

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

JOÃO VICTOR GARCIA DOS SANTOS

**GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA: LEVANTAMENTO DO ESTADO ATUAL DA
ARTE E RELAÇÃO DE PLANTAS EXISTENTES NO MUNDO**

Guaratinguetá - SP

2024

JOÃO VICTOR GARCIA DOS SANTOS

**GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA: LEVANTAMENTO DO ESTADO ATUAL DA
ARTE E RELAÇÃO DE PLANTAS EXISTENTES NO MUNDO**

TCC apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá - SP

2024

S237g	Santos, João Victor Garcia dos Gaseificação de biomassa: levantamento do estado atual da arte e relação de plantas existentes no mundo / João Victor Garcia dos Santos - Guaratinguetá, 2024. 49 f : il. Bibliografia: f. 45-49 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna 1. Gaseificação de biomassa. 2. Energia - Fontes alternativas 3. Análise energética. I. Título. CDU 620.91
-------	---

JOÃO VICTOR GARCIA DOS SANTOS

**GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA: LEVANTAMENTO DO ESTADO ATUAL DA
ARTE E RELAÇÃO DE PLANTAS EXISTENTES NO MUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel em Engenharia Mecânica.

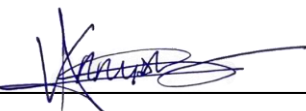
Data da defesa: 19/11/2024

Banca Examinadora:



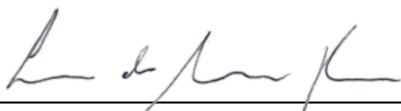
Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá



Prof. Dr. Victor Arruda Ferraz de Campos

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá



Prof. Msc. Lucas de Almeida Rezende

UNESP – Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a todos que me apoiaram durante este trajeto. Amigos e familiares, que serviram de base e incentivo para concluir o curso.

A graduação foi um momento muito marcante da minha vida, onde entrei apenas um menino que queria entender melhor como as coisas funcionavam e, hoje, saio um homem com uma visão e entendimento muito mais abrangente e complexa, não só da parte técnica e no que se refere a conhecimento, mas da sociedade e das relações que nos norteiam.

Agradeço a meu pai, Raul Alves dos Santos, e minha mãe, Lucimara Aparecida Garcia dos Reis, que sempre estiveram presentes e me ajudando a tornar esse sonho uma realidade, me dando a chance que muitos não tiveram, de ter um período da vida onde pudesse se dedicar 100% aos estudos. Em muitos momentos em que me questioneei sobre o que realmente queria para minha vida, se a faculdade era o caminho certo, eu vi esse sonho não só como meu, mas como dos meus pais e isso, com certeza, me deu forças para continuar até o final.

Aos meus amigos e irmãos, que sempre me incentivaram a ir até o final e dar o meu máximo, entendendo as diversas vezes em que fui ausente em festas e encontros, deixando de passar por momentos e experiências para que pudesse estudar, tudo isso para que este momento, enfim, chegasse.

Esta formação vai muito além de mim, é algo para mostrar que, sim, é possível alterar sua realidade através do estudo. Espero que possa servir de inspiração, de algum modo, para que meus sobrinhos e sobrinhas tenham, um dia, o amor pelo conhecimento e se pautem nele para buscar uma vida digna e honrada.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho explora o processo de gaseificação de biomassa como uma fonte alternativa de energia renovável. Descrevem-se, nele, os tipos de biomassa avaliados, incluindo materiais lenhosos e herbáceos, além dos agentes gaseificadores testados (ar, oxigênio, vapor de água e dióxido de carbono) e tipos de reatores. Também são apresentados os processos de pré-tratamento, necessários especialmente para biomassas com alto teor de umidade. Nos resultados da revisão bibliográfica, verificou-se que o uso de oxigênio como agente gaseificador aumenta significativamente a eficiência do processo, enquanto o uso de dióxido de carbono contribui para a captura de carbono, melhorando o rastro ambiental da gaseificação. Conclui-se que a otimização do tipo de biomassa e do agente gaseificador é essencial para maximizar a eficiência energética e reduzir impactos ambientais, indicando potenciais melhorias para o processo e aplicabilidade em larga escala. Finalmente, é apresentado algumas plantas existentes pelo mundo, com seus dados técnicos. Embora esta tecnologia seja animadora, ainda temos desafios pela frente, para tornar seu uso mais usual e de fácil acesso, para que haja a implantação de cada vez mais plantas pelo mundo.

