

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**PROTÓTIPO DE UM GASEIFICADOR “DOWNDRAFT” PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM LOCALIDADES DE COMUNIDADES VULNERÁVEIS**

Étore Medola Del Missier

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares.

São Carlos - SP
2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.

Profa. Dra.

Prof. Dr.

Prof. Dr.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus e minha família, a qual me manteve, apoiou e deu suporte em todos os momentos e escolhas de minha vida, sem exceção. Sem vocês nada seria possível e não faria sentido; A todos os profissionais da educação que, apesar do trabalho excepcional que exercem diariamente, não são devidamente valorizados neste país. Ao longo de minha vida tive a sorte de encontrar professores extremamente qualificados na formação de alunos e, acima disso, pessoas; aos grupos extracurriculares: AEQ – UFSCar e PET UFSCar, que juntos me fizeram crescer no âmbito acadêmico, profissional e pessoal e me trouxeram as melhores amizades que tive durante a graduação; por fim, aos outros Engenheiros Químicos que precederam este trabalho e contribuíram positivamente na sociedade, fazendo com que eu admirasse e escolhesse este campo de atuação.

EPÍGRAFE

*“Acima de tudo procurem sentir no mais profundo de vocês
qualquer injustiça cometida contra qualquer pessoa
em qualquer parte do mundo.
É a mais bela qualidade de um revolucionário.”*

(Ernesto Guevara de la Serna)

RESUMO

Este estudo explorou a aplicação da tecnologia e da engenharia social voltadas ao desenvolvimento teórico e a idealização de um protótipo de gaseificador de biomassa para a geração de energia elétrica em comunidades vulneráveis no Brasil. Embora crescente, o caráter social atribuído à engenharia é incipiente do ponto de vista da ciência. Nesse contexto, para a aplicação conceitual e exercício da própria profissão como um todo, fez-se necessário tomar precauções e medidas para propor inovações não somente na indústria e processos, mas também para a população em geral. O presente trabalho buscou uma proposição tecnológica para a exclusão energética enfrentada por comunidades brasileiras que se encontram em situação de desvantagem frente às violações de direitos e/ou impactos adversos. Não obstante, a sustentabilidade ambiental é indispensável frente qualquer inovação, seja ela socialmente inclusiva ou não. Para tanto, este estudo propôs o uso de biomassa variada e abundante na forma de subproduto das principais indústrias próximas às comunidades. A metodologia incluiu uma pesquisa científica aplicada desde a caracterização teórica da biomassa até o resultado final, o dimensionamento do protótipo. O gaseificador de tipo *downdraft* foi dimensionado com capacidade de geração diária de energia suficiente para atender a demanda energética da comunidade Brejo Dois Irmãos (Bahia). Os resultados indicaram a viabilidade técnica e econômica do gaseificador, destacando sua contribuição para a sustentabilidade ambiental e a inclusão social. Além da mitigação da principal problemática, a discussão ressaltou os benefícios sociais e ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito estufa e a promoção do manejo sustentável de resíduos. Contudo, desafios como a capacitação técnica das comunidades e o suporte institucional foram identificados como barreiras a serem superadas. Por fim, concluiu-se que o gaseificador de biomassa é uma tecnologia promissora para enfrentar e mitigar a exclusão energética, principalmente se aliado às companhias privadas locais via incentivos fiscais, promovendo autonomia energética, desenvolvimento local e aproveitamento da biomassa residual de processos industriais. Embora o estudo tenha sido teórico, ofereceu uma base sólida para futuras pesquisas e implementações práticas, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Tecnologia e Engenharia Social. Gaseificador de biomassa. Geração de energia. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study explored the application of technology and social engineering aimed at the theoretical development and conceptualization of a biomass gasifier prototype for electricity generation in vulnerable communities in Brazil. Although the social role of engineering is growing, it remains incipient from a scientific perspective. In this context, to conceptually apply and practice the profession as a whole, it was necessary to take precautions and adopt measures to propose innovations not only in industry and processes but also for the general population. This work aimed to offer a technological proposition to address the energy exclusion faced by Brazilian communities that are disadvantaged due to rights violations and/or adverse impacts. Nevertheless, environmental sustainability is indispensable in any innovation, whether socially inclusive or not. To this end, the study proposed the use of varied and abundant biomass in the form of by-products from major industries near these communities. The methodology included applied scientific research, from the theoretical characterization of the biomass to the final result—the sizing of the prototype. A downdraft-type gasifier was designed with a daily energy generation capacity sufficient to meet the energy demand of the community of Brejo Dois Irmãos (Bahia). The results indicated the technical and economic feasibility of the gasifier, highlighting its contribution to environmental sustainability and social inclusion. In addition to addressing the main issue, the discussion emphasized social and environmental benefits, such as the reduction of greenhouse gas emissions and the promotion of sustainable waste management. However, challenges such as the technical training of communities and institutional support were identified as barriers to be overcome. In conclusion, the biomass gasifier is a promising technology to confront and mitigate energy exclusion, especially when allied with local private companies through tax incentives, promoting energy autonomy, local development, and the use of residual biomass from industrial processes. Although the study was theoretical, it provided a solid foundation for future research and practical implementations, aligning with the sustainable development goals

Keywords: Technology and Social Engineering. Biomass Gasifier. Energy Generation. Sustainability.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....
2.	OBJETIVOS.....
2.1	Objetivo geral.....
2.2	Objetivos específicos.....
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....
3.1	O contexto socioeconômico e energético de comunidades vulneráveis.....
3.2	Tecnologias sociais e sustentabilidade energética.....
3.3	Potencial energético da biomassa brasileira.....
3.4	Gaseificação de biomassa: princípios e aplicações.....
3.4.1	Gaseificador Leito Fixo Contracorrente (“ <i>updraft</i> ”).....
3.4.2	Gaseificador Leito Fixo Concorrente (“ <i>downdraft</i> ”).....
3.4.3	Gaseificador Leito Fixo Fluxo Cruzado (“ <i>cross flow</i> ”).....
3.4.4	Gaseificador Leito Fluidizado.....
3.5	Qualidade do gás de biomassa.....
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....
4.1	Estudo de Caso.....
4.1.1	Protótipo de gaseificador.....
5.	RESULTADOS.....
5.2	Dimensionamento do Gaseificador.....
5.1.1	Caracterização da biomassa.....
5.1.2	Sistema de gaseificação.....
5.1.3	Dimensionamento gaseificador.....
5.1.4	Balço de Massa.....
5.1.4.1	Fluxo de Ar.....
5.1.4.2	Produção de Syngas.....
5.1.4.3	Subprodutos (alcatrão e cinzas).....
5.1.5	Balço de Energia.....
5.1.5.1	Entalpia da Biomassa.....
5.1.5.2	Entalpia do Syngas.....
5.1.5.3	Entalpia do Ar e Cinzas.....
5.1.5.4	Cálculo Perda de Energia.....
5.1.6	Eficiência do gaseificador.....

5.1.6.1	Cálculo PCI da Biomassa.....
5.1.6.2	Cálculo PCI do <i>syngas</i>
5.1.7	Energia útil gerada pelo sistema Gaseificador - MCI.....
5.1.8	Rede de distribuição.....
5.1.9	Medidas de segurança do processo.....
5.1.10	Custos de instalação e financiamento do equipamento e rede de distribuição.....
5.2	Gaseificação no contexto socioeconômico energético.....
5.3	Contribuições da Engenharia Química para a sustentabilidade energética
6.	CONCLUSÃO.....
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos tipos gaseificadores	31
Tabela 2. Qualidade do gás de síntese requerida pelos equipamentos.	33
Tabela 3: Características das biomassas estudadas	39
Tabela 4: Dimensões Gaseificador.	44
Tabela 5: Densidade do gás produzido a 25 °C.	46
Tabela 6. PCI dos gases a 25 °C.	51

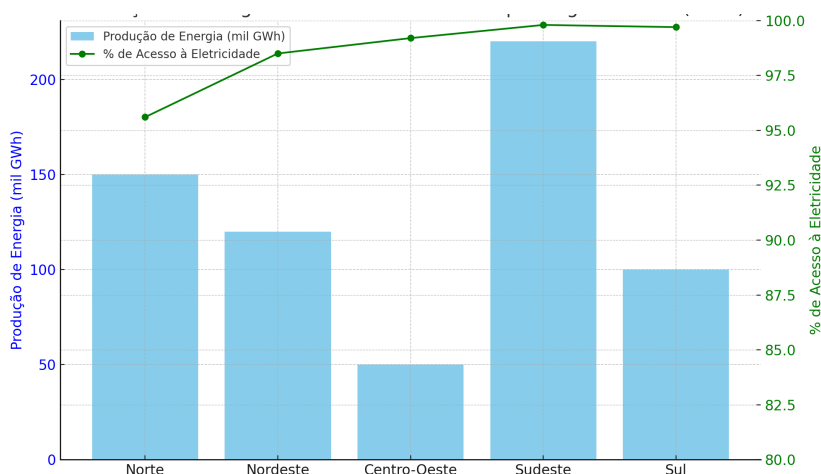
LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de energia e acesso à eletricidade por região (2023)	11
Figura 2: Mapa do sistema de transmissão brasileiro no Horizonte 2024 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).	12
Figura 3. Processos e conversões da gaseificação.	25
Figura 4. Reação de oxidação e redução do CO ₂ e vapor de água.	26
Figura 5. Esquema de gaseificador contracorrente.	27
Figura 6. Esquema de gaseificador concorrente.	28
Figura 7. Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.	29
Figura 8. Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante.	30
Figura 9. Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante.	31
Figura 10. Sistema de gaseificação e limpeza do <i>syngas</i> .	34
Figura 11. Comunidade Brejo Dois Irmãos, Pilão Arcado, Bahia.	36
Figura 12. Buriti: palmeira e fruto	36
Figura 13. Sistema de geração de energia via gaseificação de biomassa.	41
Figura 14. <i>Datasheet</i> de gaseificadores tipo garganta.	43

1. INTRODUÇÃO

O acesso à energia elétrica é um elemento essencial para o desenvolvimento econômico e social, porém, ainda se configura como um desafio para muitas comunidades vulneráveis, especialmente aquelas localizadas em áreas remotas. Dados recentes do IBGE (2023) revelam uma disparidade significativa entre a produção e a distribuição de energia elétrica no Brasil. A Região Norte, por exemplo, destaca-se como uma das maiores produtoras de energia do país, abrigando grandes usinas hidrelétricas como Belo Monte, Tucuruí, Santo Antônio e Jirau. No entanto, esta região apresenta o menor índice de acesso à eletricidade entre as regiões brasileiras. A Figura 1 apresenta o comparativo de geração e acesso à energia elétrica de acordo com as regiões do Brasil.

Figura 1. Produção de energia e acesso à eletricidade por região (2023)



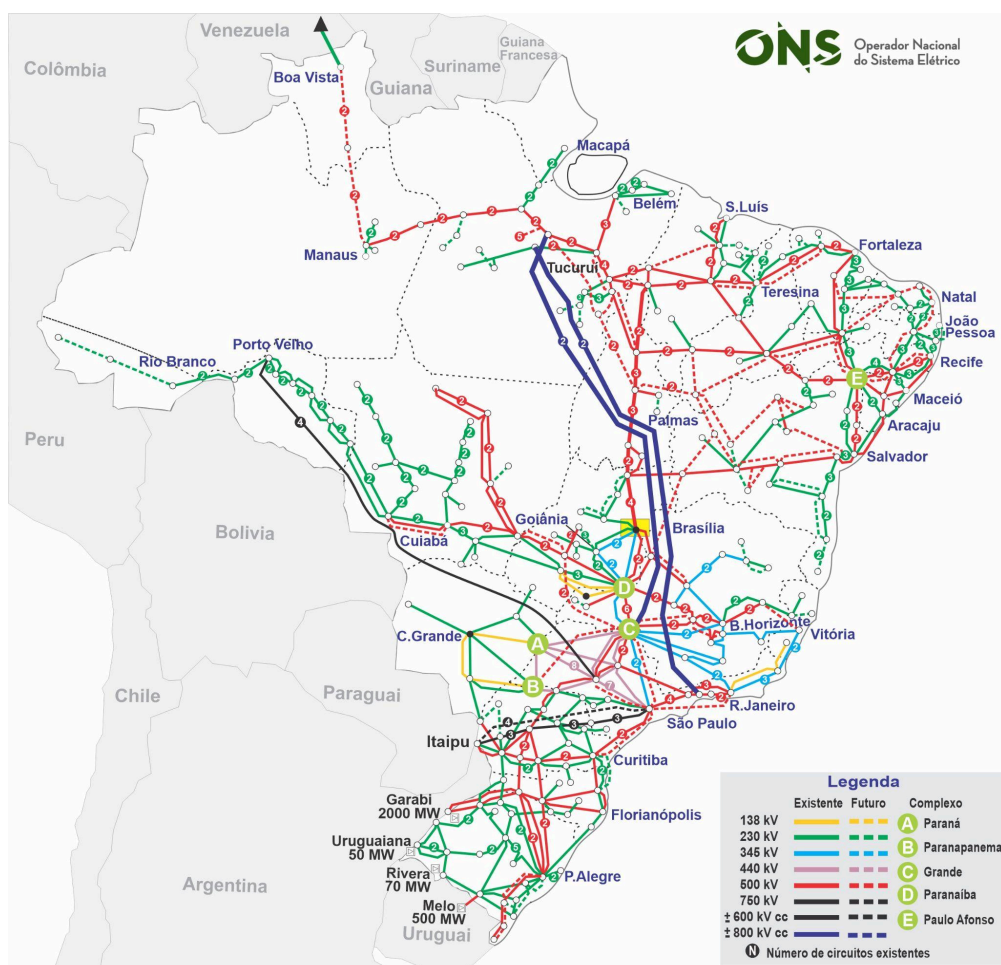
Fonte. Autoria própria - Dados: IBGE e PNAD Contínua (2023).

Apesar de, estatisticamente serem valores excelentes e de alta assertividade, os valores de acesso à eletricidade inferiores a 100% representam que, em algum local do Brasil, existem grupos populacionais sem nenhum acesso à eletricidade, ou seja, significa que direitos básicos desses indivíduos estão sendo violados, afetando diretamente a qualidade de vida dos mesmos.

Ademais, de acordo com Moura (2025), o contraste de geração e acesso à rede de energia elétrica pelas regiões do Brasil apresentada no

gráfico, estão intimamente ligadas à infraestrutura de transmissão limitada, à dependência de fontes hidrelétricas vulneráveis a condições climáticas e à falta de integração plena com o SIN (Sistema Integrado Nacional). A Figura 2 ressalta essa problemática, evidenciando a rede de transmissão de energia do Brasil de 2024.

Figura 2. Mapa do sistema de transmissão brasileiro no Horizonte 2024 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).



Fonte: ONS (2024).

Ambas as figuras descrevem que as limitações na infraestrutura de transmissão, aliadas aos desafios geográficos, logísticos e característicos da Região Norte, dificultam a distribuição eficiente da energia gerada localmente. A baixa densidade da malha elétrica, somada à vastidão territorial, à floresta densa e ao difícil acesso a muitas comunidades, torna a expansão da rede

energética um processo oneroso e complexo, perpetuando desigualdades no acesso à eletricidade.

Nesse contexto, a engenharia social emerge como fundamental para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis, as quais não são aplicadas para geração de valor agregado a um produto, mas sim para manutenção de um ou mais grupos que se encontram em déficit em relação ao restante da sociedade e, portanto, vulneráveis. O estudo, desenvolvido em parceria entre o Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, o Instituto Federal da Bahia e a Universidade Metropolitana da Bahia, ilustra essa abordagem. A iniciativa teve como objetivo fomentar a sustentabilidade econômica de regiões quilombolas no interior da Bahia utilizando resíduos fibrosos da cana-brava — matéria-prima já presente na cultura produtiva dessas comunidades (De Oliveira, 2015).

Dentre essas inovações, outro exemplo é a gaseificação de biomassa, uma tecnologia com grande potencial para mitigar a problemática (Barros *et al.*, 2022). A gaseificação de biomassa é um processo termoquímico que converte materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, em um gás sintético (*syngas*) rico em hidrogênio, monóxido de carbono e metano, com elevado poder calorífico. Essa tecnologia permite a utilização de fontes renováveis de biomassa, contribuindo para a descarbonização do setor energético, ao mesmo tempo em que proporciona uma alternativa sustentável para a geração de energia em regiões de difícil acesso (Felix *et al.*, 2021).

Segundo Oliveira *et al.* (2020), a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, como a biomassa, é um dos pilares para alcançar uma sociedade descarbonizada e ambientalmente equilibrada.

A viabilidade técnica e econômica da gaseificação de biomassa em comunidades vulneráveis tem sido amplamente estudada. De acordo com Júnior *et al.* (2020), materiais de biomassa abundantes e de baixo custo, como o sabugo de milho, possuem características físico-químicas adequadas para a produção de *syngas*, sendo uma opção viável para implementação em pequena escala. Além disso, Santos *et al.* (2021) destacam a utilização de resíduos da produção agrícola, como folhas de coqueiro, na geração de combustíveis gasosos, contribuindo para a economia circular e a redução do impacto ambiental.

