresenta elevada densidade energética por hectare devido à sua produtividade. Esse panorama reforça o potencial estratégico da valorização energética de resíduos agrícolas na diversificação da matriz energética regional, com destaque para a viabilidade técnica da produção de *syngas* a partir de cultivos amplamente presentes na região.

A produção de bio-óleo por pirólise é uma rota termoquímica promissora para a conversão de biomassa agrícola em combustíveis líquidos. Trata-se de um processo em que materiais orgânicos sólidos são submetidos à decomposição térmica em atmosfera inerte, resultando em três frações principais: gás, carvão vegetal e a fração líquida condensável, o bio-óleo. Para maximizar o rendimento desta última, adota-se a técnica de pirólise rápida, que consiste no aquecimento acelerado da biomassa a temperaturas entre 400 °C e 600 °C, com tempos de residência muito curtos (segundos a minutos), na ausência de oxigênio (YOUNAS et al, 2017).

A eficiência e a qualidade do bio-óleo são influenciadas por múltiplos parâmetros operacionais e pelas características da biomassa utilizada. Biomassas lignocelulósicas, ricas em celulose, hemicelulose e lignina, são especialmente adequadas, assim como resíduos com moderado teor de lipídios, que elevam o valor energético do produto. Além disso, o tamanho das partículas exerce papel fundamental: partículas menores favorecem a transferência de calor e promovem reações mais homogêneas. O uso de catalisadores heterogêneos, como zeólitas, óxidos metálicos ou catalisadores

metálicos suportados (Cu/HZSM-5), pode melhorar substancialmente a qualidade do bio-óleo, reduzindo a presença de compostos oxigenados e aumentando a fração de hidrocarbonetos leves.

Na microrregião do Extremo Sul Catarinense, diferentes culturas agrícolas geram resíduos com potencial significativo para essa rota de conversão. A Tabela 6 apresenta uma comparação entre a área plantada, o PCI e o rendimento médio de bio-óleo por quilograma de biomassa seca das principais culturas avaliadas.

Tabela 6: Área cultivada, PCI e rendimento de bio-óleo por cultura agrícola

Resíduo	Área (ha)	PCI (MJ/L)	Volume (L/kg)
Arroz	58848	23-48	0,24-0,51
Banana (Prata e Caturra)	5239	25-27	0,26-0,50
Feijão (Duas Safras)	643	17-21	0,37
Trigo	550	19-25	0,19-0,40
Mandioca (Duas Safras)	2008	23-29	0,50-0,70
Milho (Silagem)	4859	22-37	0,23-0,55
Soja	1448	17-34	0,11-0,26

Fonte: KI et al. (2013); PATTIYA; SUTTIBAK (2012); YOUNAS et al. (2017); FERMANELLI et al. (2019); BISWAS et al. (2017); EPAGRI (2025).

Os dados indicam que culturas como mandioca, arroz e banana apresentam os melhores desempenhos, combinando alta produtividade agrícola com bons rendimentos gravimétricos e poder calorífico elevado. Esses resíduos, muitas vezes subutilizados, podem ser valorizados energeticamente para a produção descentralizada de combustíveis líquidos, promovendo a diversificação da matriz energética e agregando valor às cadeias produtivas locais.

A conversão bioquímica da biomassa é outra estratégia baseada no uso de micro-organismos ou enzimas capazes de degradar compostos orgânicos complexos e transformá-los em produtos energéticos. As principais rotas empregadas são a digestão anaeróbica, que resulta na produção de biogás, e a fermentação alcoólica, responsável pela geração de etanol. Ambas são processos amplamente estudados e aplicados na valorização de resíduos agrícolas, especialmente em contextos em que o conteúdo de umidade da biomassa é elevado e os teores de nutrientes são compatíveis com a atividade microbiana.

A digestão anaeróbica ocorre na ausência de oxigênio e envolve uma sequência de reações microbiológicas que transformam a matéria orgânica em biogás, uma mistura rica em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), e em digestato, um subproduto com potencial uso como biofertilizante. O processo exige que a matéria-prima passe por uma etapa inicial de hidrólise, na qual polímeros como celulose, hemicelulose, amido e proteínas são quebrados em unidades mais simples, facilitando sua assimilação pelas bactérias.