Palavras-chave: gaseificação; biomassa; eficiência energética; captura de carbono; agentes gaseificadores.

ABSTRACT

This work explores the biomass gasification process as an alternative source of renewable energy. It describes the types of biomass evaluated by the author, including woody and herbaceous materials, as well as the gasifying agents tested (air, oxygen, water vapor, and carbon dioxide) and kinds of reactors. The pre-treatment processes necessary, especially for biomass with high moisture content, are also presented. The results of the bibliographic review show that using oxygen as a gasifying agent significantly increased the process efficiency, while the use of carbon dioxide contributed to carbon capture, improving the environmental profile of gasification. It is concluded that optimizing the type of biomass and gasifying agent is essential to maximize energy efficiency and reduce environmental impacts, indicating potential improvements to the process and large-scale applicability. Finally, some existing plants around the world are presented, with their technical data. Although this technology is exciting, we still have challenges ahead to make its use more common and easily accessible, so that more and more plants can be implemented around the world.

Keywords: gasification; biomass; energy efficiency; carbon capture; gasifying agents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Utilização do Gás de Síntese	17
Figura 2 – Reações endotérmicas e exotérmicas presentes no processo de gaseificação	17
Figura 3 – Gaseificador de Leito Fixo Contracorrente	21
Figura 4 – Gaseificador de Leito Fixo Concorrente	22
Figura 5 – Gaseificador de Leito Fluidizado Circulantes	23
Figura 6 – Gaseificador de Leito Fluidizado Borbulhante	23
Figura 7 – Variação da Composição do gás de síntese com base na razão de equivalente	26
Figura 8 – Etapas da pesquisa bibliográfica	34
Figura 9 – Planta GoBiGas (Suécia)	37
Figura 10 – Planta Choren (Alemanha)	38
Figura 11 – Planta India Glycols Ltd (Índia)	39

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 – Volume de artigos publicados com os termos “Gaseificação de biomassa” e “Produção de syngas” no título entre os anos 2019 e 2024 no Brasil.	43
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do gás de síntese em diferentes gaseificadores e condições de processo	24
Tabela 2 – Resumo de informações técnicas – plantas de gaseificação	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FT	Fischer - Tropsch
GEE	Gás de Efeito Estufa
GS	Gás de Síntese

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA	12
1.2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	GASEIFICAÇÃO	16
2.1.1	Definição de Gaseificação	16
2.1.2	Conversão do gás de síntese em outros produtos	18
2.1.3	Tipos de Gaseificadores	20
2.1.3.1	<i>Gaseificadores de leito fixo</i>	21
2.1.3.2	<i>Gaseificadores de leito fluidizado</i>	22
2.1.4	Agentes gaseificadores	24
2.1.5	Tratamento posterior ao gás de síntese	26
2.2	BIOMASSA	28
2.2.1	Definição de biomassa	28
2.2.2	Tipos de biomassa	29
2.2.3	Tratamentos necessários	31
2.2.3.1	<i>Tratamento prévio</i>	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4	DADOS TÉCNICOS DE PLANTAS DE GASEIFICAÇÃO E RESULTADOS	36
4.1	DADOS TÉCNICOS	36
4.1.1	Planta GoBiGas (Suécia)	36
4.1.2	Planta Choren (Alemanha)	37
4.1.3	India Glycols Ltd (Índia)	38
4.1.4	Northwest Advanced Bio-Fuels – NWAB (Estados Unidos da América)	39
4.1.5	Resumo dos Dados Técnicos	40
4.2	RESULTADOS	41
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A necessidade urgente de encontrar alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis impulsiona pesquisas recentes em novas tecnologias energéticas, especialmente em um cenário de crescente aquecimento global e comprometimento com a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Dentre as alternativas estudadas, a biomassa destaca-se por ser uma fonte de energia renovável e de baixo impacto ambiental, com a vantagem de apresentar um ciclo de carbono fechado. Esse ciclo ocorre porque o dióxido de carbono (CO_2) emitido durante a conversão da biomassa em energia é reabsorvido pelas plantas em seu crescimento, o que evita o acúmulo de carbono na atmosfera, característica desejável em relação aos combustíveis fósseis, que contribuem significativamente para o aumento dos GEE e mudanças climáticas (Santos et al., 2021; Fontes, 2018).