Em algumas regiões do Brasil, o aproveitamento da biomassa local é particularmente relevante devido à sua abundância e à dificuldade de transporte de insumos e equipamentos para essas áreas. A Amazônia, por exemplo, concentra uma vasta diversidade de recursos naturais que, se adequadamente manejados, podem atender à demanda energética dessas populações de forma sustentável. Ademais, companhias privadas como o Grupo BBF (Brasil Bio Fuels), Grupo CIEX e demais agroindústrias da região têm como principais subprodutos resíduos de árvores frutíferas, como semente de tucumã, pecíolo de buriti, casca de açaí, castanha-do-brasil, capoeira triturada, entre outros. Souza *et al.* (2023) reforça a importância de integrar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU nas estratégias de desenvolvimento da região, com destaque para o ODS 7, que visa assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos.

O desenvolvimento de um protótipo de gaseificador para geração de energia elétrica no Brasil é uma iniciativa que se justifica tanto pela necessidade de atender à demanda energética de populações deslocadas quanto pelo potencial de valorização da biomassa local. Essa abordagem não apenas promove a inclusão social e o desenvolvimento econômico, mas também contribui para a preservação ambiental, ao incentivar o uso sustentável dos recursos naturais da região. Além disso, o projeto dialoga diretamente com os desafios globais de descarbonização e a transição energética, alinhando-se aos ODS da ONU e às diretrizes de sustentabilidade propostas por Oliveira *et al.* (2020).

Apesar do potencial da gaseificação de biomassa como solução energética sustentável, diversos desafios permanecem. A ausência de políticas públicas específicas para o desenvolvimento de tecnologias sociais, aliada à dificuldade de logística e infraestrutura em áreas remotas, dificulta a implementação e a manutenção de projetos desse tipo. Por fim, a falta de conhecimento técnico e a necessidade de capacitação das comunidades locais representam barreiras significativas para o sucesso de iniciativas dessa natureza. Nesse sentido, este estudo propõe-se a responder a seguinte pergunta central: como a aplicação da engenharia química e tecnologias

sociais pode contribuir para a geração de energia sustentável em comunidades vulneráveis no Brasil?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Elaborar um estudo contextualizado e viável para a proposição de um modelo de gaseificador de biomassa como tecnologia social voltada à geração de energia elétrica sustentável, com potencial para atender às necessidades energéticas de grupos populacionais que têm acesso dificultado à eletricidade, promovendo inclusão social e sustentabilidade.

2.2 Objetivos específicos.

- Explicitar e abranger o conceito de gaseificação de biomassa como forma alternativa de geração de energia elétrica limpa e renovável, não dependente de combustíveis fósseis e com alcance em pequena escala.
- Elaborar uma proposta de gaseificador de biomassa adaptado às condições de uma comunidade vulnerável específica, incluindo princípios de funcionamento, possibilidades de implementação e benefícios sociais e ambientais esperados.
- Aplicar os conceitos teóricos característicos da área da engenharia química direcionados à tecnologia e desenvolvimento social, corroborando a importância desses conceitos na construção de uma sociedade mais sustentável e inclusiva.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O contexto socioeconômico e energético de comunidades vulneráveis.

Comunidades, subgrupos habitacionais e demais localidades às margens da sociedade, são marcadas por um contexto socioeconômico e

energético que reflete profundas desigualdades e desafios estruturais. Essas populações, geralmente localizadas em áreas remotas e de difícil acesso, muitas vezes vivem em estreita relação com o ambiente natural, retirando seu sustento de atividades como pesca, agricultura de subsistência e extrativismo. No entanto, a precariedade de infraestrutura básica, incluindo o acesso à energia elétrica, compromete significativamente a qualidade de vida dessas comunidades e sua capacidade de desenvolvimento social e econômico (Cavalcanti e Melo, 2021).

O conceito de vulnerabilidade socioambiental é central para compreender as condições de vida de grande parte das comunidades do Brasil. Ele se refere à exposição simultânea a riscos ambientais e à ausência de capacidades institucionais para mitigar ou responder a esses riscos. Segundo Cavalcanti e Melo (2021), essas comunidades enfrentam desafios como inundações, desmatamento e poluição dos rios, que são agravados pela ausência de políticas públicas efetivas e pelo garimpo ilegal.

A ausência de acesso à energia elétrica é um dos principais fatores que limitam o desenvolvimento dessas comunidades, o estado do Amazonas é um grande exemplo deste fator. De acordo com dados de 2020 da Fundação Amazônia Sustentável (FAS) das 582 comunidades monitoradas, mais de 300 não contam com acesso à energia de forma integral. Essa exclusão energética impede o funcionamento de serviços essenciais, como escolas, postos de saúde e sistemas de abastecimento de água. Além disso, dificulta a geração de renda e o desenvolvimento econômico, uma vez que atividades como o processamento de alimentos e a conservação de produtos perecíveis tornam-se inviáveis (Souza, 2020). Essa situação perpetua ciclos de pobreza e desigualdade, tornando essas comunidades ainda mais dependentes de políticas assistencialistas, que frequentemente são insuficientes e descontinuadas.

A construção de grandes empreendimentos, como usinas hidrelétricas, tem gerado impactos significativos nas comunidades mais deslocadas. De acordo com Carvalho *et al.* (2020), a instalação de hidrelétricas frequentemente resulta no deslocamento de populações inteiras, que perdem seu acesso aos recursos naturais e são obrigadas a se adaptar a novos contextos sociais e econômicos. Além disso, os conflitos gerados pela disputa por terras e recursos

hídricos expõem a fragilidade das políticas públicas de compensação e mitigação, que raramente atendem às necessidades reais dessas populações.

A ausência de capacidades estatais adequadas para atender às demandas sociais de grupos populacionais marginalizados é um fator determinante para a perpetuação de suas condições de vulnerabilidade. Santos *et al.* (2024) aponta que o Estado brasileiro tem historicamente falhado em implementar políticas públicas que contemplem as especificidades dessas populações. Programas de eletrificação rural, como o "Luz para Todos", apesar de bem-intencionados, não englobam toda extensão do território nacional devido à falta de infraestrutura e ao alto custo de implantação de redes elétricas em áreas remotas.

O acesso à energia elétrica é um elemento transformador para comunidades vulneráveis. Além de possibilitar a melhoria de serviços essenciais, ele promove a inclusão social e o desenvolvimento econômico. Segundo Souza (2020), a eletrificação dessas comunidades permite a implantação de atividades econômicas mais sofisticadas, como o beneficiamento de produtos agrícolas, e melhora a qualidade da educação, ao viabilizar o uso de tecnologias como computadores e internet nas escolas. A inclusão energética, portanto, não é apenas uma questão técnica, mas também um imperativo social e moral.

Diante dos desafios enfrentados, a busca por soluções sustentáveis e adaptadas à realidade local é essencial. Modelos descentralizados de geração de energia, como sistemas solares, eólicos ou a gaseificação de biomassa, apresentam grande potencial para atender às necessidades dessas populações. Segundo Carvalho *et al.* (2020), a adoção de tecnologias sociais que valorizem os recursos locais e sejam de fácil manutenção pode representar um avanço significativo para a inclusão energética dessas comunidades, promovendo tanto o desenvolvimento econômico quanto a sustentabilidade ambiental.

O contexto socioeconômico e energético no Brasil reflete a complexa interação entre desigualdade social, vulnerabilidade socioambiental, exclusão energética e falta de políticas públicas eficazes. Esses fatores limitam o desenvolvimento de uma considerável parcela da população e as tornam especialmente suscetíveis aos impactos de mudanças ambientais e

econômicas, o que não é exclusivo ao estado do Amazonas e, na verdade, ocorre em toda extensão do território nacional - no sertão nordestino, nas favelas das grandes metrópoles e tantos outros subgrupos habitacionais espalhados pelo país (Jean *et al.* 2024). Ao mesmo tempo, a riqueza dos recursos naturais e a resiliência dessas comunidades indicam que há um grande potencial para a implementação de soluções inovadoras e sustentáveis, como as tecnologias sociais baseadas na valorização da biomassa local. Nesse cenário, a engenharia química, as políticas públicas inclusivas e o incentivo de capital privado local podem desempenhar um papel transformador, contribuindo para o desenvolvimento integral de comunidades vulneráveis e para a redução das desigualdades regionais.

3.2 Tecnologias sociais e sustentabilidade energética

A sustentabilidade energética é um dos principais desafios do século XXI, especialmente em regiões onde o acesso à energia é limitado e a vulnerabilidade social é evidente. O conceito de sustentabilidade energética vai além do simples fornecimento de energia, abrangendo a transição para fontes renováveis, a redução de impactos ambientais e a promoção do bem-estar social. Nesse contexto, as tecnologias sociais emergem como instrumentos cruciais para atender às necessidades energéticas de comunidades vulneráveis, oferecendo soluções inovadoras, acessíveis e alinhadas aos princípios de sustentabilidade e justiça social (Arrabal *et al.*, 2024).

As tecnologias sociais são definidas como processos, métodos e produtos desenvolvidos de forma participativa, visando solucionar problemas sociais e promover a inclusão e o bem-estar coletivo. De acordo com Osoegawa e Chaves (2024), as tecnologias sociais se diferenciam de outras inovações tecnológicas pelo foco na democratização do conhecimento, na adaptabilidade ao contexto local e na priorização das demandas das comunidades envolvidas. Esses princípios epistemológicos são fundamentais para garantir que as soluções propostas sejam sustentáveis a longo prazo e atendam às necessidades específicas das populações mais vulneráveis.

O conceito de sustentabilidade energética está intrinsecamente ligado ao uso racional dos recursos naturais e à transição para fontes renováveis de

energia. Franco *et al.* (2020) destacam que a energia limpa e acessível é um dos pilares do desenvolvimento sustentável, sendo essencial para reduzir desigualdades sociais e melhorar a qualidade de vida. Essa abordagem considera não apenas os aspectos ambientais, mas também os impactos econômicos e sociais das soluções energéticas. A sustentabilidade energética deve levar em conta a integração das populações locais no processo de desenvolvimento, valorizando seus saberes tradicionais e promovendo sua autonomia.

A transição energética, enquanto processo de substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis, precisa ser acompanhada por uma mudança de paradigma que inclua a regeneração dos ecossistemas e a justiça social. Oliveira (2021) introduz o conceito de "alteridade sustentável", que enfatiza a necessidade de reconhecer e valorizar as diversidades culturais e ambientais no desenvolvimento de soluções energéticas. Nesse sentido, tecnologias sociais como sistemas descentralizados de energia, incluindo a gaseificação de biomassa, oferecem uma alternativa promissora para atender às demandas de comunidades marginalizadas, respeitando especificidades culturais e territoriais.

As inovações tecnológicas são importantes na viabilização de soluções sustentáveis para a geração de energia. Osoegawa e Chaves (2024) apontam que as tecnologias sociais devem ser fundamentadas em um diálogo constante entre ciência, cultura e política, garantindo que as soluções propostas sejam inclusivas e sustentáveis. Exemplos de tecnologias sociais aplicadas incluem sistemas de energia solar, eólica e de biomassa, que podem ser adaptados às necessidades de comunidades específicas, oferecendo alternativas economicamente viáveis e ambientalmente responsáveis.

Uma das abordagens mais promissoras para a sustentabilidade energética é a utilização de resíduos como fonte de energia. Guedes *et al.* (2020) discutem a produção de combustíveis derivados de resíduos da indústria de cimento (CDR), destacando o potencial do aproveitamento completo da matéria-prima. Esse modelo pode ser adaptado para o contexto de algumas comunidades, a abundância de biomassa e resíduos orgânicos representa uma oportunidade para a implementação de sistemas de geração de energia baseados em tecnologias sociais.

A produção descentralizada de energia é um elemento-chave para a sustentabilidade energética, especialmente em regiões de difícil acesso. Franco *et al.* (2020) enfatizam que sistemas descentralizados não apenas reduzem os custos de transporte e distribuição de energia, mas também fortalecem a resiliência das comunidades locais, tornando-as menos dependentes de grandes infra estruturas centralizadas. A gaseificação de biomassa, por exemplo, permite a geração de energia em pequena escala, utilizando recursos locais e promovendo a autonomia energética das populações.

As tecnologias sociais oferecem uma série de benefícios para comunidades vulneráveis, incluindo a geração de renda, a inclusão social e a redução de impactos ambientais. De acordo com Arrabal *et al.* (2024), a sustentabilidade energética pode ser um catalisador para o desenvolvimento econômico, permitindo a criação de novas oportunidades de trabalho e a diversificação das atividades produtivas. Além disso, a adoção de soluções sustentáveis fortalece a coesão social, promovendo a colaboração entre os membros da comunidade e incentivando práticas de gestão participativa.

Apesar de seu potencial transformador, a implementação de tecnologias sociais enfrenta uma série de desafios, incluindo a falta de financiamento, o desconhecimento técnico e a resistência cultural. Osoegawa e Chaves (2024) ressaltam que a superação desses obstáculos exige um esforço coordenado entre governos, organizações não governamentais, universidades e as próprias comunidades beneficiadas. A capacitação técnica e a educação ambiental são fundamentais para garantir o sucesso das iniciativas, assim como o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias sustentáveis.

A sustentabilidade energética, aliada às tecnologias sociais, representa um caminho promissor para promover o bem-estar e a inclusão social em comunidades vulneráveis. No caso das comunidades brasileiras, a adoção de soluções descentralizadas e sustentáveis, como a gaseificação de biomassa, pode atender às demandas energéticas locais, ao mesmo tempo em que contribui para a preservação ambiental e o fortalecimento da autonomia das populações. Para que essas iniciativas sejam bem-sucedidas, é essencial adotar uma abordagem participativa e interdisciplinar, que considere os

aspectos culturais, sociais e ambientais das comunidades envolvidas, alinhando-se aos princípios da justiça social e da transição energética regenerativa.

3.3 Potencial energético da biomassa brasileira

O Brasil é um país rico em recursos naturais que podem ser utilizados como fonte de energia renovável. A biomassa, em particular, destaca-se como um recurso abundante e versátil, com grande potencial para atender às demandas energéticas de diversas regiões de maneira sustentável. Essa abordagem é especialmente relevante em áreas remotas, onde o acesso à energia é limitado e a dependência de fontes fósseis é insustentável. A valorização de resíduos vegetais e agrícolas oferece uma oportunidade de integrar sustentabilidade ambiental e desenvolvimento socioeconômico (Nagaishi *et al.*, 2020).

Definida como qualquer material de origem biológica, como resíduos agrícolas, florestais e industriais, que pode ser utilizado para a produção de energia, a biomassa desempenha um papel estratégico, não apenas pela abundância de resíduos orgânicos gerados pela agricultura e extrativismo, mas também pelo potencial de sua utilização para mitigar impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais (Souza e Silva, 2021). Além disso, o aproveitamento energético da qual contribui para a diversificação da matriz energética e para a redução da emissão de gases de efeito estufa.

O Brasil, graças à larga extensão territorial e ampla biodiversidade, oferece uma grande variedade de biomassa. Alguns já são amplamente consolidados e utilizados (como o bagaço de cana) e outros pouco explorados, sendo estes, então, uma oportunidade de aproveitamento residual e geração de energia.

- 1. Resíduos de cultivos agrícolas:** Resíduos de cultivos como cana-de-açúcar (bagaço), castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*), buriti (*Mauritia flexuosa*), entre outros. Estudos indicam que o resíduo da castanha possui potencial energético elevado, sendo adequado para a produção de carvão ativado e combustíveis sólidos (Souza e Silva, 2021).

2. **Resíduos florestais:** A biomassa de capoeira triturada, proveniente de áreas manejadas da floresta Amazônica, apresenta características energéticas promissoras, como alto poder calorífico e baixo teor de umidade, tornando-se uma alternativa viável para a geração de energia (Nagaishi *et al.*, 2020). De acordo com o estudo de Oliveira (2018), espécies típicas da Caatinga, como Mofumbo (*Combretum leprosum*) e Angico (*Anadenanthera macrocarpa*) apresentam potencial para aplicação como fonte de energia via gaseificação.
3. **Resíduos de frutos:** Resíduos de frutos como os de *Bertholletia spp.* e *Lecythis spp* (sapucaia), árvores tropicais nativas do Rio de Janeiro, possuem propriedades químicas-energéticas que favorecem sua utilização para combustão ou processos termoquímicos, como a gaseificação (Carmona *et al.*, 2022). Fanslau *et al* (2021) aponta que o babaçu (*Orbignya phalerata*), fruta nativa encontrada principalmente no Nordeste e Norte do país, contém componentes lignocelulósicos com alto poder calorífero, possibilitando utilização como fonte de energia.
4. **Sementes:** O tucumã-do-Amazonas, palmeira abundante na região amazônica, tem frutos comestíveis e sementes usadas em artesanato, sua semente tem alto poder calorífico superior (30 MJ/kg) e teor de umidade de 18,5% estudo aponta que o uso dessa biomassa como fonte energética é uma alternativa sustentável. (Unicamp, 2013).

A biomassa como fonte energética apresenta diversas vantagens, que vão desde a redução de resíduos até a geração de renda para as comunidades locais. Entre os benefícios mais significativos estão:

- **Sustentabilidade ambiental:** A biomassa é uma fonte de energia renovável e sua utilização reduz a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.
- **Valorização de resíduos:** Resíduos que seriam descartados ou subutilizados passam a ser convertidos em energia, promovendo a economia circular.
- **Geração de empregos:** O processamento e o manejo sustentável da biomassa criam oportunidades de trabalho para as comunidades locais, incentivando o desenvolvimento econômico regional.

- **Redução de custos energéticos:** Em áreas remotas, o uso de biomassa local reduz os custos associados ao transporte de combustíveis fósseis.