A eficiência do processo depende de diversos parâmetros, entre eles a relação carbono/nitrogênio (C/N), idealmente entre 20:1 e 30:1, a alta umidade da biomassa (acima de 80%) e o baixo teor de lignina, que dificulta a ação microbiana e a disponibilidade dos substratos. Compostos inibidores, como amônia em excesso, ácidos graxos voláteis e metais pesados, devem ser evitados para garantir a estabilidade do sistema. A Tabela 7 apresenta os dados referentes ao PCI do biogás e ao rendimento volumétrico médio por quilograma de biomassa seca para as principais culturas da microrregião do Extremo Sul Catarinense.

Tabela 7: Área cultivada, poder calorífico e rendimento de biogás por cultura agrícola

Resíduo	Área (ha)	PCI (MJ/m^3)	Volume (m^3/kg)
Arroz	58848	20-24	0,32-0,36
Banana (Prata e Caturra)	5239	20-24	0,24-0,53
Feijão (Duas Safras)	643	20-25	0,6
Trigo	550	20-24	0,18-0,31
Mandioca (Duas Safras)	2008	20-24	0,18-0,31
Milho (Silagem)	4859	20-24	0,18-0,39
Soja	1448	20-23	0,56-0,76

Fonte: ORE et al. (2022); SENGHOR; MÜLLER; YOUM (2020); USI et al. (2025); EPAGRI (2025); LEITNER; LINDORFER (2016); CONTRERAS et al. (2012)..

Outra rota bioquímica amplamente utilizada é a fermentação alcoólica, que consiste na conversão de açúcares em etanol e CO_2 por meio da ação de leveduras, especialmente do gênero Saccharomyces. O processo ocorre em condições anaeróbicas e é viabilizado apenas quando a biomassa contém elevados teores de açúcares fermentescíveis (glicose, frutose, sacarose) ou amido, que precisa ser previamente hidrolisado. Biomassas com alto conteúdo de lignina ou com presença significativa de compostos inibidores, como taninos e ácidos fenólicos, devem ser evitadas ou submetidas a tratamentos prévios (SENGHOR, A.; MÜLLER, C.; YOUM, 2020)

Para um bom desempenho fermentativo, recomenda-se que a biomassa possua umidade entre 60% e 80%, o que favorece tanto a extração dos açúcares quanto a atividade microbiana. A Tabela 8 apresenta o PCI do etanol e os respectivos rendimentos médios por quilograma de biomassa seca para as culturas analisadas.

Tabela 8: Área cultivada, poder calorífico do etanol e rendimento por cultura agrícola

Resíduo	Área (ha)	PCI (MJ/L)	Volume (L/kg)
Arroz	58848	21,2	0,03-0,19
Banana (Prata e Caturra)	5239		0,1-0,5
Feijão (Duas Safras)	643		0,33-0,35
Trigo	550		0,09-0,10

Mandioca (Duas Safras)	2008	0,13-0,18
Milho (Silagem)	4859	1,7-2
Soja	1448	0,16-0,2

Fonte: BOLADE et al. (2019); FARIA; CARVALHO; EPAGRI (2025); CONTE-JUNIOR (2024); JIANG et al. (2019); ROOZEBOOM et al. (2019); PIMENTEL; PATZEK (2005).

Os dados demonstram que o milho possui o maior potencial para produção de etanol, seguido por feijão e banana, que também apresentam teores de açúcares relevantes e boa fermentescibilidade.

A produção de biodiesel é uma rota química amplamente empregada na conversão de óleos vegetais ou gorduras animais em combustíveis renováveis, sendo o produto uma mistura de ésteres metílicos de ácidos graxos e glicerol como subproduto. O processo ocorre, em geral, por meio das reações de transesterificação, quando os triglicerídeos reagem com um álcool (geralmente metanol), na presença de um catalisador homogêneo. Quando a matéria-prima possui alto teor de ácidos graxos livres (AGL), superior a 2%, é necessária uma etapa prévia de esterificação ácida, que visa converter os AGL em ésteres, evitando a formação de sabões, compostos que dificultam a separação do biodiesel da fase glicerínica (BOLADE, D. et al, 2019).