Dado o cenário de desafios e oportunidades, a pesquisa propõe-se responder questões como “Qual o tipo de biomassa mais adequado para uma gaseificação eficiente e com baixa produção de contaminantes?”, “Quais tratamentos prévios podem melhorar a eficiência de biomassas de baixa densidade energética, como herbáceas e resíduos animais?” e “Como se deu o progresso desta tecnologia nos últimos anos e quais foram as dificuldades para torná-la de fácil acesso?”.

Em suma, esta pesquisa visa identificar os avanços e as lacunas no campo da gaseificação de biomassa, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de uma tecnologia que possa contribuir para a transição energética de forma competitiva e sustentável. Acredita-se que, com o amadurecimento das tecnologias e a superação dos desafios existentes, a gaseificação de biomassa poderá ocupar um papel estratégico na matriz energética, especialmente no contexto da produção de hidrogênio e outros biocombustíveis, promovendo um desenvolvimento energético mais limpo e eficiente (Oliveira, 2022; Silva et al., 2021).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E QUESTÕES DE PESQUISA

A biomassa, como recurso energético, é constituída por matéria orgânica renovável de diversas origens, incluindo resíduos agrícolas, florestais e resíduos animais. Suas principais vantagens incluem a abundância, o baixo custo relativo e a capacidade de contribuir para a gestão de resíduos, evitando o descarte inadequado

de recursos que podem ser aproveitados energeticamente (Gonçalves et al., 2021). Além disso, a biomassa pode ser convertida em diferentes tipos de bioenergia por meio de processos bioquímicos, como a digestão anaeróbica, e termoquímicos, como a combustão e a gaseificação. Este último é particularmente promissor para a produção de gás de síntese, ou syngas, que pode ser utilizado para geração de eletricidade e calor, bem como na indústria química para a síntese de biocombustíveis e produtos petroquímicos, como o metanol e o diesel sintético (Lima, 2012; Santana et al., 2023).

A gaseificação é um processo termoquímico que, sob condições controladas de baixa quantidade de oxigênio e altas temperaturas, converte a biomassa em um composto formado por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Esse gás de síntese (GS) é altamente versátil, podendo ser empregado na geração de energia em turbinas e motores de combustão interna, ou mesmo em células de combustível, além de servir como matéria-prima na indústria química (Oliveira, 2022). Esse potencial multifuncional faz da gaseificação de biomassa uma alternativa atrativa no cenário de transição energética, que exige fontes energéticas renováveis e tecnologias de conversão mais eficientes. Estudos recentes destacam, ainda, o papel estratégico da gaseificação na produção de hidrogênio, cuja demanda vem crescendo devido ao seu potencial como combustível limpo e por suas aplicações industriais e no setor de transportes (Silva et al., 2021).

Embora promissor, o processo de gaseificação enfrenta desafios técnicos e operacionais que comprometem sua viabilidade em larga escala. Dentre os desafios, a formação de alcatrão durante o processo de gaseificação é uma das principais limitações técnicas, pois este pode se condensar e obstruir tubulações, além de reduzir a eficiência de equipamentos como turbinas e motores. Esse problema exige etapas adicionais de limpeza e purificação, elevando os custos operacionais e diminuindo a competitividade da gaseificação em comparação com outras tecnologias de geração de energia (Brito et al., 2010). Além disso, as partículas sólidas e compostos de enxofre presentes no syngas representam um desafio para a utilização do gás em aplicações industriais mais exigentes. Nesse sentido, o desenvolvimento de técnicas de purificação e remoção de contaminantes é essencial para tornar a gaseificação de biomassa mais viável e eficaz (Arena, 2011; Catizzone et al., 2021).