Apesar das vantagens, o aproveitamento da biomassa em pequenas comunidades enfrenta desafios significativos. A logística de coleta e transporte é uma das principais barreiras, dada a vastidão da região e as condições precárias de infraestrutura. Além disso, a ausência de tecnologias acessíveis dificulta a implementação de projetos de geração de energia a partir da biomassa (Guerreiro *et al.*, 2022). Outro desafio é a variabilidade nas características físico-químicas da biomassa, que podem impactar o desempenho dos sistemas energéticos.

Diversas tecnologias estão disponíveis para a conversão da biomassa em energia, incluindo a combustão direta, a gaseificação e a pirólise. Dentre essas, a gaseificação tem se destacado por sua eficiência e versatilidade. Outra abordagem promissora é a utilização de sistemas de combustão para a geração de energia térmica em embarcações regionais, que dependem fortemente de combustíveis fósseis. Estudos indicam que a substituição por biomassa pode reduzir significativamente os impactos ambientais e os custos operacionais (Guerreiro *et al.*, 2022).

O potencial energético da biomassa brasileira é inegável, mas sua exploração deve ser realizada de maneira sustentável, principalmente em comunidades já marginalizadas. Isso implica em práticas de manejo que preservem a biodiversidade local e respeitem os modos de vida das comunidades tradicionais. Carmona *et al.* (2022) destacam que o aproveitamento de resíduos florestais e agrícolas contribui para a sustentabilidade ambiental, desde que sejam evitadas práticas de exploração predatória.

Além disso, o desenvolvimento de tecnologias sociais que incorporem o conhecimento tradicional das comunidades é essencial para garantir a aceitação e o sucesso dos projetos de bioenergia na região. A educação ambiental e a capacitação técnica são ferramentas fundamentais para promover o uso sustentável da biomassa e fortalecer a autonomia das populações locais.

A biomassa representa uma oportunidade única para a promoção de uma matriz energética mais limpa e sustentável. A abundância de resíduos orgânicos e a diversidade de espécies vegetais oferecem um potencial significativo para a geração de energia renovável, que pode atender às necessidades de comunidades remotas e contribuir para a preservação ambiental. No entanto, para que esse potencial seja plenamente aproveitado, é necessário superar desafios logísticos e tecnológicos, além de garantir que os projetos de bioenergia sejam conduzidos de maneira ética e inclusiva. Ao integrar sustentabilidade ambiental e desenvolvimento econômico, o aproveitamento da biomassa pode se tornar um motor para a transformação social.

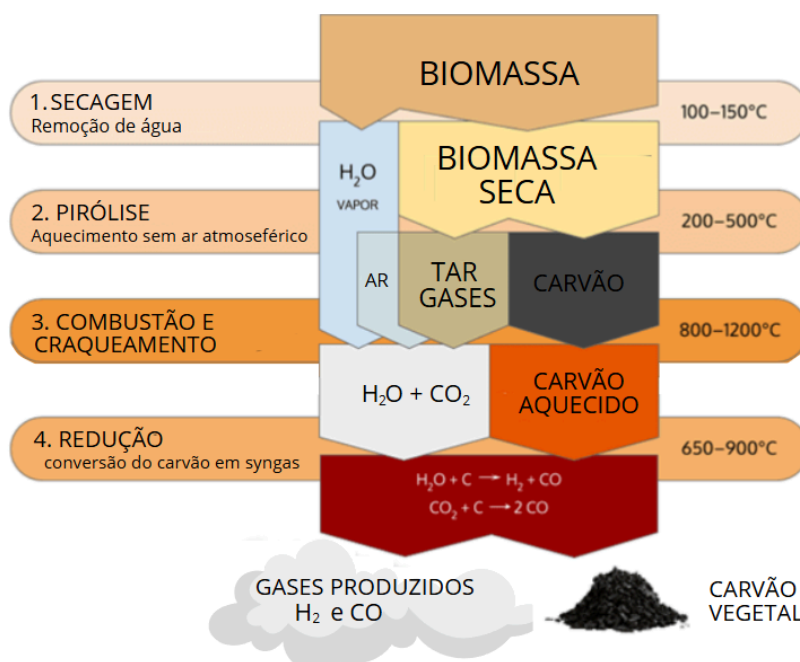
3.4 Gaseificação de biomassa: princípios e aplicações

A gaseificação de biomassa é uma tecnologia termoquímica que converte materiais orgânicos, como resíduos agrícolas e florestais, em um gás combustível denominado *syngas*. Esse processo, que ocorre em condições controladas de temperatura e quantidade de oxigênio, destaca-se por sua eficiência energética e seu potencial para substituir combustíveis fósseis, contribuindo para a transição energética e a sustentabilidade ambiental (Barros *et al.*, 2022). A gaseificação tem se mostrado uma alternativa promissora para a geração de energia, especialmente em comunidades vulneráveis e áreas remotas, onde a biomassa é abundante e acessível.

O processo de gaseificação é baseado na decomposição térmica da biomassa, que ocorre em quatro etapas principais: secagem, pirólise, combustão e reação de oxidação-redução. Na etapa inicial, a biomassa é aquecida para a remoção de umidade na forma de vapor de água. Em seguida, ocorre a pirólise, processo endotérmico que realiza a decomposição da biomassa através de aquecimento controlado na ausência de oxigênio atmosférico (Da Silva Mota *et al.*, 2015). Ambas as etapas acima são endotérmicas, ou seja, necessitam de uma fonte de calor primária, após isso a energia necessária é fornecida pela própria combustão da fumaça oriunda da pirólise. Na etapa de combustão, na qual o ar atmosférico é inserido no gaseificador, resultando em queima e geração de calor no interior do

equipamento. Tal aumento de temperatura provoca o craqueamento do alcatrão e formação de CO_2 . Por fim, as reações de oxidação e redução convertem esses componentes em um gás combustível com elevado poder calorífico (Veríssimo *et al.*, 2020). O esquema das principais transformações e etapas da gaseificação está disposto na Figura 3.

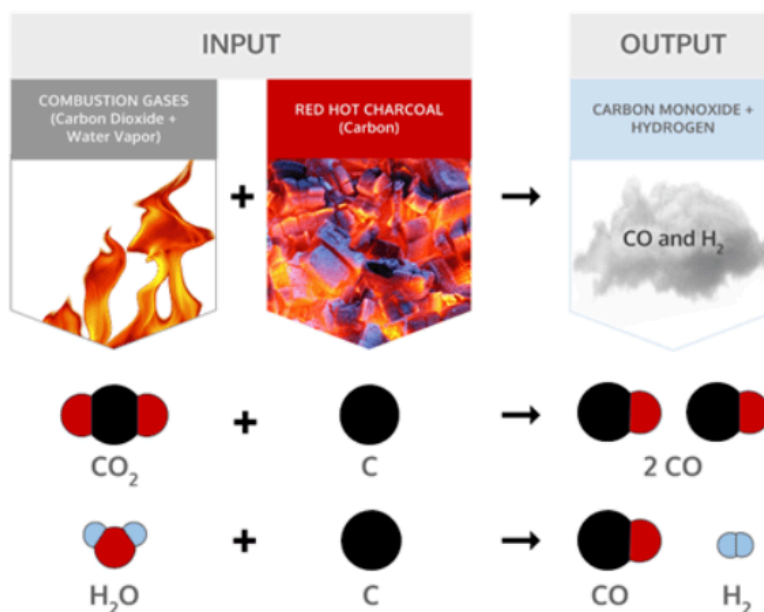
Figura 3. Processos e conversões da gaseificação.



Fonte. All Power Labs 2025 (Adaptado).

Através da Figura 3, pode-se entender que a formação de *syngas* ocorre por meio da reação dos gases e vapores gerados ao longo da pirólise com o carbono extremamente reativo do carvão em alta temperatura. Dessa forma, o dióxido de carbono e vapor de água recém formados são reduzidos em gases combustíveis. A Figura 4 explicita a última etapa da gaseificação.

Figura 4. Reação de oxidação e redução do CO₂ e vapor de água.



Fonte. All Power Labs. 2025

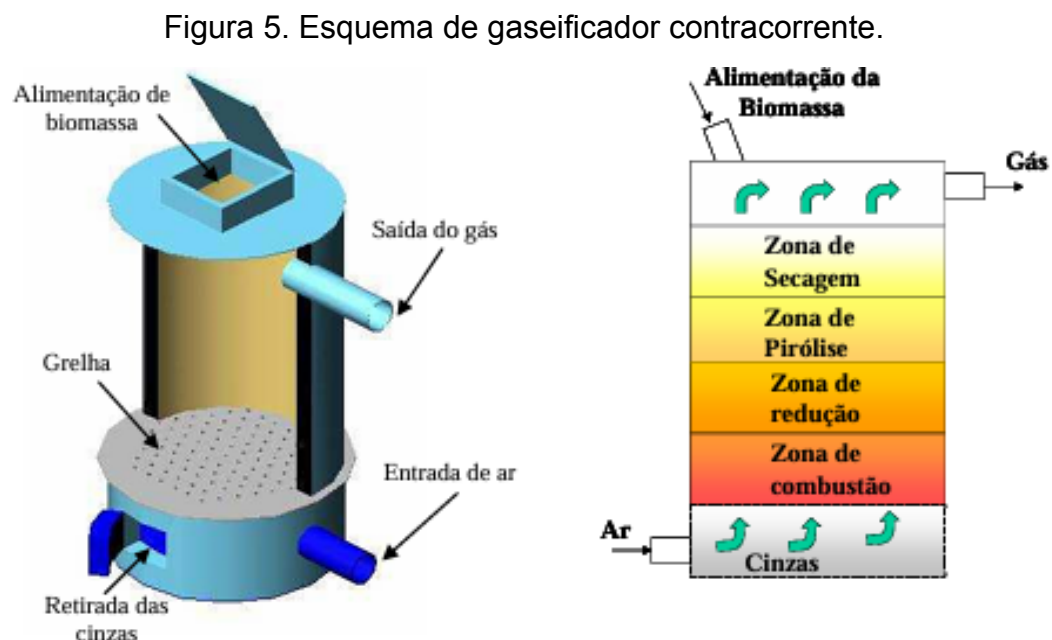
De acordo com as Figuras 3 e 4, a gaseificação tem três produtos principais, carvão (fração sólida), alcatrão ou bio-óleo (fração líquida) e *syngas* (fração gasosa), os quais têm sua formação favorecida de acordo com as características do processo, principalmente durante a pirólise. Em geral, pirólise em baixas temperaturas e maior tempo de residência, ocorre favorecimento da formação de carvão vegetal, da mesma maneira que, processos mais rápidos com maior taxa de aquecimento, tem-se maior produção de bio-óleo e, por fim, em processos com taxas de aquecimento muito rápidas, com baixíssimo tempo de residência, há favorecimento da formação do *syngas* (Da Silva Mota *et al.*, 2015). Diante disso, a eficiência do processo e a taxa de formação de produto desejado são fatores que dependem da qualidade da biomassa, do teor de umidade da qual, das condições do processo e do tipo de gaseificador.

Existem diferentes configurações de reatores utilizados no processo de gaseificação, sendo os mais comuns os de leito fixo e leito fluidizado. Segundo Felix *et al.* (2021), os reatores de leito fixo são amplamente utilizados em sistemas de pequena escala devido à sua simplicidade operacional e custo relativamente baixo. Esses reatores apresentam um fluxo unidirecional de biomassa e agentes gaseificantes, o que facilita a separação dos subprodutos

e a produção de *syngas* de alta qualidade. Dentre os gaseificadores de leito fixo há mais uma divisão quanto ao seu funcionamento, de acordo com o fluxo de entrada do gás, sendo eles: contracorrente, concorrente e cruzado.

3.4.1 Gaseificador Leito Fixo Contracorrente (*updraft*)

Neste tipo de equipamento o fluxo de gás é contrário ao da alimentação de biomassa, a qual é feita na parte superior do equipamento. Segundo Andrade *et al.* (2007), o pré-aquecimento proveniente dos gases da região de combustão favorecem a eficiência térmica do equipamento, entretanto, em contrapartida, tem-se como resultando em um gás de síntese (*syngas*) impuro, devido ao arraste do alcatrão (bio-óleo) pelo gás, de tal maneira que não haja craqueamento na combustão, resultando em um *syngas* com alto teor de alcatrão e voláteis. Dessa forma, o gás produzido por gaseificação em sistema contracorrente não é adequado para aplicação direta em motores de combustão interna ou turbinas a gás, necessitando de um sistema de limpeza refinado e, em geral, caro. A Figura 5 apresenta um esquema de equipamento e seu funcionamento de um gaseificador contracorrente.



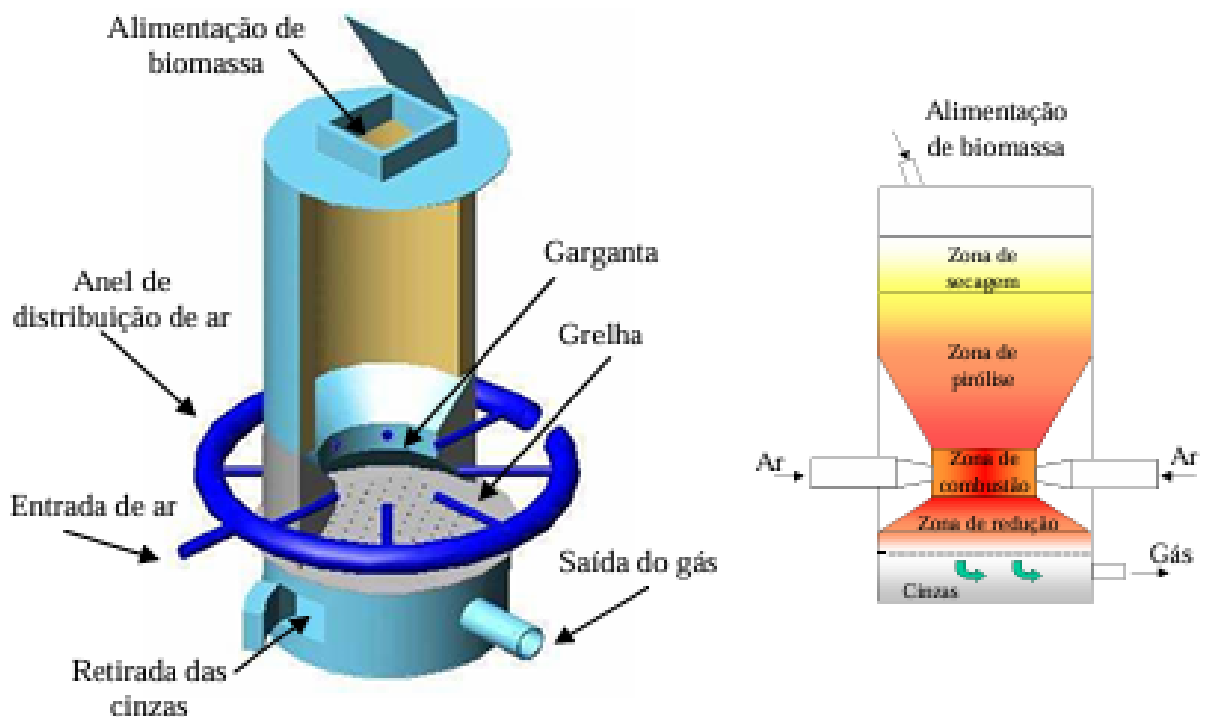
Fonte. Andrade. 2007.

A Figura 5 evidencia que a zona de combustão, região com maiores temperaturas de operação, ocorre na parte inferior do equipamento, com isso, o gás produzido tem menor temperatura de saída do equipamento, sendo ideal para a queima direta.

3.4.2 Gaseificador Leito Fixo Concorrente (*downdraft*)

Gaseificador mais difundido e utilizado, inclusive em veículos, uma vez que, em contrapartida ao *updraft*, o gás produzido é relativamente livre de bio-óleo e muito mais limpo, permitindo aplicação direta em turbinas e motores à combustão interna, poupando custos de limpeza. Nesta configuração, o fluxo de ar fornecido é dado ou na parte superior do equipamento, da mesma forma que a biomassa, ou lateralmente (Andrade *et al.* 2007). O esquema de gaseificador *downdraft* está disposto na Figura 6.

Figura 6. Esquema de gaseificador concorrente.



Fonte. Andrade. 2007.