A eficiência da reação depende diretamente da qualidade do óleo utilizado, sendo preferíveis matérias-primas com alto conteúdo lipídico, baixo teor de água, reduzida acidez e baixa carga de impurezas sólidas ou metálicas. A composição dos ácidos graxos presentes influencia ainda propriedades como viscosidade, estabilidade oxidativa, ponto de entupimento e índice de cetano do biodiesel resultante. Embora o processo seja consolidado para oleaginosas como a soja, outras fontes vegetais residuais, como subprodutos da banana ou lipídios extraídos de milho, também podem ser exploradas, desde que tecnicamente viáveis e economicamente acessíveis. Os dados abrangem as rotas de biogás, etanol, *syngas*, bio-óleo e carvão vegetal, permitindo uma comparação integrada do aproveitamento energético das sobras agrícolas na microrregião do Extremo Sul Catarinense.

Tabela 9: Potencial anual de geração energética por cultura agrícola e rota tecnológica (em GJ)

	Biogás	Etanol	*Syngas*	Bio-óleo	Carvão
Arroz	4067,6	299,4	447,2	6002,5	2961,2
Banana	1355,7	225,9	478,4	1332,2	105,5
Feijão	19290	8996,9	6108,5	27970,5	4526,7
Trigo	20460	10494	7370	31625	10285
Mandioca	62248	30650,1	8433,6	84336	46424,9
Milho	454802,4	185419,4	43731	704555	262386
Soja	75933,1	51571,9	4344	11946	–

Fonte: Própria (2025)

Os resultados demonstram que a cultura do milho apresenta o maior potencial energético total entre

as alternativas avaliadas, destacando-se em todas as rotas de conversão, especialmente na pirólise líquida e produção de biogás. Em seguida, mandioca, trigo e feijão também revelam alto potencial de valorização energética, sendo alternativas robustas para diversificação da matriz bioenergética local. A soja, embora amplamente reconhecida pelo uso em biodiesel, apresenta desempenho inferior em outras rotas, especialmente carvão vegetal, devido à menor adequação da composição lignocelulósica. A banana, por outro lado, destaca-se como um resíduo abundante com rendimento expressivo na produção de etanol e biogás, mesmo com menor volume de área cultivada.

Este panorama reforça a importância do aproveitamento integrado e estratégico de diferentes resíduos agrícolas, com base em suas propriedades físico-químicas e rotas tecnológicas mais adequadas, para fomentar a geração descentralizada de energia renovável e fortalecer a bioeconomia regional.

CONCLUSÕES

A análise técnica e comparativa das principais rotas de conversão energética aplicáveis à biomassa agrícola permitiu estimar, de forma aproximada, o potencial energético total por cultura a partir de resíduos disponíveis na microrregião do Extremo Sul Catarinense. Os dados demonstram que a escolha da rota tecnológica mais adequada depende diretamente da composição físico-química da biomassa, da produtividade agrícola local e da viabilidade técnico-econômica do processo.

Entre as culturas avaliadas, o milho para silagem, a mandioca e o arroz destacaram-se como as mais promissoras, apresentando elevados rendimentos energéticos em múltiplas rotas. O milho demonstrou alto desempenho na digestão anaeróbica, alcançando valores superiores a 795.000 MJ/ha na produção de biogás, o que evidencia sua eficiência energética quando cruzados dados de produtividade e volume de gás gerado por massa de biomassa seca.

A mandioca apresentou excelente desempenho na pirólise líquida, com rendimentos de até 0,70 L/kg de bio-óleo e poder calorífico variando entre 23 e 29 MJ/L, além de ser altamente eficaz na geração de carvão vegetal, o que amplia sua aplicabilidade em sistemas energéticos híbridos. Já o arroz, tradicionalmente voltado à alimentação, mostrou-se uma cultura versátil, apresentando resultados relevantes em praticamente todas as rotas analisadas, incluindo *syngas*, etanol, biogás e bio-óleo.

Outras culturas, como banana e feijão, embora menos expressivas em termos de área cultivada, revelaram rendimento energético específico elevado, principalmente nas rotas bioquímicas e termoquímicas. A banana, por exemplo, apresentou potencial de até 0,50 L de etanol por quilograma de biomassa seca, aliando viabilidade técnica ao aproveitamento de resíduos agrícolas de difícil descarte.