A diversidade de biomassas e suas variações nas características físico-químicas também influenciam diretamente o desempenho e a eficiência do processo de gaseificação. Biomassas de diferentes origens apresentam variadas composições de celulose, hemicelulose e lignina, o que afeta sua densidade energética, teor de umidade e formação de alcatrão e resíduos durante a conversão (Gonçalves et al., 2021; Fontes, 2018). A biomassa lenhosa, por exemplo, com baixa umidade e alta densidade energética, é amplamente utilizada em gaseificação devido à sua estabilidade térmica e baixa formação de alcatrão. Em contrapartida, biomassas herbáceas e resíduos animais podem exigir tratamentos prévios, como secagem e moagem, para melhorar sua eficiência no processo, pois apresentam alta umidade e maior formação de cinzas (Mota et al., 2018; Fernandes et al., 2019).

Além do tipo de biomassa, a escolha do agente gaseificador é crucial para definir a composição e o poder calorífico do GS. O uso de ar como agente gaseificador mostra-se econômico e prático, mas resulta em um gás com baixo poder calorífico, devido à presença de nitrogênio que dilui a concentração de CO e H₂. Por outro lado, o uso de oxigênio puro evita a diluição e aumenta o poder calorífico do syngas, porém requer equipamentos específicos para a separação de oxigênio, elevando os custos operacionais (Costa et al., 2019; Silva et al., 2021). Outros agentes, como o vapor de água, favorecem a produção de hidrogênio, o que é desejável em aplicações que exigem esse gás em maior proporção, como em células de combustível.

1.2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O estudo tem como principal objetivo realizar o levantamento do estado da arte acerca da temática “Gaseificação de Biomassa” e “Produção de Gás de Síntese (Syngas)”, assim como realizar o levantamento de dados técnicos acerca de plantas de gaseificação ao redor do mundo.

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar os dados provenientes de plantas voltadas à gaseificação de biomassa em todo o mundo a fim de verificar o progresso da tecnologia nos últimos anos;
- b) Dissertar sobre as dificuldades em tornar esse método viável e de fácil acesso.

A pesquisa torna-se relevante pois foi realizado o exame do potencial da gaseificação de biomassa como uma alternativa sustentável para a produção de hidrogênio e combustíveis líquidos. Com a crescente demanda por hidrogênio em setores industriais e para transporte sustentável, avaliar-se-á como a gaseificação de biomassa pode contribuir para a matriz energética de baixo carbono e quais são os desafios para a produção de hidrogênio competitivo em termos de custo e qualidade.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho subdivide-se em cinco partes, incluindo esta (introdução). A segunda parte apresenta a fundamentação teórica do estudo, contemplando a definição dos termos próprios do assunto e contextualizações relevantes para compreensão do tema abordado (conceitos de gaseificação, tipos e agentes, conceitos de biomassa e tratamentos necessários). A terceira parte traz consigo informações relevantes sobre os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. A quarta parte traz consigo informações técnicas a respeito de plantas de gaseificação existentes no mundo, selecionadas com base na importância (tamanho e contribuição para a tecnologia de gaseificação) e facilidade de encontrar informações sobre elas, com breves comentários sobre o tipo de tecnologia utilizada em cada uma delas. Por fim, na quinta parte, o trabalho desenvolverá as considerações finais e conclusões resultantes das informações obtidas. Finalmente, apresentar-se-á as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo abordará os conceitos envolvidos na gaseificação e utilização de biomassa. Serão definidos os tópicos que contextualizam o tema a fim de que se possa compreender como se dá esse processo termoquímico e sua importância para conversão de biomassa em uma fonte de energia orgânica e renovável. Assim, também tratar-se-á os aspectos ambientais envolvidos na temática e como eles se mostram essenciais na atualidade.