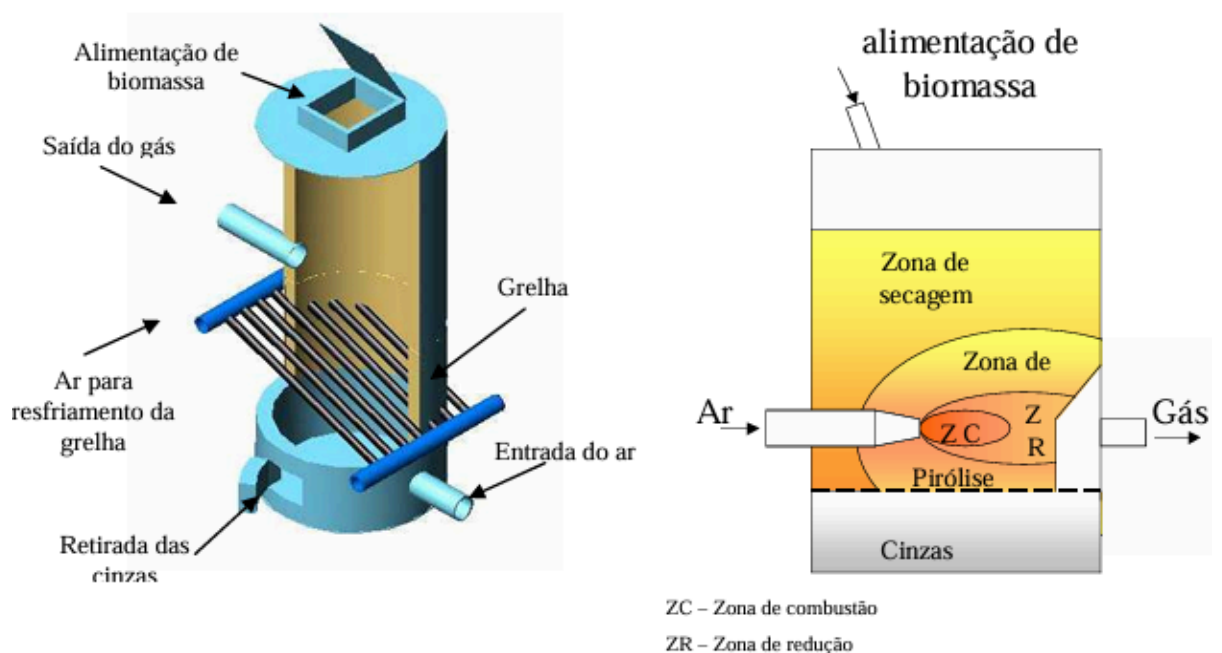
A Figura 6 apresenta um modelo de gaseificador com entrada de ar lateral. Da mesma forma que ocorre no reator contracorrente, as zonas de reação no

gaseificador concorrente são muito bem definidas, o que se destaca é uma redução de diâmetro interno na região da combustão, denominada de garganta, cuja função é garantir uniformidade da temperatura em toda região, com entrada de ar nos injetores de forma radial. Em geral, trata-se de um equipamento de fácil construção e propõe grande segurança para o processo, contudo, a configuração do fluxo de ar, somado à restrição do fluxo contínuo de biomassa pela garganta, tem como resultado um equipamento de menor capacidade de geração (Ferrero, 1989).

3.4.3 Gaseificador Leito Fixo Fluxo Cruzado (*cross flow*)

Este tipo de equipamento funciona entre um meio termo entre os dois outros já citados, o gás de síntese obtido é intermediário entre os já apresentados na condição de pureza. Apesar de ser um equipamento relativamente simples de construção e mais leve que os já apresentados, sua utilização é limitada pelo tipo de biomassa, apresentando sensibilidade à umidade e granulometria da qual (Andrade *et al.* 2007). A Figura 7 esquematiza um gaseificador do tipo *cross flow*.

Figura 7. Esquema de um gaseificador de fluxo cruzado.

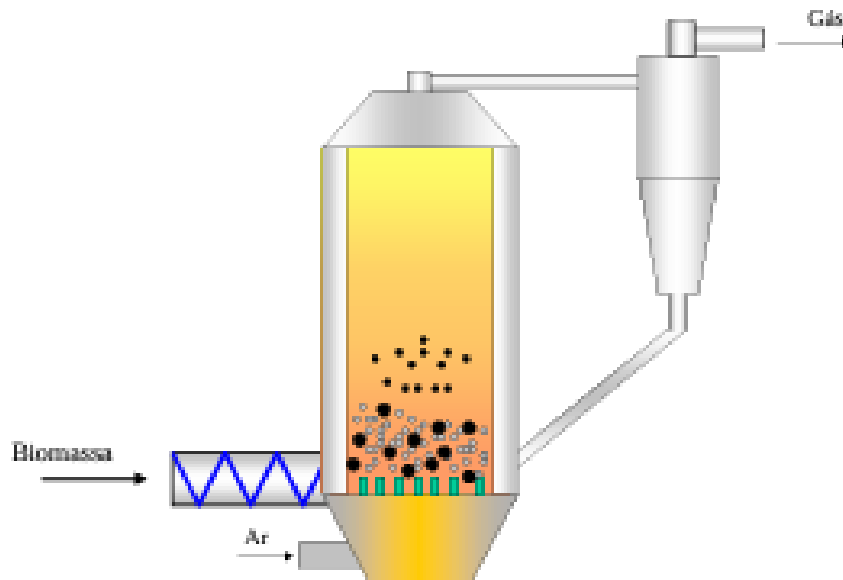


Fonte. Andrade. 2007.

3.4.4 Gaseificador Leito Fluidizado

Os reatores de leito fluidizado oferecem maior homogeneidade térmica e eficiência de conversão, dados pelo excelente contato entre o sólido e o gás ao longo do processo, favorecendo as reações. O leito, geralmente composto por areia, é aquecido e fluidizado por ar, no instante em que a biomassa é introduzida no leito ocorre sua queima. Diante disso, a temperatura do leito é um dos aspectos mais importantes para o desempenho do gaseificador, o recomendado é operar o equipamento na faixa de 750 a 850°C. Os gaseificadores de leito fluidizado se dividem em dois subtipos, borbulhante e circulante. A Figura 8 apresenta um esquema de um sistema de gaseificação em leito fluidizado circulante.

Figura 8. Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante.

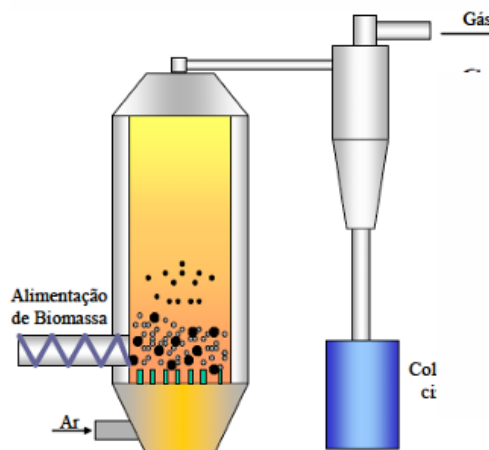


Fonte. Repositório UNICAMP, 2016.

Como pode-se analisar pela Figura 8, a entrada de ar e biomassa são feitas pela parte inferior do equipamento, além disso, no caso dos gaseificadores circulantes as partículas arrastadas ao longo do processo retornam ao leito, obtendo maior conversão de carbono, uma vez que o tempo de residência é maior, o que não ocorre em gaseificadores borbulhantes, que para contornar

a diminuição do tempo de residência das partículas no leito, opera com velocidade inferior a de arraste pneumático. A Figura 9 esquematiza um sistema de gaseificação via leito fluidizado borbulhante.

Figura 9. Esquema de um gaseificador de leito fluidizado borbulhante.



Fonte. Repositório UNICAMP, 2016.

Diante do que foi apresentado, cada um dos tipos de gaseificador se aplicam melhor em determinadas condições e processos. Em geral, sistemas em leito fixo são mais simples de operar, mais baratos, mas recomendados para operações de menor porte. A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os principais sistemas de gaseificação com os dados já apresentados neste tópico.

Tabela 1: Características dos tipos de gaseificadores.

Tipo de Gaseificador	Vantagens	Desvantagens
<i>Updraft</i>	Construção simples, alta eficiência térmica, excelente conversão.	Gás produzido com alto teor de alcatrão, não indicado para motores à combustão.
<i>Downdraft</i>	Construção simples, seguro, alta conversão, <i>syngas</i> limpo de alcatrão. A aplicação direta em motores é viável.	Requer baixa umidade da biomassa, alta temperatura do gás produzido.

Tipo de Gaseificador	Vantagens	Desvantagens
<i>Crossflow</i>	Construção simples e alta conversão.	Gás de síntese com teor de alcatrão moderado. Sensibilidade à biomassa (granulometria e umidade)
Leito Fluidizado	Bom controle de temperatura, tolerância a granulometria, moderado nível de alcatrão. Alta produtividade.	Alto custo de instalação, não é uma operação trivial, perda de carbono com cinzas, alta concentração de particulado no <i>syngas</i>

Fonte. Andrade, 2007 e Repositório UNICAMP, 2016.

3.5 Qualidade do gás de biomassa

De acordo com Anukam *et al.* (2016), o pré-tratamento da biomassa como a pré-secagem e a redução do tamanho das partículas, pode melhorar significativamente a eficiência do processo e a qualidade do *syngas* produzido. Estudos também mostram que resíduos florestais possuem elevado potencial energético, além de contribuírem para a redução de impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado (Briones-Hidrovo *et al.*, 2021). O *syngas* produzido na gaseificação é uma mistura de gases combustíveis, principalmente monóxido de carbono, hidrogênio e metano. Esse gás pode ser utilizado diretamente para geração de energia térmica ou convertido em eletricidade por meio de motores a combustão interna ou turbinas. Além disso, o *syngas* é uma matéria-prima versátil para a síntese de combustíveis líquidos, como metanol e hidrogênio, ampliando seu leque de aplicações (Dogru e Erdem, 2018). Em comunidades remotas, o uso direto do *syngas* para geração de energia elétrica via motores de combustão interna ou turbinas a gás representa uma solução viável e de baixo custo, especialmente em sistemas de pequena escala (Chaves *et al.*, 2016).

Embora a gaseificação de biomassa apresenta vantagens significativas, sua implementação ainda enfrenta desafios técnicos e operacionais. Um dos principais problemas é a formação de alcatrões durante o processo, que pode

comprometer a eficiência e a vida útil dos equipamentos. A Tabela 2 apresenta padrões de qualidade necessários do *syngas* para funcionamento de motores à combustão interna e de turbinas a gás.

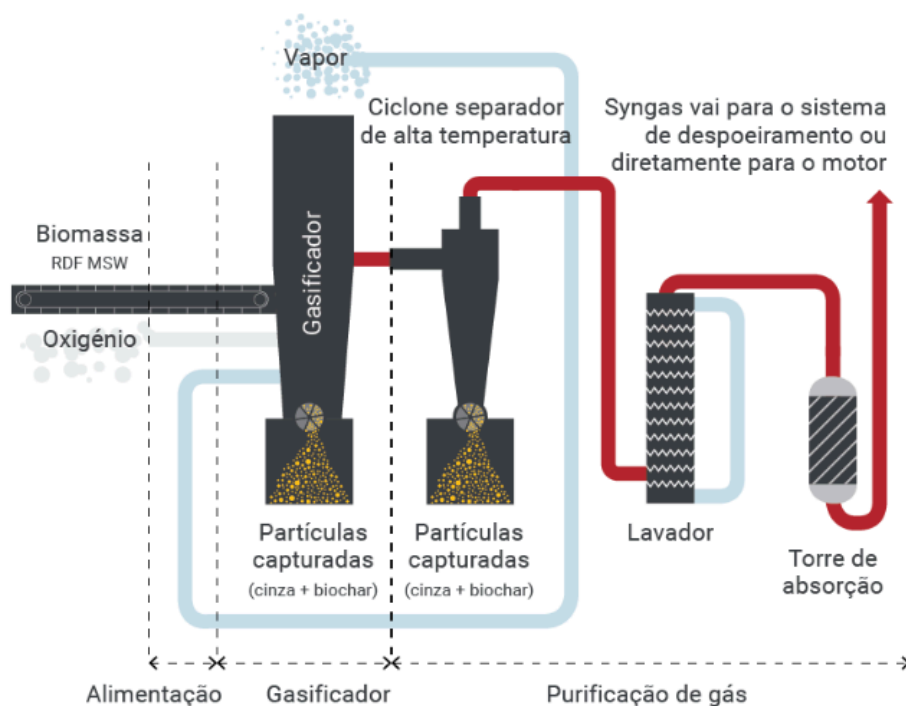
Tabela 2. Qualidade do gás de síntese requerida pelos equipamentos.

Gerador de Potência	Particulados [mg/Nm³]	Dimensão do Particulado [µm]	Alcatrão [mg/Nm³]	Metais Pesados [mg/Nm³]
Motor à combustão interna	< 50	< 10	< 100	-
Turbina a gás	< 30	< 5	-	0,24

Fonte. Hasler, 1999.

A Tabela 2, de acordo com Hasler (1999), mostra que a turbina a gás é mais sensível do que o motor à combustão interna se tratando de presença e tamanho de materiais particulados (cinzas, principalmente), isso ocorre devido ao choque do particulado nas hélices em alta velocidade, causando erosão nas quais e, conseqüentemente, diminuindo a vida útil do equipamento. Em nível de alcatrão ou bio-óleo, o motor à combustão interna é mais sensível devido o depósito e acúmulo de óleo nas paredes do motor, atrapalhando seu funcionamento. A fim de manter os padrões estabelecidos pelos equipamentos, existem técnicas como a reforma catalítica e o uso de materiais adsorventes que podem ser empregadas para melhorar a pureza do gás produzido (Arena, 2012.) A Figura 10 apresenta um esquema de gaseificação e limpeza do gás de síntese.

Figura 10. Sistema de gaseificação e limpeza do *syngas*.



Fonte. ACS (*Advanced Cyclone Systems*).

A Figura 10 apresenta a captação de partículas sólidas (cinzas) em um ciclone e, posteriormente, a remoção de alcatrão (bio-óleo) em um sistema de lavagem de gás, purificando o *syngas* produzido. Com base nos estudos apresentados, nas Tabelas 1 e 2 e nas características gerais de cada tipo de gaseificador, tem-se que gaseificadores de leito fixo dos tipos contracorrente (*updraft*) produzem um gás de síntese com alta concentração de alcatrão devido a zona de reação, os do tipo *cross flow* apresentam sensibilidade à variação da biomassa e umidade e os de leito fluidizado, além de caros, alta complexidade de operação, produzem *syngas* com alto teor de particulados. Diante disso, o presente trabalho se embasa no gaseificador de leito fixo do tipo concorrente (*downdraft*), através do qual, o gás de síntese gerado cumpre com os principais requisitos dos equipamentos de geração de energia elétrica dispensando técnicas de limpeza, tem custo acessível de instalação, fácil operação e, apesar de ter baixa produtividade, o sistema em questão, pequenas comunidades, não requisita uma grande produção de gás de síntese - além do que, essa defasagem produtiva pode ser contornada com a instalação de mais unidades de geração.

Paiva *et al.* (2021) simularam o desempenho de um reator *downdraft* utilizando diferentes tipos de biomassa, verificando a viabilidade técnica e a qualidade do *syngas* produzido. Em comunidades rurais do Quênia, Njenga *et al.* (2016) avaliaram a utilização de gaseificadores para sistemas de cocção limpa, destacando a redução do impacto ambiental e a melhoria das condições de saúde dos usuários. Essas experiências mostram que a tecnologia pode ser adaptada para atender a demandas específicas, desde a geração de energia elétrica até o uso doméstico.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo caracterizou-se como pesquisa científica aplicada, com enfoque na idealização de um protótipo de gaseificador de biomassa voltado à geração de energia elétrica para comunidades vulneráveis no Brasil. A abordagem adotada foi qualitativa e interdisciplinar, fundamentada na revisão bibliográfica, modelagem teórica e proposições conceituais, buscando responder aos objetivos específicos delineados (Nascimento, 2016)

4.1 Estudo de caso:

A comunidade Brejo Dois Irmãos está situada na zona rural do município de Pilão Arcado, no norte do estado da Bahia, inserida na região do semiárido, caracterizada por clima seco, vegetação de caatinga e dificuldades históricas de acesso a políticas públicas e infraestrutura básica. Com uma população estimada em aproximadamente 150 a 200 habitantes, trata-se de um núcleo rural de pequeno porte, onde predomina a agricultura familiar como principal meio de subsistência. A comunidade é marcada por um isolamento geográfico significativo (120 quilômetros da sede do município Pilão Arcado), com acesso limitado a centros urbanos e escassas oportunidades de emprego formal (Governo da Bahia, 2024.) A Figura 11 retrata a comunidade Brejo Dois Irmãos, Pilão Arcado - BA.

Figura 11. Comunidade Brejo Dois Irmãos, Pilão Arcado, Bahia.



Fonte. TVE Bahia (2021).

Através da Figura 11, nota-se a proximidade da comunidade com a plantação de buriti (à esquerda da comunidade), segundo o Governo do Estado da Bahia e a Companhia de Desenvolvimento e Ação Regional (CAR), a comunidade em questão gera renda através da utilização do fruto Buriti, produzindo doces e licor através do produto, o qual deu nome para a marca criada, “Buricã”. Diante disso, o aproveitamento do pecíolo de buriti como geração de energia se faz extremamente importante na região, agregando ainda mais valor para o produto e resultando em impacto socioambiental na região, reduzindo os resíduos e gerando energia para uma comunidade tão marginalizada e deslocada. A Figura 12 apresenta a palmeira buriti e seu fruto, utilizado para geração de renda na comunidade Brejo Dois Irmãos.

Figura 12. Buriti: palmeira e fruto.



Fonte. Caixa Colonial (2020).

Diversas comunidades do Brasil enfrentam desafios significativos relacionados ao acesso à energia elétrica, como o caso da Comunidade Brejo Dois Irmãos-BA. Essas populações, em geral, vivem em locais remotos, onde a infraestrutura básica, incluindo sistemas de eletrificação, é muitas vezes inexistente ou precária. A ausência de energia elétrica limita o funcionamento de escolas, postos de saúde e atividades econômicas locais, impactando diretamente a qualidade de vida dessas comunidades.

A proposta de um gaseificador de biomassa é particularmente relevante para essas regiões, pois possibilita a conversão de resíduos orgânicos locais em energia elétrica de forma sustentável e acessível, promovendo autonomia energética e inclusão social.