Apesar dos resultados promissores, o estudo apresenta limitações quanto à escala de aplicação das tecnologias, aos custos envolvidos e à necessidade de incentivos públicos e mão de obra qualificada.

Tais fatores podem comprometer a viabilidade imediata da valorização energética na região. Recomenda-se, portanto, estudos técnico-econômicos e de políticas de incentivo.

REFERÊNCIAS

AGYENIM-BOATENG, K. et al. The nutritional composition of the vegetable soybean (maodou) and its potential in combatting malnutrition. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, 2023.

BOLADE, D. et al. Exploration of the bioethanol yield of single and multi-substrate biomass from cassava processing wastes. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, 2019.

CABARABAN, M.; DIVINAGRACIA, G. Production of biocrude and charcoal from fast oxidative pyrolysis of cassava pulp residue using a fluidized bed reactor. **Journal of Engineering and Applied Sciences Technology**, 2020.

CHENG, X. et al. Improvement of charcoal yield and quality by two-step pyrolysis on rice husks. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, p. 123–130, 2016.

CONTE-JUNIOR, Carlos A. Fermentation of biomass and residues from Brazilian agriculture for 2G bioethanol production. **ACS Omega**, [S.l.], v. 9, p. 40298–40314, 2024.

DE RAMOS E PAULA, L.; TRUGILHO, P.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. ***Cerne***, v. 17, p. 237–246, 2011.

EROL, M.; HAYKIRI-AÇMA, H.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. ***Renewable Energy***, v. 35, p. 170-173, 2010.

FLORES, R. et al. Physico-chemical characterization of agricultural residues as precursors for activated carbon preparation. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, 2017.

FARIA, Diego; CARVALHO, André; CONTE-JUNIOR, Carlos A. Fermentation of biomass and residues from Brazilian agriculture for 2G bioethanol production. ***ACS Omega***, [S.l.], v. 9, p. 40298–40314, 2024.

HEFFRON, R. Applying energy justice into the energy transition. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 2022.

HODAIFA, G.; NIETO, L.; KOWALSKA, M. Corn stover conversion into bioethanol and xylitol through an integral bioprocess: Kinetic study and modelling. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, 2022.

HU, J.; LI, D.; LEE, D.; ZHANG, Q.; WANG, W.; ZHAO, S.; ZHANG, Z.; HE, C. Integrated gasification and catalytic reforming syngas production from corn straw with mitigated greenhouse gas emission potential. **Bioresource Technology**, v. 280, p. 371-377, 2019.

INFOAGRO. ***Estimativa de safras***. InfoAgro. Disponível em: https://www.infoagro.sc.gov.br/safra/safras/estimativa-de-safras-pc/.

JAWORSKI, N. W. et al. Carbohydrate composition and in vitro digestibility of dry matter and

nonstarch polysaccharides in corn, sorghum, and wheat and coproducts from these grains. ***Journal of Animal Science***, v. 93, n. 3, p. 1103–1113, 2015.

KAPEN, P. et al. Production and characterization of environmentally friendly charcoal briquettes obtained from agriculture waste: Case of Cameroon. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, p. 5253–5260, 2021.

KHAESO, K. et al. Sustainable conversion of agricultural waste into solid fuel (charcoal) via gasification and pyrolysis treatment. **Energy Conversion and Management: X**, 2024.

KAYISU, K.; HOOD, L. F.; VANSOEST, P. J. Characterization of starch and fiber of banana fruit. ***Journal of Food Science*****,** v. 46, p. 1885–1890, 1981

LONGJAN, G.; DEHOUCHE, Z. Nutrient characterisation and bioenergy potential of common Nigerian food wastes. **Waste Management & Research**, v. 36, p. 426–435, 2018.

LUCENA, A.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R.; BORBA, B.; COSTA, I.; CUNHA, S. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 37, p. 879-889, 2009.

MELIKOĞLU, M.; TURKMEN, B. Food waste to energy: Forecasting Turkey's bioethanol generation potential from wasted crops and cereals till 2030. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 2019.

MIGLANI, H.; SHARMA, S. Cell wall composition and nutrients in soybean genotypes of varying seed coat colour. ***Legume Research***, v. 40, p. 444-452, 2016.

MORETTI, A. et al. Workflow for the quantification of soluble and insoluble carbohydrates in soybean seed. ***Molecules***, v. 25, 2020.