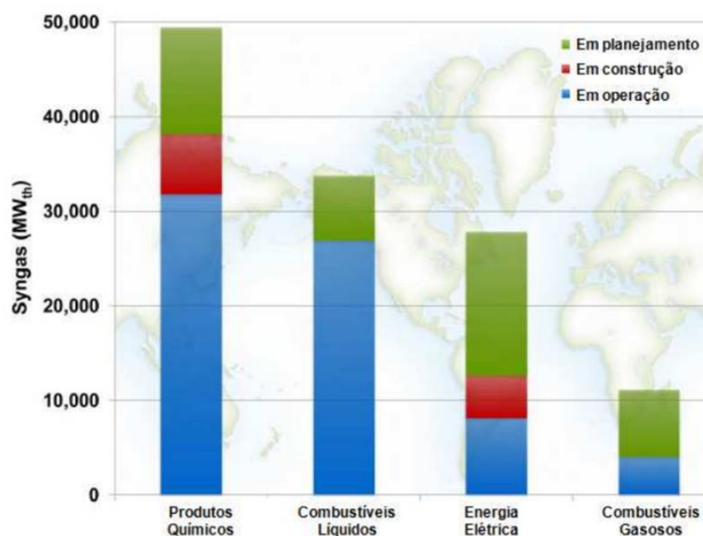
2.1 GASEIFICAÇÃO

2.1.1 Definição de Gaseificação

A gaseificação trata-se de um processo termoquímico que converte biomassa sólida (ou seja, materiais ricos em carbono) em gases combustíveis, conhecidos como gás de síntese (syngas), por meio de altas temperaturas (de 700 a 1000 °C) em condições de baixa quantidade de oxigênio, evitando a combustão completa (Lima, 1994).

Este gás é composto por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), tratando-se, portanto, de um produto altamente versátil, podendo ser utilizado como combustível para gerar calor e eletricidade em turbinas ou motores e ainda como matéria-prima na indústria química para a produção de combustíveis líquidos, como metanol e diesel sintético, além de outros produtos petroquímicos. A Figura 1 demonstra graficamente algumas destas aplicações onde é utilizado o gás de síntese (Santana, 2023).

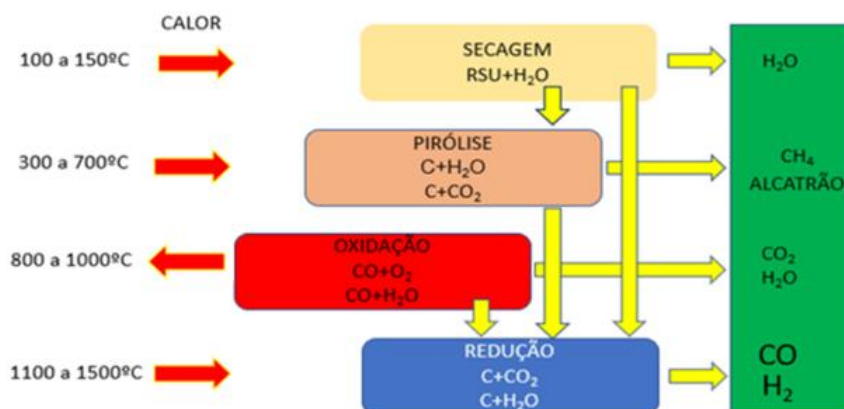
Figura 1 - Utilização do gás de síntese



Fonte: NETL, 2012

O processo de gaseificação inclui uma série de etapas, como secagem, pirólise (quebra da biomassa em componentes menores), combustão parcial e a conversão de resíduos em gás que contém compostos como monóxido de carbono, hidrogênio e metano (Lima, 1994), como ilustrado na Figura 2, podendo ser usado para gerar energia ou ser transformado em produtos químicos de valor agregado.

Figura 2 - Reações endotérmicas e exotérmicas presentes no processo de gaseificação



Fonte: Adaptado de Lima (1994)

Inicialmente, a biomassa passa pela secagem, onde a água presente é removida, reduzindo o conteúdo de umidade e preparando o material para as próximas etapas. Em seguida, a pirólise ocorre, decompondo a biomassa em compostos menores, incluindo alcatrão, gases leves e carbono fixo. Este último então participa da combustão parcial, que gera calor para a etapa final de gaseificação, onde as reações químicas com o agente gaseificador produzem o syngas (Santana, 2023).