4.1.1 Protótipo do Gaseificador

Para o desenvolvimento do protótipo de gaseificador downdraft, foram adotadas hipóteses e considerações técnico-operacionais com base na literatura, com o objetivo de adequar o sistema à realidade da comunidade Brejo Dois Irmãos, localizada no município de Pilão Arcado (BA), utilizando o pecíolo de buriti como biomassa. Para o dimensionamento do equipamento foram utilizados os dados do balanço de massa, considerando as correntes de entrada e saída do qual, além disso foram utilizadas relações empíricas de trabalhos dispostos na literatura, de tal forma que correlacionam quantidade de biomassa de entrada com o diâmetro ótimo da região de garganta, e através da qual a altura e diâmetro total do equipamento.

A posteriori ao dimensionamento do gaseificador, estimou-se a quantidade de energia mensal gerada pelo qual, para tanto, em primeiro passo, considerou-se a biomassa como homogênea, com as seguintes características médias, fluxo de alimentação de 50 kg por hora, umidade de 22%, poder calorífico superior de 16,80 megajoules por quilograma e teor de cinzas de 4% (SOUZA et al., 2022; SILVA et al., 2021), devido a escassez de dados sobre o pecíolo de buriti, para o balanço de energia, utilizou-se a entalpia teórica de biomassa lignocelulósica, extremamente consolidada na literatura, sendo comumente utilizada na substituição de demais biomassas, quando não se tem os dados das quais. O poder calorífico inferior foi calculado a partir da correção

da umidade e do teor de hidrogênio da biomassa, estimado em 6%, levando-se em consideração o calor latente de vaporização da água. A partir desse valor, estimou-se a energia térmica total fornecida pela biomassa com base no fluxo de massa alimentado. Em seguida, foi determinada a energia contida no gás produzido pela gaseificação, mais uma vez, devido à escassez de dados na literatura a respeito da composição do *syngas* gerado através do pecíolo de buriti, foi utilizado uma composição genérica contemplada em estudos anteriores a este. Ademais, foi adotado ao equipamento a eficiência energética fria, uma vez que esta é a mais adequada para uso direto em motores à combustão interna ou turbina.

A energia elétrica gerada foi estimada considerando uma eficiência eletromecânica de conversão de 23,75%, correspondente ao conjunto motor-gerador acoplado ao sistema. Com base nisso, estimou-se a produção energética mensal do sistema, assumindo um tempo médio de operação de 14 horas diárias (2 turnos) durante 22 dias, desconsiderando os finais de semana. Para a estimativa do número de residências atendidas, foi adotado o consumo médio residencial do Brasil, equivalente a 152,2 quilowatt-hora por mês (Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2025).

Por fim, foram levantadas algumas hipóteses para facilitar os cálculos e dar foco no principal objetivo do trabalho, dessa forma, considerou-se que as cinzas (correspondentes a 4% da massa alimentada) seriam descartadas diretamente, evitando acúmulo no equipamento e as perdas térmicas para a carcaça do gaseificador também foram desconsideradas.

5. RESULTADOS

5.1 Dimensionamento do Gaseificador

Sequencialmente à contextualização conceitual da gaseificação e à caracterização da comunidade Brejo Dois Irmãos, o presente trabalho segue para o dimensionamento do protótipo de gaseificador *downdraft*.

5.1.1 Caracterização da biomassa

A biomassa disponível foi analisada teoricamente, considerando propriedades energéticas e características químicas que influenciam o desempenho do processo de gaseificação. Esses materiais foram selecionados com base em seu alto poder calorífico, disponibilidade e demais características importantes para a gaseificação, como umidade, teor de cinzas e produção de alcatrão. Além disso, biomassas com uso difundido, como o bagaço de cana, foram desconsideradas, uma vez que esses resíduos são, em sua maioria, utilizados por indústrias e não por comunidades locais, as quais são o foco do trabalho. A Tabela 3 apresenta as principais características das biomassas estudadas considerando a disponibilidade no território nacional.

Tabela 3. Características das biomassas estudadas

Tipo de Biomassa	PCS (MJ/kg)	Teor de Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Formação Alcatrão	Disponibilidade	Fonte
Capoeira triturada	17,05	20	5	Baixa	Alta	Nagaishi (2020)
Castanha-do-brasil	18,30	15	3	Média	Média	Souza e Silva (2021)
Babaçu	22,90	12	2	Alta	Alta	Fanslau (2021)
Tucumã-do-amazonas	30,00	18	2	Alta	Média	Unicamp (2013)
Sapucaia (resíduos e frutos)	18,25	30 - 50	2	Média	Alta	Carmona (2022)
Mofumbo	19,25	9	2	Baixa	SI	Oliveira (2018)
Angico	18,83	13	3	Baixa	SI	Oliveira (2018)

Tipo de Biomassa	PCS (MJ/kg)	Teor de Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Formação Alcatrão	Disponibilidade	Fonte
Pecíolo de buriti	16,80	22	4	Baixa	Alta	Souza e Silva (2021)

*PCS: Poder calorífico superior

*SI: Sem Informação.

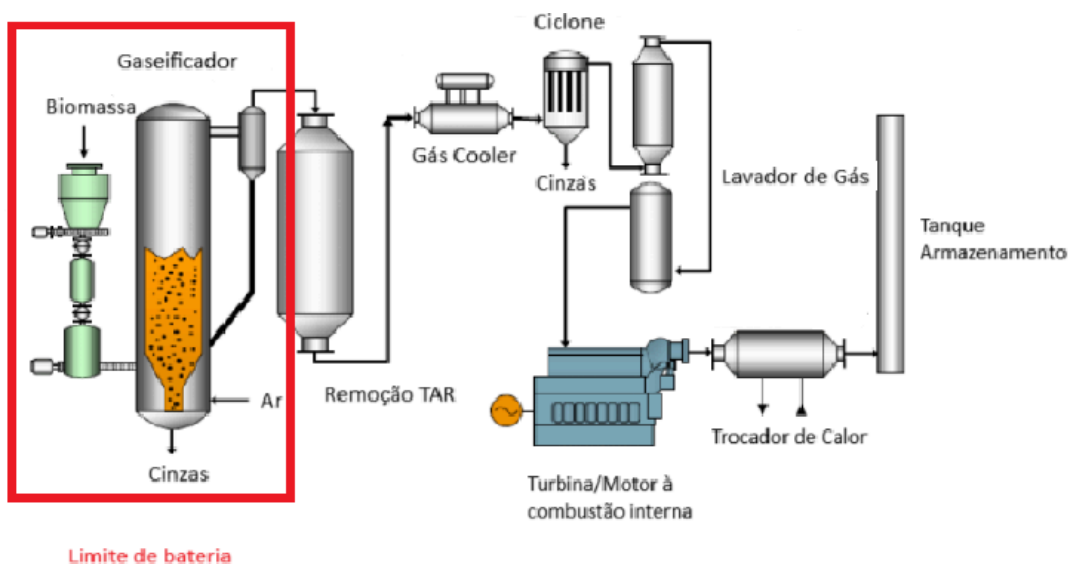
A Tabela 3 apresenta as principais características levadas em conta para utilização das biomassas no processo de gaseificação. A sazonalidade de obtenção do produto e a produção de alcatrão relacionada à biomassa foram os primeiros fatores excludentes da lista, previamente à análise energética das biomassas. Os frutos e sementes oleaginosos (babaçu, castanha-do-brasil e tucumã-do-amazonas), cuja pirólise tem como grande parte do produto bio-óleo, foram descartados como matéria prima, pois o gás de síntese obtido teria alta concentração de alcatrão resultando em um *syngas* sujo que demandaria um processo de lavagem prévia a entrada no motor à combustão interna e/ou turbina - processo custoso e foge do escopo social e acessível do presente trabalho. O sistema de gaseificação e geração de energia em questão exige baixo custo de instalação, manutenção e operação simplificada dadas as condições sócio-econômicas das comunidades alvo. Com finalidade de reduzir o número de operações, é de interesse do processo, biomassas que possuem baixo teor de umidade (vide Tabela 1), descartando etapas de pré-secagem, portanto a utilização de árvores tropicais e seus frutos, bem como a sapucaia, não se faz adequada ao projeto dado o alto teor de umidade.

Vale ressaltar que, apesar das características dessas biomassas serem favoráveis à gaseificação, é necessário compreender que este projeto conta com auxílio financeiro via parcerias com iniciativa privada e governamental e, portanto, por não apresentar caráter lucrativo não é cabível propor soluções que tenham maior número de operações (lavagem do gás e pré-aquecimento da biomassa) e, conseqüentemente, maior custo.

5.1.2 Sistema de gaseificação

Conforme já apresentado previamente (vide tópico 3.3), o gaseificador com melhores características para operações de pequena escala e baixo custo de instalação e operação é o concorrente (*downdraft*) do tipo garganta, produzindo gás síntese relativamente limpo de alcatrão, possibilitando aplicação direta em motores à combustão interna, os quais serão adotados preferencialmente às turbinas, pois são mais permissíveis a presença de particulados (Tabela 2), promovendo maior vida útil ao sistema de gaseificação. A Figura 13 apresenta um sistema industrial completo de gaseificação e traz destacado a parte do sistema contemplada neste trabalho.

Figura 13. Sistema de geração de energia via gaseificação de biomassa.



Fonte. Adaptado de Salam (2010).

O *syngas* na corrente de saída do gaseificador, considerando perdas para o ambiente, tem temperatura final na faixa de 500 a 950 °C (Figura 3), sendo necessário resfriamento anterior à entrada em motores/turbinas, que atuam na faixa de 25 a 150 °C (Bates *et al.*, 2017). O resfriamento, além de garantir o funcionamento ideal dos motores à combustão interna, aumenta a densidade do gás de síntese, melhorando a combustão (Mondal *et al.*, 2011). Assim, a adoção de um sistema de resfriamento do gás não apenas é recomendada, mas também deve ser prevista no projeto, integrando-se aos custos de

instalação. Entretanto, neste trabalho, considera-se que o desenvolvimento do protótipo do gaseificador é prioritário em relação a seus acessórios. Dessa forma, o dimensionamento de uma estação de resfriamento não se insere no escopo definido pelos objetivos propostos. Ademais, a variabilidade nas propriedades da biomassa pode dificultar a padronização do processo e a previsibilidade da qualidade do gás produzido (Roy *et al.*, 2013), com finalidade de garantir maior padronização, os processos industriais de maiores escalas acoplam ciclones, colunas de adsorção e lavadores de gás após o resfriamento do gás, resultando em produto isento de material particulado e bio-óleo (Alves *et al.*, 2015). Da mesma maneira, o sistema de limpeza do gás não será adotado devido o alto custo de instalação, operação e manutenção desses equipamentos. Entretanto, recomenda-se, como continuidade deste trabalho, para um resultado mais assertivo, uma análise comparativa do desempenho da gaseificação considerando todos os processos complementares (resfriamento e lavagem do gás) e os custos de instalação, operação e manutenção de cada etapa.

5.1.3 Dimensionamento do Gaseificador

O gaseificador foi dimensionado para atender as necessidades energéticas de uma pequena comunidade, projetado para ser compacto e eficiente, utilizando biomassa local como insumo. A capacidade de geração foi estipulada para fornecer energia elétrica suficiente para suprir as demandas básicas de uma comunidade pequena. A Figura 14 apresenta dados técnicos de gaseificadores *downdraft* tipo garganta, os quais foram utilizados para dimensionamento do protótipo.

Figura 14. *Datasheet* de gaseificadores tipo garganta.

GERAL			
Capacidade		kg/h	10 - 750
Energia gás de saída	Quente	GJ/h	0,11 - 12
	Frio	GJ/h	0,10 - 10
Energia gás de saída		kWe	10 - 750
Capacidade Específica Garganta		kg/m ² .h	180 - 3600
ALIMENTAÇÃO DA BIOMASSA - PERMITIDAS			
Dimensões		mm	20 - 80
Umidade		%	0 - 30
Cinzas		%	0 - 15
Relação Ar combustão / biomassa		-	1,25 - 2,00
CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO			
Pressão		bar	1 - 10
Temperatura Máxima		°C	1000 - 1200
CARACTERÍSTICAS DO SYNGAS PRODUZIDO			
Temperatura		°C	500 - 800
Composição base seca [%]		H ₂	16
		CO	20
		CO ₂	12
		CH ₄	2
		N ₂	50
		C ₂	<1
PCI		MJ/m ³	4,5 - 6
Quantidade Particulado		mg/Nm ³	40 - 500
Quantidade Alcatrão		mg/Nm ³	0 - 300

Fonte. Coronado, 2006.

O dimensionamento da região de constrição do diâmetro interno (garganta) é extremamente importante para o desenvolvimento do protótipo de gaseificador, sendo esta a zona de combustão do equipamento. A biomassa escolhida foi o pecíolo de buriti, apesar do menor PCS, maior umidade e um dos valores mais altos de teor de cinzas dentre as demais (vide Tabela 3), é a biomassa já utilizada para agregar valor na comunidade Brejo Dois Irmãos, com alta disponibilidade e já conhecida pelos moradores locais. Dessa forma seu aproveitamento energético na região se faz extremamente necessário e com maior impacto do que qualquer outra biomassa.

O fluxo de entrada de pecíolo de buriti foi de 50 kg/h, valor dentro dos limites de operação de um gaseificador *downdraft* do tipo garganta (vide Figura 14). A Equação 1 (Coronado, 2006) apresenta o cálculo de obtenção da área da garganta, diretamente relacionada ao fluxo de biomassa.

$$\frac{\text{Biomassa (kg/h)}}{\text{Cap. Específica (kg/h.m}^2\text{)}} = \text{Área garganta (m}^2\text{)} \quad (1)$$

De acordo com o Grupo de Processos Termoquímicos (G.P.T) da Universidade de Zaragoza, na Espanha, a capacidade específica varia entre 1200 a 1300 kg/h.m². Devido às limitações de informações de capacidade específica da garganta de gaseificadores *downdraft* com utilização de peciolo-de-buriti, o presente trabalho adotará o valor intermediário de 1250 kg/h.m². Substituindo os valores na Equação 1, tem-se que a área de garganta é de 0,04 m², portanto o diâmetro da garganta será de 0,23 metros. Segundo Reed & Dass (1989) a razão entre o diâmetro da zona de pirólise para o da zona de garganta é de 2:1, dessa forma, obtém-se diâmetro do gaseificador de 0,46 metros. Para o cálculo da altura do gaseificador, a literatura recomenda uma relação de 2,5 vezes o diâmetro máximo do gaseificador, conseqüentemente, a altura recomendada do protótipo seria de 1,15 m. A Tabela 4 apresenta as principais dimensões do gaseificador *downdraft* tipo garganta.

Tabela 4. Dimensões Gaseificador.

Região	Dimensão (m)
Altura	1,15
Diâmetro Zona Pirólise	0,46
Diâmetro Zona Combustão	0,23

Fonte. Autoria Própria. Baseado em Coronado 2006.

5.1.4 Balanço de Massa

O gaseificador do tipo *downdraft* opera com duas correntes principais de entrada: a alimentação de biomassa e o ar comburente previamente aquecido.

As correntes de saída do sistema consistem nos gases de síntese resultantes do processo de gaseificação, além das cinzas e do resíduo carbonáceo (*char*), que são removidos por meio do sistema de descarte de resíduos sólidos. Para este estudo, considera-se uma taxa de alimentação de pecíolo de buriti igual a 50 kg/h.

5.1.4.1 Fluxo de Ar

Considerando um regime estacionário com fluxo contínuo de biomassa de 50 kg/h, o fornecimento de ar comburente, essencial para manutenção da gaseificação, foi dimensionado conforme dados teóricos correlacionados à razão ar/biomassa típica de gaseificadores *downdraft* (vide Figura 12), em que a razão varia de 1,25 e 2, para o projeto foi utilizado o limite inferior (1,25), o cálculo para obtenção do fluxo volumétrico está disposto na Equação 2 (Coronado, 2006).

$$Q_{ar} = 1,25 \cdot m_b = 62,50 \text{ Nm}^3/h \quad (2)$$

Convertendo o volume para massa utilizando a densidade do ar a 25 °C e 1 atm (1,184 kg/m³) (Moraes, 2012), apresentado pela Equação 3:

$$m_{ar} = 62,50 \cdot 1,184 = 73,80 \text{ kg/h} \quad (3)$$

5.1.4.2 Produção de *syngas*

O estudo de Henaó *et al* (2020), a produção volumétrica de *syngas* via gaseificação de biomassas apresenta razão próxima de 2:1 para a faixa de fluxo de entrada de biomassa escolhida, de acordo com a Equação 4 (Henaó *et al*, 2020):

$$Q_g = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Nm}^3/h \quad (4)$$

Para obtenção do fluxo mássico de gás de síntese gerado deve-se considerar a composição do qual, para obtenção da densidade do qual (geralmente na faixa de 1,0 a 1,4 kg/m³). Considerando os valores dispostos na Figura 12 da composição da base seca do *syngas* é possível estimar o valor próximo da densidade. Como este estudo tem caráter teórico, pequenas variações nos valores de densidade real não resultam em grande divergência

do esperado, portanto, para construção do protótipo, optou-se por utilizar os valores de composição, em base seca, dispostos na Figura 14. O cálculo de densidade teórica se encontra na Tabela 5.

Tabela 5. Densidade do gás produzido a 25 °C

Gás	Fração Molar	Densidade (kg/m³)	Contribuição na densidade (kg/m³)
H ₂	0,16	0,082	0,0132
CO	0,20	1,145	0,2290
CO ₂	0,12	1,799	0,2159
CH ₄	0,02	0,656	0,0131
N ₂	0,50	1,145	0,5726
Total	1,00	-	1,044

Fonte. Autoria Própria. Baseado em Basu (2010).

O valor obtido de 1,044 kg/m³ além de estar dentro dos limites estabelecidos é próximo de demais valores de *syngas* de biomassa já dispostos na literatura, como Coronado (2006).