OBSERVATÓRIO AGRO CATARINENSE. ***Produção agropecuária***. Observatório Agro Catarinense. Disponível em: https://www.observatorioagro.sc.gov.br/areas-tematicas/producao-agropecuaria/paineis/.

ORE, O.; AKEREMALE, O.; ADEOLA, A.; ICHIPI, E.; OLUBODUN, K. Production and kinetic studies of biogas from anaerobic digestion of banana and cassava wastes. ***Chemistry Africa***, v. 6, p. 477–484, 2022.

OKEKE, B.; OBI, S. Lignocellulose and sugar compositions of some agro-waste materials. **Bioresource Technology**, v. 47, p. 283–284, 1994.

PATTIYA, A. Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1959–1967, 2011.

PEDERSEN, M. B. et al. Compositional profile and variation of distillers dried grains with solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides. ***Animal Feed Science and Technology***, v. 197, p. 130–141, 2014.

PIERRI, L. de; PAULETTI, V.; SILVA, D. A.; SCHERAIBER, C. F.; SOUZA, J. L. M.; MUNARO, F. C. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais

do Paraná. Viçosa, MG: **Revista Ceres**, 2016, v. 63, n. 2, p. 129–137.

RABI, P. et al. Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass and their effective delignification for sustainable bioenergy. **Research Journal of Chemistry and Environment**, 2023.

RAMOS, A.; ROUBOA, A. Syngas production strategies from biomass gasification: Numerical studies for operational conditions and quality indexes. ***Renewable Energy***, v. 155, p. 1211-1221, 2020.

RÍOS-BADRÁN, I.; LUZARDO-OCAMPO, I.; GARCÍA-TREJO, J.; SANTOS-CRUZ, J.; GUTIÉRREZ-ANTONIO, C. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. **Renewable Energy**, 2020.

ROOZEBOOM, Kenneth L.; PAULSEN, Mark R.; HOSKINSON, Rodney L.; HURLEY, Terrance M. Evaluation of feedstock quality and ethanol yield potential of crop residues. **Industrial Crops and Products**, [S.l.], v. 130, p. 54–63, 2019.

SAMPAOLESI, S. et al. Potentials of biomass waste valorization: Case of South America. **Sustainability**, 2023.

SENGHOR, A.; MÜLLER, C.; YOUM, I. Cereal Crops for Biogas Production: **A Review of Possible Impact of Elevated Temperature**. v. 5, p. 27, 2020.

SIMS, R.; MABEE, W.; SADDLER, J.; TAYLOR, M. An overview of second generation biofuel technologies. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, p. 1570-1580, 2010.

SIRINWARANON, P.; ATONG, D.; SRICHAORENCHAIKUL, V. The effect of thermal pre-treatment on cassava rhizome properties for utilizing as green fuel in gasification. **E3S Web of Conferences**, 2020.

SLOUGH, T.; URPELAINEN, J.; YANG, J. Light for all? Evaluating Brazil's rural electrification progress, 2000–2010. **Energy Policy**, v. 86, p. 315-327, 2015.

SOKAN-ADEAGA, A. et al. Utilization of local corn (*Zea mays*) wastes for bioethanol production by separate hydrolysis and fermentation. **Journal of Hazardous Materials Advances**, 2024.

SUN, J. et al. Cellulose and lignin contents are negatively correlated with starch accumulation, and their correlation characteristics vary across cassava varieties. **Journal of Plant Growth Regulation,** v. 42, p. 658–669, 2022.

TUFAIL, T. et al. Biochemical characterization of wheat straw cell wall with special reference to bioactive profile. **International Journal of Food Properties**, v. 21, p. 1303–1310, 2018.

USI, Daniel F.; TAKASHINA, Masaru; KIMURA, Hiroshi. Biogas yield estimation from tropical agricultural waste under controlled digestion conditions. **Renewable Energy Research Journal,** [S.l.], v. 12, n. 2, p. 101–115, 2025.

YOUNAS, R.; HAO, S.; ZHANG, L.; ZHANG, S. Hydrothermal liquefaction of rice straw with NiO nanocatalyst for bio-oil production. **Renewable Energy**, v. 113, p. 532-545, 2017.