A gaseificação possui várias vantagens em relação a outros métodos de conversão de biomassa, como a incineração (nesta, ocorre a queima direta da biomassa, que libera grandes quantidades de dióxido de carbono). Dentre as vantagens a serem citadas, o processo em si permite uma conversão mais eficiente da energia química contida na biomassa, o que reduz a formação de resíduos e minimiza as emissões de gases poluentes; além disso, o syngas, produto do método, pode ser utilizado de maneira controlada para gerar energia elétrica, calor ou mesmo ser convertido em biocombustíveis (Oliveira, 2022).

2.1.2 Conversão do gás de síntese em outros produtos

Outro aspecto relevante da gaseificação é a possibilidade de produzir hidrogênio, um combustível limpo e promissor. A crescente demanda por hidrogênio em setores industriais e para o transporte sustentável tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de gaseificação de biomassa que, diferente dos combustíveis fósseis, é uma fonte renovável e pode ser gerada a partir de resíduos agrícolas, florestais e industriais, conferindo ao processo de gaseificação uma vantagem ambiental significativa (Sankir, 2017).

Dessa maneira, a conversão do gás de síntese (syngas) em combustíveis e produtos químicos representa um dos usos mais estratégicos e promissores do processo de gaseificação, especialmente quando considera-se a demanda por combustíveis alternativos e produtos com menor impacto ambiental. O syngas pode ser transformado em uma variedade de produtos por meio de processos industriais específicos. Três dos principais processos de conversão desse gás são: a metanação para obtenção de metano, a síntese de metanol e o processo Fischer-Tropsch (FT), uma técnica que permite a síntese de hidrocarbonetos líquidos, ampliando as

possibilidades de aplicação (Oliveira, 2022). Esse tipo de aproveitamento torna a gaseificação de biomassa uma alternativa atrativa para a substituição parcial de combustíveis fósseis, contribuindo para a transição energética em setores industriais pesados e de transporte.

A metanação é o processo pelo qual o gás de síntese é convertido em metano (CH_4), o principal componente do gás natural, por meio de reações catalisadas. Em condições de temperatura e pressão controladas e na presença de catalisadores específicos, como níquel, ocorre a reação entre o CO e o H_2 do GS, formando metano e água. Essa transformação tem grande relevância, pois permite o uso do metano como combustível para geração de eletricidade e aquecimento, substituindo o gás natural fóssil. Além disso, o metano produzido pode ser injetado diretamente na rede de distribuição de gás natural, de modo a ampliar a viabilidade econômica do processo e integrar a gaseificação de biomassa na infraestrutura energética existente. Em contrapartida aos benefícios citados, a metanação apresenta também algumas dificuldades, como a necessidade de purificação do syngas para evitar o acúmulo de impurezas, especialmente o alcatrão, que podem comprometer a eficiência e a vida útil dos catalisadores (Ferreira et al., 2019).

Outro produto de grande importância industrial que pode ser obtido a partir do syngas é o metanol, um dos compostos químicos mais utilizados na indústria e com potencial para diversas aplicações energéticas. A síntese de metanol ocorre pela reação do monóxido de carbono e hidrogênio em condições de alta pressão e temperaturas moderadas, geralmente na presença de catalisadores de cobre, zinco e alumínio e é amplamente utilizada como meio de obtenção de produtos químicos, (como formaldeído e ácido acético) e combustível limpo (isso porque o metanol pode ser utilizado em misturas com a gasolina ou como base para produção de biocombustíveis). Recentemente, o metanol tem ganhado destaque no setor de transporte marítimo como alternativa para reduzir as emissões de poluentes. Assim, a síntese de metanol a partir de syngas gerado pela biomassa é vista como uma solução de baixo carbono, pois reduz a dependência de fontes fósseis e contribui para o ciclo fechado de carbono, sendo uma abordagem ambientalmente sustentável para a produção química (Catizzone et al., 2021).