Portanto, para obter o fluxo mássico de *syngas*, segue-se a Equação 5 (Coronado, 2006):

$$m_g = 100 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,044 \text{ kg/m}^3 = 104,40 \text{ kg/h} \quad (5)$$

5.1.4.3 Subprodutos (alcatrão e cinzas):

A corrente gasosa gerada no processo de gaseificação promove o arraste de partículas sólidas, incluindo cinzas e carbono residual, que são removidos por meio da grelha do gaseificador. De acordo com o estudo experimental de Coronado (2006), estima-se que a fração particulada atinja concentrações da ordem de 6 g/Nm³ de gás, valor que pode variar conforme os

ciclos operacionais da grelha e as condições de fluxo. Adicionalmente, a formação de alcatrão no gás de saída pode variar, em cenários mais críticos, entre 1 a 3 g/Nm³, dependendo das condições termodinâmicas e da composição da biomassa. Quanto à produção de resíduos sólidos (cinzas e *char*), projeta-se uma taxa de geração entre 1,5 a 2,0 kg/h. Por fim, resíduos adicionais incluem os condensados de alcatrões, bem como possíveis perdas associadas a fugas no reator, os quais variam de acordo com a biomassa e devem ser obtidos previamente à construção do gaseificador, em um ensaio de bancada.

5.1.5 Balanço de Energia

O balanço de energia do gaseificador será conduzido com base no princípio da conservação de energia, assumindo que a energia que entra no sistema é igual à energia que sai, em regime estacionário. Para essa finalidade, adota-se a entalpia como a propriedade termodinâmica representativa da energia térmica por unidade de massa, sendo aplicada ao ar de entrada, ao gás de síntese gerado e às cinzas residuais. Dessa forma, a equação geral do balanço energético para o gaseificador pode ser expressa pela Equação 6:

$$m_b \cdot h_b + m_{ar} \cdot h_{ar} = m_g \cdot h_g + m_c \cdot h_c + Qm \quad (6) \text{ Em}$$

que,

m_b é o fluxo de entrada de biomassa em kg/h;

m_{ar} é o fluxo de entrada de ar em kg/h;

m_g é o fluxo de syngas produzido em kg/h;

m_c é o fluxo de cinzas produzido em kg/h;

h_b entalpia da biomassa (kJ/kg);

h_{ar} entalpia do ar (kJ/kg);

h_g entalpia do syngas (kJ/kg);

h_c entalpia das cinzas (kJ/kg);

Q_m perdas para o ambiente.

5.1.5.1 Entalpia da Biomassa:

A priori, foi determinado a entalpia específica da biomassa úmida, calculada como média ponderada das entalpias da biomassa seca e da água contida. A qual é apresentada na Equação 7 (Coronado, 2006).

$$h_{biomassa} = (1 - umidade) \cdot h_{seca} + umidade \cdot h_{\acute{a}gua} \quad (7)$$

Em que:

$h_{biomassa}$ é a entalpia da biomassa - pecíolo de buriti;

h_{seca} é a entalpia da base seca da biomassa kJ/kg;

$h_{\acute{a}gua}$ é a entalpia da água kJ/kg

e o teor de umidade assume valor de 22% (vide Tabela 3).

Substituindo os valores dispostos na literatura (Coronado, 2006), tem-se:

$$h_{biomassa} = (1 - 0,22) \cdot (-6959,59) + 0,22 \cdot (-15879,4)$$

$$h_{biomassa} = -8921,95 \text{ kJ/kg}$$

O valor obtido faz sentido quando comparado a outras biomassas de frutos e oleaginosas, principalmente quando se considera a umidade das quais.

5.1.5.2 Entalpia do Syngas:

Para o gás de síntese produzido, a entalpia resulta do efeito dos vários gases que o compõem (composição do gás em base úmida), disposta na Equação 8:

$$h_g = CCO_2 \cdot h_{CO_2} + CCH_4 \cdot h_{CH_4} + CO_2 \cdot h_{O_2} + CCO \cdot h_{CO} + CH_2O \cdot h_{H_2O} \quad (8)$$

Devido à falta de informações da composição específica do syngas obtido através da gaseificação do pecíolo de buriti, adotou-se o valor da literatura de -3183,04 kJ/kg (Da Silva Mota, 2015).

5.1.5.3 Entalpia do Ar e Cinzas:

A entalpia do ar na entrada foi adotada como 225,7 kJ/kg, conforme padrão termodinâmico (Atkins, 2008). Para o cálculo da entalpia das cinzas, foi utilizado o calor específico do carbono (0,710 kJ/kg°C) e a diferença de temperatura entre a entrada e a temperatura de saída (aproximadamente 600 °C), seguindo a Equação 9 (Atkins, 2008):

$$h_{cinzas} = c_{cinzas} \cdot \Delta T = 0,710 \cdot 600 = 426 \text{ kJ/kg} \quad (9)$$

5.1.5.4 Cálculo Perda de Energia (Q_m)

Através do Balanço Global de Energia, Equação 5, e os valores obtidos de entalpia e fluxo mássico, obtém-se o valor de perda de energia na forma de dissipação de calor inerentes ao sistema (Basu, 2013), apresentado na Equação 10:

$$50 \cdot (-8921,95) + 73,80 \cdot 225,70 = 104,40 \cdot (-3183,40) + 2 \cdot 426 + Q_m$$

$$Q_m = -97945,88 \text{ kJ/h}$$

Convertendo para kW:

$$Q_m = \frac{-97945,88}{3600} = -27,21 \text{ kW} \quad (10)$$

O sinal negativo indica a perda de energia para o ambiente.

5.1.6 Eficiência do gaseificador

A eficiência térmica do gaseificador foi determinada através do próprio balanço de energia, por meio da razão entre a potência térmica do gás produzido e a potência térmica da biomassa de entrada, expressa na Equação 11:

$$\eta = \frac{(m_g \cdot h_g) + (m_c \cdot h_c)}{(m_b \cdot h_b) + (m_{ar} \cdot h_{ar})} \quad (11)$$

Obtendo uma eficiência do gaseificador de 77,20%, contudo em aplicações térmicas da gaseificação, nas quais o gás de síntese é utilizado diretamente na

queima em fornos ou caldeiras, é mais apropriado empregar o conceito de eficiência a quente, uma vez que se considera o aproveitamento da energia térmica contida nos gases ainda aquecidos. Por outro lado, em aplicações voltadas à geração de potência, como motores de combustão interna ou turbinas a gás, em que o gás é resfriado durante as etapas de condicionamento (remoção de partículas e alcatrões), torna-se pertinente utilizar o parâmetro de eficiência a frio, pois este reflete com maior precisão a energia efetivamente disponível após o pré-tratamento do gás. As quais estão dispostas nas Equações 12 e 13, respectivamente (Coronado, 2006).

$$\text{Eficiência a Quente} = \frac{Y \cdot PCI_g}{PCI_{biomassa}} \quad (12)$$

$$\text{Eficiência a Frio} = \frac{Y \cdot h_g}{h_b} \quad (13)$$

Em que,

Y é a razão de gás produzido por kg de biomassa;

PCI_g é o poder calorífico inferior do gás de saída (kJ/Nm³);

PCI biomassa é o poder calorífico inferior da biomassa (kJ/kg);

h_g Entalpia do gás de síntese (kJ/kg);

h_b Entalpia da biomassa (kJ/kg)

5.1.6.1 Cálculo PCI da Biomassa

O poder calorífico inferior (PCI) constitui uma variável crítica para avaliação do potencial energético da biomassa, especialmente porque desconsidera a energia latente da vaporização da água gerada na combustão, refletindo a energia efetivamente disponível para o processo (Nelson, 2017). Dessa forma, é necessário ajustar os valores de PCS (poder calorífico superior), de acordo com Özyuguran *et al* (2017), o PCI é obtido através Equação 14:

$$PCI = PCS - (m_{H_2} \cdot 9 \cdot 2,442) \quad (14)$$

onde m_{H_2} representa a fração mássica de hidrogênio na biomassa seca, multiplicada pelo fator de correção que considera a formação de vapor d'água e seu calor latente (Basu, 2013). Para o pecíolo de buriti, com m_{H_2} estimado em 5,9% na matéria seca (Souza *et al*, 2018), e ajustando para o teor de umidade de 22%, obtém-se a Equação 15:

$$m_{H_2} = 0,059 \cdot (1 - 0,22) = 0,046 \quad (15)$$

Substituindo em 14, tem-se a Equação 16:

$$PCI = 16,80 - (0,046 \cdot 9 \cdot 2,442) = 15,79 \text{ MJ/kg} \quad (16)$$

5.1.6.2 Cálculo do PCI do syngas

O Poder Calorífico Inferior de uma mistura gasosa, como o gás de síntese, é determinado por meio da soma ponderada dos poderes caloríficos inferiores (PCI) dos seus constituintes combustíveis. Essa ponderação é realizada com base nas frações molares de cada componente energético presente na mistura. Assim, apenas os gases combustíveis — como o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H₂) e o metano (CH₄) — contribuem para o valor total do PCI. Gases inertes ou não combustíveis, tais como o dióxido de carbono (CO₂) e o nitrogênio (N₂), não são considerados no cálculo, uma vez que não participam das reações exotérmicas de combustão e, portanto, não fornecem energia útil ao sistema (Nelson, 2017). A Tabela 6 apresenta os valores teóricos do PCI de cada gás presentes na composição do gás de síntese.

Tabela 6. PCI dos gases a 25 °C.

Gás	PCI (MJ/Nm ³)
H ₂	10,78
CO	12,63

Gás	PCI (MJ/Nm³)
CO ₂	35,85
CH ₄	0
N ₂	0

Fonte. Basu, 2010.

Através dos valores de fração molar e de PCI dispostos na Figura 12 e Tabela 6, respectivamente, calcula-se o PCI global do gás de síntese através da Equação 17 (Nogueira y Lora, 2004).

$$PCI_g = \sum(x_i \cdot PCI_i) \quad (17)$$

Em que,

x_i é a fração molar do componente combustível i

PCI_i é o poder calorífico inferior do componente i a 25 °C (kJ/m³ ou MJ/m³)

Então:

$$PCI_g = (0,16 \cdot 10,78) + (0,20 \cdot 12,63) + (0,02 \cdot 35,85) = 4,97 \text{ MJ/Nm}^3$$

Substituindo os valores obtidos nas Equações 12 e 13, tem-se as Equações 18 e 19:

$$Eficiência\ Quente = \frac{2 \cdot 4,97}{15,79} = 62,92\% \quad (18)$$

$$Eficiência\ Frio = \frac{2 \cdot (-3183,04)}{(-8921,95)} = 71,35\% \quad (19)$$

De acordo com Basu (2013), os valores de eficiência Quente e Frio estão bem estabelecidos na literatura, considerando sistemas de gaseificação de pequeno porte, espera-se valores dentro dos seguintes intervalos:

- Gaseificadores *updraft* de 50 a 65%
- Gaseificadores *downdraft* de 60 a 75%

Ou seja, os resultados obtidos através dos cálculos e considerações tomadas fazem sentido do ponto de vista qualitativo, mas é indispensável entender que

a eficiência a se considerar no sistema é a Eficiência Fria, que é o caso empregado em motores e turbinas.

5.1.7 Energia útil gerada pelo sistema Gaseificador - MCI

A energia útil disponível no gás de síntese gerado é dado pela Equação 20 (Coronado, 2006):

$$\overline{E}_g = \eta \cdot \overline{m}_b \cdot PCI \quad (20)$$

Em que,

\overline{E}_g é a Energia útil disponível

η é a eficiência a frio

\overline{m}_b fluxo mássico da biomassa em kg/s

PCI poder calorífico da biomassa

Então, formula-se a Equação 21

$$\overline{E}_g = 0,7135 \cdot \frac{50}{3600} \cdot 15,79 = 0,1565 \text{ MJ/s} = 156,5 \text{ kW} \quad (21)$$

A eficiência térmica do motor a combustão interna (MCI) usando gás de síntese é de 25%, valor típico para motores a gás pobres, conforme Basu, 2013. Com esse valor de eficiência, é possível calcular a potência mecânica gerada no motor a combustão interna, seguindo a Equação 22.

$$P_{\text{útil}} = \eta_{MCI} \cdot \overline{E}_g \quad (22)$$

$$P_{\text{útil}} = 0,25 \cdot 156,5 = 39,10 \text{ kW}$$

A potência útil final do motor à combustão interna é de 39,10 kW, ao acoplá-lo em um gerador elétrico (eficiência aproximada de 90%) a potência final obtida é de 35,19 kW.

De acordo com estudos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o consumo médio de energia nas residências brasileiras é de 152,2 kW/h por mês, variando de acordo com a região.

Assumindo que, na comunidade Brejo Dois Irmãos, o abastecimento de biomassa contínuo seria inviável devido às condições locais e operação 100% manual, adotou-se um fluxo de operação de 14 horas/dia (turno diurno das 8 às 18h e turno vespertino das 14 às 22h) por 22 dias úteis, dessa forma, tem-se total de 10.838,52 kWh/mês. A geração mensal de 10.838,52 kWh por meio do gaseificador downdraft utilizando pecíolos de buriti é suficiente para atender aproximadamente 71 residências, considerando um consumo médio de 152,2 kWh/mês por residência, valor compatível com a realidade de comunidades rurais no semiárido nordestino. A comunidade Brejo Dois Irmãos, situada no município de Pilão Arcado-BA, possui cerca de 60 a 70 famílias (Governo do Estado da Bahia, 2024), o que indica que a geração proposta é capaz de suprir integralmente a demanda residencial local, garantindo autonomia energética e promovendo melhoria na qualidade de vida, com acesso contínuo à iluminação, refrigeração, comunicação e outros usos básicos de energia elétrica.

5.1.8 Rede de distribuição

A energia elétrica gerada pelo gaseificador será distribuída por meio de uma microrrede local, composta por um sistema de cabos e postes de curta distância, conectando a unidade geradora às residências da comunidade. Esse tipo de sistema é tecnicamente viável em comunidades isoladas, reduzindo perdas por transmissão e aumentando a eficiência da distribuição. A instalação também poderá incluir controladores de carga, inversores e, eventualmente, um banco de baterias para armazenamento de energia, garantindo o fornecimento contínuo, especialmente nos momentos de pico ou durante paradas temporárias do sistema de gaseificação. Apesar de não fazer parte do escopo do dimensionamento deste trabalho, é indispensável propor formas de distribuição da energia elétrica gerada, a fim que ela chegue nas residências dos habitantes da comunidade de maneira contínua e de tal forma que não seja tão dependente do local de instalação do equipamento, o qual deve ser operado em área livre com acesso facilitado e disponibilidade de pecíolo de buriti.

5.1.9 Medidas de Segurança do Processo

A operação de gaseificadores de biomassa de pequena escala, especialmente os do tipo downdraft, requer a adoção de uma metodologia de segurança abrangente, considerando os riscos associados à produção e manuseio de gases inflamáveis e tóxicos. Dentre os principais perigos, destaca-se a geração de monóxido de carbono (CO), um gás incolor, inodoro e altamente tóxico, que pode ser letal mesmo em concentrações relativamente baixas, caso haja vazamento ou má vedação no sistema (Sigrist et al, 2017).

A metodologia de segurança deve começar no projeto e dimensionamento do equipamento, com atenção à estanqueidade do sistema, qualidade das vedações, uso de válvulas de alívio de pressão, filtros com câmaras de expansão e materiais resistentes ao calor e à corrosão. Durante a operação, recomenda-se o monitoramento contínuo da temperatura nos diferentes estágios do reator (secagem, pirólise, oxidação e redução), controle da pressão interna e avaliação da qualidade do gás produzido, com sensores específicos para CO e presença de partículas. O sistema também deve incluir protocolos operacionais padronizados (POP) que abordem a partida, operação contínua e desligamento seguro do gaseificador. Além disso, é fundamental a capacitação técnica da equipe local, com treinamentos periódicos voltados ao reconhecimento de situações de risco, resposta a emergências e uso correto de equipamentos de proteção individual (EPIs), como máscaras com filtros químicos, luvas térmicas e vestimentas resistentes ao calor.

No contexto de comunidades vulneráveis, como a de Brejo Dois Irmãos, medidas adicionais devem ser adotadas para mitigar o risco de intoxicação por monóxido de carbono, considerando a proximidade entre o sistema de geração e os espaços habitacionais, além de possíveis limitações de infraestrutura e acesso a recursos técnicos. Nesse sentido, recomenda-se a instalação do gaseificador em ambiente externo, ventilado e isolado das residências, com distanciamento mínimo de 10 metros. A adoção de exaustores ou chaminés direcionais também é indicada para garantir a dispersão dos gases residuais em altura segura. Complementarmente, é essencial a instalação de detectores de CO próximos ao equipamento e em áreas adjacentes, acompanhada da

distribuição de material informativo simples e visual sobre os riscos do gás, os sintomas de intoxicação e os procedimentos de evacuação. Por fim, destaca-se a importância do acompanhamento técnico por parte de instituições públicas, universidades ou empresas sociais parceiras, assegurando a manutenção periódica do sistema e a atualização das medidas de segurança conforme a evolução do projeto e da realidade local (Ribeiro, 2007)

5.1.10 Custos de instalação e financiamento do equipamento e rede de distribuição

Os dados na literatura sobre custos de instalação de gaseificadores do tipo *downdraft* de pequena escala são escassos e variados, principalmente de acordo com a capacidade de alimentação de biomassa. Entretanto, de acordo com Sales (2006), o custo total para instalação de um sistema de gaseificação *downdraft* com geração de energia via MCI (motor à combustão interna) de potência de 50 kW varia de R\$145.000,00 a R\$160.000,00. Esses valores já consideram todos os custos de instalação, contudo descartam os custos de manutenção do equipamento, os quais, segundo o Grupo de Processos Termoquímicos (G.P.T) da Universidade de Zaragoza, têm valores de 3% do investimento inicial por ano, ou seja de R\$4.350 a R\$4.800,00. Ademais, deve-se considerar os custos da rede de distribuição de energia elétrica, a qual depende da região e distância do equipamento.

Seria praticamente utópico considerar que essas comunidades, já marginalizadas e esquecidas, recebam auxílio governamental ou de ONGs para custear a instalação, treinamento operacional, os equipamentos e a rede de distribuição. Dessa forma, é necessário considerar o capital privado, o qual viria de *merchandising* e estratégias empresariais de serem mais sustentáveis aos olhos do público. Embora a região de Pilão Arcado, onde está localizada a comunidade Brejo Dois Irmãos, seja área rural relativamente isolada do semiárido baiano, com baixa presença de grandes empresas industriais no entorno imediato, existem algumas possibilidades de apoio financeiro ou parceria para implantação de um gaseificador de biomassa com foco no aproveitamento do pecíolo de buriti, Neoenergia Coelba, uma distribuidora de energia na Bahia, possui programas de incentivo à energia limpa (Neoenergia

Coelba, 2025) e pode se interessar por tecnologias de bioenergia em comunidades isoladas em conjunto com o próprio Projeto Pró-Semiárido do CAR que já atua na comunidade.

5.2 Gaseificação e contexto socioeconômico e energético

A utilização de gaseificadores de biomassa como fonte energética é uma abordagem promissora para promover a inclusão social e a sustentabilidade em comunidades vulneráveis. Essas tecnologias oferecem não apenas uma alternativa viável ao uso de combustíveis fósseis, mas também uma oportunidade para transformar resíduos orgânicos em recursos valiosos, como energia elétrica e térmica. Além disso, os benefícios sociais, econômicos e ambientais decorrentes da implantação de gaseificadores em pequena escala são significativos, especialmente em regiões remotas com acesso limitado à energia.

A gaseificação de biomassa é um processo termoquímico eficiente, capaz de converter resíduos orgânicos em gás combustível (*syngas*). Estudos demonstram que essa tecnologia pode ser adaptada para pequenas escalas, atendendo às necessidades energéticas locais sem depender de complexa infraestrutura (González e Sandoval, 2020). A viabilidade teórica dessa solução é reforçada por sua versatilidade, que permite o uso de diferentes tipos de biomassa, incluindo resíduos agrícolas, florestais e industriais.

Segundo Moraes *et al.* (2020), a análise de viabilidade econômica de tecnologias energéticas em comunidades vulneráveis destaca a importância de sistemas descentralizados, como os gaseificadores, que apresentam baixos custos operacionais e alta eficiência energética. Além disso, sua operação pode ser simplificada, facilitando a implementação em regiões com recursos técnicos e financeiros limitados.

A implementação de gaseificadores em comunidades vulneráveis tem potencial para gerar benefícios econômicos significativos. Primeiramente, o aproveitamento de resíduos locais como insumo reduz a dependência de fontes de energia externas e diminui os custos de transporte e aquisição de combustíveis (Ramos e Rouboua, 2022). Além disso, o *syngas* produzido pode ser utilizado diretamente para geração de eletricidade, aquecimento ou até

mesmo na síntese de combustíveis líquidos, ampliando sua aplicabilidade e valor agregado.

O desenvolvimento de projetos de gaseificação também pode impulsionar a economia local, criando oportunidades de emprego e promovendo a inclusão social. Atividades como a coleta e o processamento da biomassa, a operação e a manutenção dos equipamentos e a gestão dos resíduos oferecem novas possibilidades de geração de renda para as comunidades (Benvindo, 2024).

Os benefícios ambientais da gaseificação de biomassa são amplamente reconhecidos, especialmente no contexto de comunidades vulneráveis. O processo permite a redução significativa das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, ao utilizar resíduos orgânicos como insumo, a gaseificação evita o descarte inadequado de materiais que poderiam causar impactos negativos no meio ambiente, como a poluição de solo e água (Ramos e Rouboua, 2022).

A tecnologia também oferece vantagens em termos de eficiência no uso de recursos naturais. Por exemplo, o syngas produzido possui alto poder calorífico e pode ser utilizado de maneira flexível, atendendo a diversas demandas energéticas. Estudos como o de Striugas *et al.* (2023) demonstram que até mesmo resíduos não convencionais, como máscaras descartáveis, podem ser convertidos em syngas rico em hidrogênio por meio da gaseificação, destacando o potencial inovador dessa tecnologia.

A implantação de gaseificadores em comunidades vulneráveis têm o potencial de promover transformações sociais significativas. O acesso à energia elétrica é um catalisador para o desenvolvimento humano, viabilizando melhorias em áreas como saúde, educação e comunicação. Em particular, a eletrificação de escolas e postos de saúde em regiões remotas pode melhorar significativamente a qualidade de vida e as perspectivas de desenvolvimento das populações locais (Moraes *et al.*, 2020).

Além disso, a gaseificação de biomassa promove a inclusão social ao integrar os moradores das comunidades em todas as etapas do processo, desde o planejamento até a operação dos sistemas. Isso fortalece o senso de pertencimento e cria oportunidades para o empoderamento das populações

locais, especialmente de mulheres e jovens, que muitas vezes enfrentam barreiras adicionais ao acesso ao trabalho e à educação (Benvindo, 2024).

A gaseificação de biomassa é uma tecnologia flexível, que pode ser adaptada para atender a diferentes demandas energéticas. Em comunidades vulneráveis, os gaseificadores podem ser utilizados para a geração de eletricidade, aquecimento de residências e até mesmo para o processamento de alimentos. Além disso, o *syngas* produzido pode ser utilizado como insumo em sistemas mais avançados, como motores de combustão interna e turbinas a gás, ampliando ainda mais sua aplicabilidade (González e Sandoval, 2020).

Um aspecto importante é a possibilidade de integrar os gaseificadores a outros sistemas energéticos, como solar ou eólicas, criando sistemas híbridos que maximizam a eficiência e a resiliência energética das comunidades. Essa abordagem também contribui para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de uma única fonte de energia e aumentando a segurança energética (Ramos e Rouboua, 2022).

Embora os benefícios dos gaseificadores sejam evidentes, sua implementação em comunidades vulneráveis enfrenta desafios significativos. A falta de infraestrutura e de conhecimento técnico são barreiras comuns, especialmente em regiões remotas com acesso limitado a recursos financeiros e educacionais. Além disso, a variabilidade na qualidade da biomassa disponível pode impactar o desempenho dos sistemas, exigindo ajustes contínuos e monitoramento (González e Sandoval, 2020).

Outro desafio é a necessidade de políticas públicas e incentivos financeiros para viabilizar a adoção em larga escala da tecnologia. O desenvolvimento de programas de capacitação e o fornecimento de subsídios para a aquisição de equipamentos são estratégias que podem ajudar a superar essas barreiras e garantir o sucesso dos projetos (Benvindo, 2024).

A viabilidade teórica e os benefícios da gaseificação de biomassa como solução energética para comunidades vulneráveis são evidentes, especialmente em regiões onde o acesso à energia é limitado e os impactos sociais e ambientais são significativos. Essa tecnologia oferece uma alternativa sustentável e acessível, que pode transformar resíduos orgânicos em recursos valiosos, promovendo a inclusão social, a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento econômico.

No entanto, para que seu potencial seja plenamente aproveitado, é essencial superar desafios como a falta de infraestrutura e a necessidade de políticas públicas de incentivo. A integração das comunidades no desenvolvimento e na operação dos projetos é fundamental para garantir sua aceitação e sucesso. Assim, os gaseificadores de biomassa não são apenas uma solução técnica, mas também uma ferramenta poderosa para a transformação social e ambiental, contribuindo para um futuro mais justo e sustentável.

5.3 Contribuições da Engenharia Química para a sustentabilidade energética

Souza, 2020 as também possibilita a criação de tecnologias acessíveis e escaláveis, com benefícios ambientais, sociais e econômicos (Pessoa e Boni, 2024).

A transição energética, entendida como a substituição de fontes de energia fósseis por renováveis, é um dos maiores desafios enfrentados pelo mundo contemporâneo. Essa mudança é essencial para a mitigação das mudanças climáticas e a garantia de segurança energética. Segundo Fonseca *et al.* (2022), a transição energética é um processo complexo que envolve inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e a conscientização da sociedade. Nesse contexto, a engenharia química contribui com o desenvolvimento de tecnologias limpas, como processos de gaseificação, produção de biocombustíveis e captura de carbono.

A engenharia química tem sido protagonista no desenvolvimento de tecnologias limpas que minimizam impactos ambientais e otimizam o uso de recursos. Um exemplo é a utilização da catálise para aumentar a eficiência de reações químicas e reduzir a emissão de poluentes. Meneghetti *et al.* (2022) destacam que a catálise desempenha um papel fundamental na sustentabilidade energética, seja na produção de combustíveis renováveis, como o biodiesel, ou na conversão de resíduos em energia. Essa abordagem é especialmente relevante no contexto brasileiro, onde há uma abundância de biomassa e resíduos que podem ser aproveitados para a produção de energia limpa.

A formação de engenheiros químicos capacitados é um fator determinante para o avanço da sustentabilidade energética. Bueno *et al.* (2022) destacam a importância de metodologias ativas de ensino, como aulas práticas e estudos de caso, na formação de profissionais preparados para enfrentar os desafios da transição energética. A educação em engenharia química deve estar alinhada às demandas do mercado e às necessidades sociais, integrando conhecimentos técnicos com uma visão crítica e interdisciplinar.

A conexão entre a academia e a indústria também desempenha um papel central na inovação em engenharia química. Pessoa e Boni (2024) ressaltam que a transferência de conhecimento acadêmico para aplicações industriais é fundamental para acelerar a adoção de tecnologias limpas. Iniciativas de colaboração entre universidades, empresas e governos são essenciais para a implementação de projetos sustentáveis e para o fortalecimento da cadeia produtiva de energias renováveis.

A sustentabilidade na engenharia química vai além do desenvolvimento tecnológico, abrangendo também aspectos sociais e econômicos. Segundo Fonseca *et al.* (2022), a transição energética deve ser inclusiva, promovendo benefícios para todas as camadas da sociedade e respeitando as particularidades de cada região. No Brasil, a engenharia química tem potencial para liderar iniciativas que combinem inovação tecnológica com soluções adaptadas às demandas locais, como o aproveitamento de biomassa e a geração de energia limpa.

Além disso, a engenharia química pode contribuir para a economia circular, desenvolvendo processos que utilizem resíduos e minimizem a geração de desperdícios. A integração da sustentabilidade com a engenharia química envolve uma abordagem sistêmica, que considera o ciclo de vida completo dos produtos e processos, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (Meneghetti *et al.*, 2022).

Embora a engenharia química tenha alcançado avanços significativos na promoção da sustentabilidade energética, ainda há desafios a serem superados. Um dos principais entraves é o alto custo inicial de tecnologias limpas. Outro desafio é a necessidade de políticas públicas que incentivem a adoção de soluções inovadoras e sustentáveis, criando um ambiente favorável para investimentos e desenvolvimento tecnológico (Fonseca *et al.*, 2022).

Por outro lado, as oportunidades para a engenharia química no Brasil são vastas. A abundância de recursos naturais, como a biomassa, e o crescente interesse em tecnologias de baixo carbono colocam o país em uma posição estratégica para liderar a transição energética na América Latina. Em geral, a gaseificação de biomassa é uma tecnologia promissora para a geração sustentável de energia, oferecendo uma solução prática e acessível para regiões de difícil acesso e com baixa infraestrutura energética. A versatilidade do processo, associada à abundância de biomassa no Brasil, destaca seu potencial para promover a inclusão energética e a sustentabilidade ambiental. No entanto, a superação dos desafios técnicos e operacionais, aliada ao desenvolvimento de políticas públicas e à capacitação das comunidades, será fundamental para garantir a disseminação e o sucesso dessa tecnologia no contexto brasileiro. Como demonstrado por Barros *et al.* (2022), a gaseificação é mais do que uma solução energética; é uma oportunidade de transformar resíduos em recursos e de promover a sustentabilidade no coração das comunidades.

Por fim, a formação de profissionais capacitados e a integração entre academia e indústria são fundamentais para acelerar a adoção de tecnologias limpas e fortalecer a competitividade do Brasil no cenário internacional. A engenharia química, ao combinar ciência, inovação e compromisso social, é uma força transformadora para o avanço da sustentabilidade e a construção de um futuro energético mais justo e sustentável.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de protótipo de gaseificador do tipo *downdraft* para geração descentralizada de energia elétrica a partir de biomassa, com ênfase na aplicação em comunidades vulneráveis, como a comunidade Brejo Dois Irmãos - BA. A pesquisa, de natureza científica aplicada, baseou-se em uma revisão sistemática da literatura técnico-científica, o que possibilitou a definição de parâmetros construtivos e operacionais compatíveis com a realidade socioeconômica e energética de populações com acesso limitado à infraestrutura convencional. O protótipo proposto possui altura de 1,15 m, diâmetro máximo de 0,46 m e eficiência térmica a frio

estimada em 71,35%, com capacidade teórica de geração de 39,10 kW de energia elétrica. Tais valores indicam um desempenho técnico viável, alinhado com referências consolidadas na literatura e adequado para atender demandas energéticas típicas de pequenas comunidades.

A viabilização econômica da implantação do sistema em escala real depende de estudos complementares mais abrangentes, que envolvam a modelagem de custos, análise do ciclo de vida, avaliação da cadeia logística da biomassa e considerações sobre manutenção e operação em condições adversas. A sustentabilidade financeira do projeto está fortemente condicionada à articulação com o setor privado, sendo imprescindível a criação de mecanismos de incentivo fiscal, programas de financiamento orientado e estratégias de engajamento via *merchandising* social para atrair investimentos e ampliar o impacto socioambiental da iniciativa.

Dessa forma, conclui-se que, embora a proposta técnica apresenta resultados promissores em termos de desempenho energético e aplicabilidade social, sua implementação em contextos reais requer abordagens interdisciplinares, integração institucional e suporte econômico continuado, elementos essenciais para consolidar o uso de tecnologias de conversão termoquímica da biomassa como solução viável para a transição energética em regiões vulneráveis.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, surgiram limitações do ponto de vista da escassez de dados sobre a biomassa e gás de síntese geradas pela, além de conhecimento sobre a comunidade-alvo. Diante disso, há possibilidades de aprofundamento e aprimoramento técnico social para o projeto, resultando em maior impacto positivo, cumprindo ainda mais com o objetivo principal. Uma das principais frentes recomendadas para estudos futuros é um estudo de bancada da biomassa e caracterização do *syngas* obtido, seguida da construção efetiva do protótipo físico, de forma a validar experimentalmente os dados obtidos por meio da modelagem teórica. Essa

etapa permitiria a avaliação prática da eficiência do sistema, da qualidade do gás gerado e da segurança operacional, especialmente no que diz respeito à exposição ao monóxido de carbono.

Além disso, o estudo de um sistema de armazenamento de energia acoplado ao gaseificador, como bancos de bateria ou sistemas híbridos com painéis solares, permitiria maior autonomia energética e estabilidade no fornecimento da rede elétrica. Do ponto de vista social, sugere-se a implementação de programas educativos e oficinas comunitárias voltadas à capacitação técnica e ao fortalecimento da autonomia local, visando à gestão comunitária do sistema energético. Outras possibilidades incluem a integração do projeto com políticas públicas de acesso à energia e de incentivo a tecnologias sustentáveis em áreas rurais e isoladas. Por fim, recomenda-se o acompanhamento longitudinal dos impactos sociais, ambientais e econômicos da implantação do sistema, de forma a orientar a replicabilidade do modelo em outras comunidades em situação de vulnerabilidade, deixando de ser um caso pontual e voltado a atender outros conjuntos habitacionais que também se enquadram na mesma situação de vulnerabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, André; PAIVA, Julio; SALCEDO, Romualdo. Cyclone optimization including particle clustering. **Powder Technology**, v. 272, p. 14-22, 2015.

ANDRADE, Rubenildo Vieira. Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental. **Gaseificação De Biomassa**, 2007.

ANUKAM, A.; MAMPHWELI, S.; REDDY, P.; MEYER, E.; OKOH, O. Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 775-801, 2016.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review. **Waste Management**, v. 32, n. 4, p. 625-639, 2012.

ARRABAL, A. K.; FLORES, U. M.; SERRATINE, D. T. Sustentabilidade energética e produção de criptomoedas. **Revista de Ciências Jurídicas e Sociais da UNIPAR**, v. 27, n. 2, p. 385-408, 2024. Disponível em: <https://unipar.openjournalsolutions.com.br/index.php/juridica/article/download/11455/5380>. Acesso em: 23 jan. 2025.

ATKINS, P.; PAULA, J. de. Físico-química. 8. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008, 2v

BARROS, T. V. *et al.* Gaseificação da biomassa em água supercrítica como tecnologia de produção de hidrogênio. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e32511931296-e32511931296, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/31296/27181>. Acesso em: 25 jan. 2025.

BASU, Prabir. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. Academic press, 2010. Acesso em: 22 de mai. 2025.

BATES, R. P.; DÖLLE, K.; RAVI, K. Syngas use in internal combustion engines-a review. *Adv Res* 10: 1–8 [em linha]. 2017. Acesso em: 15 mai. 2025

BENVINDO, J. D. S. **Competitividade do Brasil na transição energética global com a implantação do HUB de hidrogênio verde do Ceará**: um estudo à luz da teoria da hélice quádrupla. 2024. Dissertação (Mestrado em Administração e Controladoria) – Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76871>. Acesso em: 18 jan. 2025.

BRIONES-HIDROVO, A. *et al.* Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125680, 2021.

BUENO, G. *et al.* O ensino e aprendizagem por meio de aulas práticas no curso de engenharia de energia. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 6, n. 1, 2022. Disponível em:

<https://trilhasdahistoria.ufms.br/index.php/EIAGEDIN/article/download/17285/11685>. Acesso em: 18 fev. 2025.

CARMONA, I. N. *et al.* Quantificação de tanino e caracterização química-energética de resíduos de biomassa de frutos de *Bertholletia* spp. e *Lecythis* spp. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e13070, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1370>. Acesso em: 25 jan. 2025.

CARVALHO, K. M. *et al.* Segurança hídrica, riscos e conflitos na instalação de usinas hidrelétricas: a experiência de comunidades vulneráveis na Amazônia. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 92084-92102, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/20488/16378>. Acesso em: 18 jan. 2025.

CAVALCANTI, M. B.; MELO, D. C. P. Vulnerabilidade socioambiental em comunidade ribeirinha: a experiência da Ilha de Deus, Recife/PE. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 595-614, 2021. Disponível em: <http://www.sustenere.inf.br/index.php/rica/article/download/CBPC2179-6858.2021.001.0048/2485>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CHAVES, L. I. *et al.* Small-scale power generation analysis: Downdraft gasifier coupled to engine generator set. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 491-498, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.033>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CORDEIRO, K. X. **Análise da viabilidade de sistema de gaseificação a bagaço de cana para produção de energia elétrica em estabelecimento comercial**. 2018.

CORONADO, Christian Rodriguez; SILVEIRA, José Luz; ARAUZO, Jesus Perez. Metodologia de dimensionamento, análise energética e seleção de equipamentos de um gaseificador de biomassa para o acionamento de um motor de combustão interna. **Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2006.

DA SILVA, Antonio Jorge Barbosa. Característica de alguns frutos das palmeiras nativas da Amazônia Brasileira. **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia–Volume 3**, p. 18, 2019.

DA SILVA MOTA, F. D. A. *et al.* Pirólise da biomassa lignocelulósica: Uma revisão pyrolysis of lignocellulose biomass: A review. **Rev. GEINTEC**, v. 5, p. 2511-2525, 2015.

DE OLIVEIRA, Elenilda Farias de *et al.* Promovendo saúde em comunidades vulneráveis: tecnologias sociais na redução da pobreza e desenvolvimento sustentável. **Revista gaúcha de enfermagem**, v. 36, n. spe, p. 200-206, 2015.

DOGRU, M.; ERDEM, A. Process intensification and miniaturization in gasification technology: Downdraft gasification of sugarcane bagasse. **Energy & Fuels**, v. 33, n. 1, p. 340-347, 2018.

Fanslau, Pedro Henrique. Pirólise como rota tecnológica para aproveitamento energético de biomassas: preparo, produção e caracterização de bioóleo de babaçu (*Orbignya phalerata* Martius). 37 f. Monografia (Graduação). Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2021. Acesso em: 13 de mai. 2025.

FELIX, G. J. *et al.* Reatores de leito fixo concorrente e fluidizado borbulhante na gaseificação da biomassa quando utilizados para geração de energia elétrica. **Revista Processos Químicos**, v. 15, n. 29, 2021. Disponível em: http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/download/623/547. Acesso em: 23 jan. 2025.

FERRERO, G. L.; MANIATIS, K.; BUEKENS, A.; BRIDGWATER, V. Pyrolyse and gasification. In: International Conference Held, 1998, Luxembourg. Proceedings...Luxemburgo: 23-25 mai. 1989.

FONSECA, H. A. B. *et al.* Transição energética: desafios e oportunidades. **ComCiência Revista Eletrônica de Jornalismo Científico**, v. 238, 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7695030/mod_resource/content/1/Fonseca%20et%20al%20%282022%29.pdf. Acesso em: 23 jan. 2025.

FRANCO, A. C. *et al.* Energia limpa e acessível. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 4, n. 1, 2020. Disponível em: <https://trilhasdahistoria.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/download/11428/8147/>. Acesso em: 23 jan. 2025.

GRIGOL, N. S. *et al.* Produção para autoconsumo e segurança alimentar entre assentados rurais do Alto Xingu, Mato Grosso, Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 2, p. e233195, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/mDsMGgfmRBgKftrVh8mXS5x/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 jan. 2025.

GUEDES, F. L. *et al.* **Sustentabilidade energética da indústria de cimento: Rota do combustível derivado de resíduo produzido em Pernambuco.** In: IBEAS-XI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Vitória/ES, 2020. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2020/III-018.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

GUERREIRO, R. P. *et al.* Análise de matriz multicritérios para escolha de sistema energético sustentável para embarcações regionais. **Revista Valore**, v. 7, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/download/1077/833>. Acesso em: 23 jan. 2025.

GROENVELT, M.J. & VAN SWAAIJ, W.P.M. “**The design of current moving bed gasifiers fuelled by biomass**”, In Thermal Conversion of Solid Wastes and Biomass, ed, J. L. Jones & S. B. Radding. American Chemical Society, Washington, DC, USA.. 1980. Acesso em: 12 mai. 2025.

G.P.T. Grupo de Procesos Termoquímicos, Facultad de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Zaragoza – UNIZAR – España. Abril, 2005. Acesso em: 12 mai. 2025.

HASLER, P.; NUSSBAUMER, Th. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. *Biomass and Bioenergy*. v. 16, p. 385 – 395, 1999. Acesso 25 de abr. 2025.

HENAO, Nelson Caldéron. Avaliação técnico-econômica de alternativas de acoplamento de microturbinas a gás e gaseificadores de biomassa. 2020. Acesso em 22 de mai. 2025.

JEAN, Wesly et al. Estudo sobre pobreza energética e segurança energética no seminário brasileiro: vulnerabilidade e resiliência socioambiental. 2024. Acesso 13 de mai. 2025

JÚNIOR, C. M. V. *et al.* Produção e análise do syngas a partir do sabugo de milho. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 33116-33123, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/10963/9175>. Acesso em: 23 jan. 2025.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. Eliecer Fonseca; BEZZON, Guilherme. Pirólise e torrefação de biomassa. **CORTEZ, LAB; GÓMEZ, EO; LORA, EES Biomassa para energia. Campinas: Ed. Unicamp. Cap**, v. 5, p. 333-351, 2008.25 jan. 2025. Acesso em: 22 abr. 2025.

MENEGHETTI, S. P.; MENEGHETTI, M. R.; SUAREZ, P. A. Z. Contribuições da catálise na busca pela sustentabilidade. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, 2022. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/download/4430/953>.

MONDAL, Prasenjit; DANG, G. S.; GARG, M. O. Syngas production through gasification and cleanup for downstream applications—Recent developments. **Fuel processing technology**, v. 92, n. 8, p. 1395-1410, 2011. Acesso em: 15 de mai. 2025.

MORAES, M. B. F.; DE ABREU, Y. V. **Viabilidade econômica para produção de energia elétrica por biodigestores utilizando resíduos pecuários**. Life Editora, 2020. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=u7oAEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT51&dq=Viabilidade+Te%C3%B3rica+e+Benef%C3%ADcios+do+Gaseificador+para+Comunidades+Vulner%C3%A1veis&ots=RyCpc2CbGj&sig=72L2OE_iJei6ZQRTxtucV9Q4Xy8. Acesso em: 25 jan. 2025.

MOURA, M. E. L. de, Jesus, A. M. de, Reis, A. K. C. dos, Castilho, D. F., Guimaraes, E. C., & Oliveira, G. C. de. (2025). Análise geral dos desafios na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica na Amazônia Legal: aspectos técnicos, econômicos, sociais e de planejamento estratégico. *Caderno Pedagógico*, 22(1), e13759. Acesso em: 18 de abr. 2025

NAGAISHI, T. Y. R. *et al.* Potencial e características energéticas da biomassa de capoeira triturada na Amazônia Oriental. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 65509-65529, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/16181/13247>. Acesso em: 18 jan. 2025.

NARVÁEZ, I.; ORIO, A.; AZNAR, M. P.; CORELLA, J. Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas. *Industrial & Engineering Chemistry Research.*, v. 35, p. 2110-2120, 1996. Acesso em: 25 de abr. 2025.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do; SOUSA, Flávio Luís Leite. Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática—como elaborar TCC. **Brasília: Thesaurus**, 2016.

NELSON, Vaughn C.; STARCHER, Kenneth L. **Introduction to bioenergy**. CRC Press, 2017.

NJENGA, M. *et al.* Gasifier as a cleaner cooking system in rural Kenya. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 208-217, 2016.

NOGUEIRA, L.A.H., LORA, E.E.S., “Dendroenergia: Fundamentos e aplicações”. 2.ed. - Rio de Janeiro: Interciência, 2004. Acesso em: 28 de mai. 2025.

OLIVEIRA, Henrique Belchior de. Análise imediata e avaliação do poder calorím. 2018. 35 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

OLIVEIRA, G. *et al.* O que significa descarbonizar? Uma visão da sociedade atual sem energia fóssil. **Sustentabilidade e Descarbonização: Desafios Práticos**, p. 9-27, 2020. Disponível em: https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/8951/1/Oliveiraetal_2020.pdf. Acesso em: 25 jan. 2025.

OLIVEIRA, J. A. B. Alteridade sustentável e a transição energética regenerativa. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 2, n. 3, p. 65-65, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.51189/rema/1746>. Acesso em: 25 jan. 2025.

OSOEGAWA, D. K.; CHAVES, M. P. S. R. Inovações e tecnologias sociais: bases conceituais e princípios epistemológicos para a sustentabilidade e bem-viver. **Revista Videre**, v. 16, n. 34, p. 53-79, 2024. Disponível em:

<https://ojs.ufgd.edu.br/videre/article/download/17352/10186>. Acesso em: 18 jan. 2025.

ÖZYUĞURAN, Ayşe; YAMAN, Serdar. Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. **Energy Procedia**, v. 107, p. 130-136, 2017.

PAIVA, M. *et al.* Simulation of a downdraft gasifier for production of syngas from different biomass feedstocks. **ChemEngineering**, v. 5, n. 2, p. 20, 2021.

PESSOA, F. L. P.; BONI, L. A. B. Da academia à indústria: uma trajetória de inovação em engenharia química-entrevista com o professor Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. **Periódico Tchê Química**, v. 21, n. 48, 2024. Disponível em: https://www.tchequimica.com/arquivos_jornal/2024/48/08_PELLEGRINI_pgs_1_09_115.pdf. Acesso em: 18 jan. 2025.

RAMOS, A.; ROUBOA, A. Life cycle thinking of plasma gasification as a waste-to-energy tool: Review on environmental, economic and social aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, p. 111762, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111762>. Acesso em: 18 fev. 2025.

RIBEIRO, R. S. *et al.* Gaseificação de biomassa na geração de eletricidade em pequena escala. In: **Congresso de Inovação Tecnológica em Engenharia Elétrica. Araxá, Proceedings**. 2007

ROY, P. C.; DATTA, A.; CHAKRABORTY, N. An assessment of different biomass feedstocks in a downdraft gasifier for engine application. **Fuel**, v. 106, p. 864-868, 2013.

SALAM, P. Abdul; KUMAR, S.; SIRIWARDHANA, Manjula. The status of biomass gasification. **Energy Environment Partnership**, 2010. Acesso em: 15 mai. 2025.

SALES, Cristina Ap^a Vilas Bôas de, ANDRADE, Rubenildo Vieira and LORA, Electo Eduardo Silva. Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Proceedings**.

SANTOS, A. J. dos *et al.* Capacidades estatais: um estudo nas comunidades ribeirinhas, do Baixo Amazonas, no Pará/Brasil. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 4, p. e3632-e3632, 2024. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/download/3632/2609>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SANTOS, P. de F.; GÓIS, T. A.; SILVA, S. P. R. Caracterização e geração de combustíveis gasosos utilizando folha de coqueiro da produção do coco (*Cocos nucifera*). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e34610716783-e34610716783, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/16783/14873>. Acesso em: 18 fev. 2025.

SIGRIST, L.; LOBATO, E; ROUCO, L. GAZZINO, M.; CANTU, M., Economic assessment of smart grid initiatives for island power systems, *Apl. Energy* 189 (2017) 403– 415, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.076> Acesso em: 24 jul. 2025.

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. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/download/76519/53218>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SOUZA, A. P. F. de *et al.* Aplicação dos objetivos do desenvolvimento sustentável na Amazônia: Um estudo de caso na Universidade Federal do Pará (UFPA). **Peer Review**, v. 5, n. 20, p. 365-379, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jonathan-Munoz-Tabora/publication/374259376_Aplicacao_dos_Objeticos_do_Desenvolvimento_Sustentavel_na_Amazonia_Um_Estudo_de_Caso_na_Universidade_Federal_do_Para_UFPA/links/6515d28db0df2f20a2f6711a/Aplicacao-dos-Objeticos-do-Desenvolvimehidronto-Sustentavel-na-Amazonia-Um-Estudo-de-Caso-na-Universidade-Federal-do-Para-UFPA.pdf. Acesso em: 25 jan. 2025.

SOUZA, C. D. R. de; SILVA, K. de C. Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) para produção de carvão ativado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e53310212698-e53310212698, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/12698/11572>. Acesso em: 25 jan. 2025.

SOUZA, E. C. **Remanejamento de comunidades ribeirinhas na Amazônia e os reflexos social, econômico e na educação**. RFB Editora, 2020. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=OkNDEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA13&dq=O+Contexto+Socioecon%C3%B4mico+e+Energ%C3%A9tico+das+Comunidades+Ribeirinhas+no+Brasil&ots=aAzDuRdgTr&sig=1rTwfYc8V0j0z1ay4xOGbfg44hY>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SOUZA, L. M. de *et al.* Comparação da qualidade dos tecidos do pecíolo de buriti (*Mauritia flexuosa* L. f.) para combustão e carbonização. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 516-531, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/RhQJRZ3bqZb6BDB3GHBmnRr/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 23 jan. 2025.

SOUZA, N. F. S.; VIANA, D. S. F. ASPECTOS ECOLÓGICOS E POTENCIAL ECONÔMICO DO BURITI (*Mauritia flexuosa*). *Agrarian Academy*, Goiânia, v. 5, n. 9, p. 535-549, 2018. DOI: 10.18677/Agrarian_Academy_2018a52. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2018a/aspectos%20ecologicos.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2025.

STRIUGAS, N.; ZAKARAUSKAS, K.; EIMONTAS, J. H₂ Rich Syngas Production by Catalytic Gasification of End of Life Face Masks. In: **Book of Abstracts, 18th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, Dubrovnik, September 24-29 2023. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2023. Disponível em: <https://gs.elaba.lt/object/elaba:179809163/179809163.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

VAN DEN BROEK, R.; FAAIJ, A.; VAN WIJK, A. Biomass combustion for power generation. **Biomass and Bioenergy**, v. 11, n. 4, p. 271-281, 1996.

VERISSIMO, G. L.; LEIROZ, A. J. K.; CRUZ, M. E. Influence of the pyrolysis and heterogeneous char reactions modeling in the simulation of sugarcane bagasse gasification in a bubbling fluidized bed reactor. **Fuel**, v. 281, p. 118750, 2020.

YUCEL, O.; HASTAOGLU, M. A. Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier. **Fuel Processing Technology**, v. 144, p. 145-154, 2016.

ZHOURI, A.; LASCHEFSKI, K.; PEREIRA, D. B. **A insustentável leveza da política ambiental: desenvolvimento e conflitos sócio-ambientais**. Autêntica Editora, 2024.

<https://fas-amazonia.org/mitigacao-e-adaptacao-climatica/> Acesso em: 18 de fev. 2025.

<https://anuario.ibge.gov.br/2023/industria/energia.html> Acesso em: 18 de abr. 2025.

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/17270-pnad-continua.html> Acesso em: 18 de abr. 2025.

<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas> Acesso em: 18 de abr. 2025

<https://www.allpowerlabs.com/how-biomass-gasification-works> Acesso em: 22 de abr. 2025

<https://unicamp.br/unicamp/ju/552/pesquisas-demonstram-potencial-energetico-da-semente-de-tucuma#:~:text=Devido%20ao%20alto%20poder%20calor%C3%ADfico,tucum%C3%A3%20apresenta%20propriedades%20desejadas%20par> Acesso em: 25 de abr. 2025.

<https://www.advancedcyclonesystems.com/pt/pirolise-incineracao-e-gasificacao/> Acesso em: 14 de mai. 2025.

<https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/480> Acesso em: 30 de mai. 2025

https://www.ba.gov.br/comunicacao/2024/11/noticias/com-apoio-da-car-agricultores-que-trabalham-com-o-buriti-fortalecem-producao-e-desenvolvem-novos-produtos?utm_source=chatgpt.com Acesso em: 19 de de jun. 2025.

<http://irdeb.ba.gov.br/tveonline> Acesso em 02 de jul. 2025

<https://caixacolonial.club/blog/buriti-um-tesouro-do-cerrado-brasileiro-3839/>
Acesso em 03 de jul. 2025