O processo Fischer-Tropsch é outra rota de conversão altamente estratégica para o GS, pois permite a produção de hidrocarbonetos líquidos, incluindo diesel sintético, gasolina e querosene. Desenvolvido no início do século XX, esse processo é utilizado em plantas industriais para transformar gás em líquidos combustíveis, particularmente em locais onde os recursos fósseis sólidos, como o carvão, são mais acessíveis do que o petróleo. Através de reações catalisadas em alta pressão e temperatura, o CO e o H₂ do GS reagem para formar longas cadeias de hidrocarbonetos. O processo FT é extremamente versátil e pode ser ajustado para obter diferentes tipos de combustíveis, conforme a demanda, tornando-se uma alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética e redução das emissões de GEE. No entanto, esse processo também apresenta complexidades técnicas e econômicas, uma vez que a tecnologia exige altos investimentos iniciais e requer catalisadores específicos para maximizar o rendimento e a qualidade dos produtos (Gonçalves et al., 2021).

Cada um desses processos de conversão do syngas em produtos de maior valor agregado amplia as possibilidades de aplicação da gaseificação de biomassa e contribui para a substituição parcial de combustíveis fósseis, posicionando a gaseificação de biomassa como uma tecnologia promissora no cenário global. A produção de metano e metanol, bem como a síntese de hidrocarbonetos líquidos pelo processo Fischer-Tropsch, não só ajudam a suprir a demanda por combustíveis sustentáveis, mas também promovem uma economia mais circular, ao valorizar resíduos agrícolas, florestais e industriais. Além disso, a possibilidade de integrar esses combustíveis e produtos ao mercado existente e à infraestrutura já disponível aumenta a viabilidade econômica e estratégica da gaseificação de biomassa como uma tecnologia viável para a transição energética.

2.1.3 Tipos de Gaseificadores

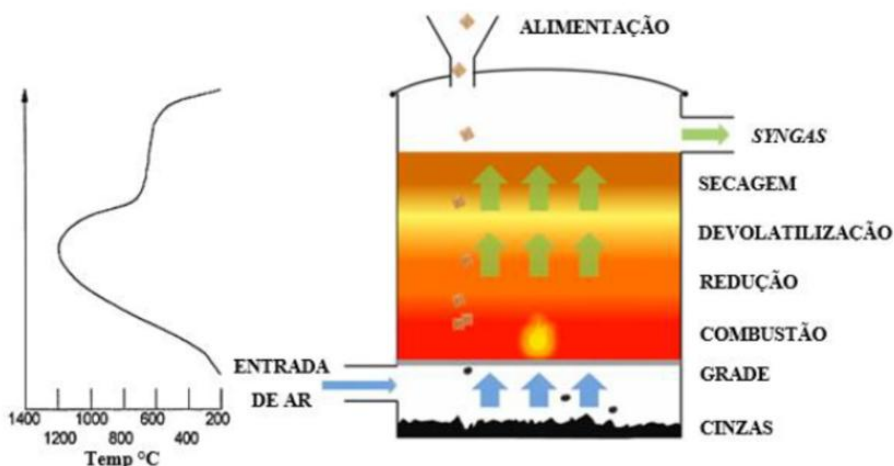
A fim de maximizar a eficiência do processo, existem diferentes tipos de gaseificadores, cada um com características específicas de acordo com o tipo de biomassa utilizada e as necessidades do produto. Dentre os principais, destacam-se os gaseificadores de leito fixo e os de leito fluidizado.

2.1.3.1 Gaseificadores de leito fixo

Os gaseificadores de leito fixo são divididos em dois tipos: os de fluxo contracorrente (updraft) e concorrente (downdraft), que diferem na direção do fluxo entre a biomassa e o agente gaseificador (Lima, 1994).

Nos gaseificadores de leito fixo contracorrente, a biomassa é introduzida na parte superior do reator, enquanto o agente gaseificador é inserido pela base (Figura 3). Dessa forma, o gás gerado sobe através da biomassa, criando uma zona de alta temperatura na base onde ocorre a combustão. Este tipo de gaseificador é eficiente para biomassa de baixa umidade e produz um GS com alto conteúdo de alcatrão, o que exige tratamento adicional quando se busca alta qualidade do gás, justificando seu uso em processos em que o teor de alcatrão não é um grande requisito ou onde há sistemas de tratamento adicionais para a limpeza do gás (Nogueira, 2009).

Figura 3 – Gaseificador de Leito Fixo Contracorrente

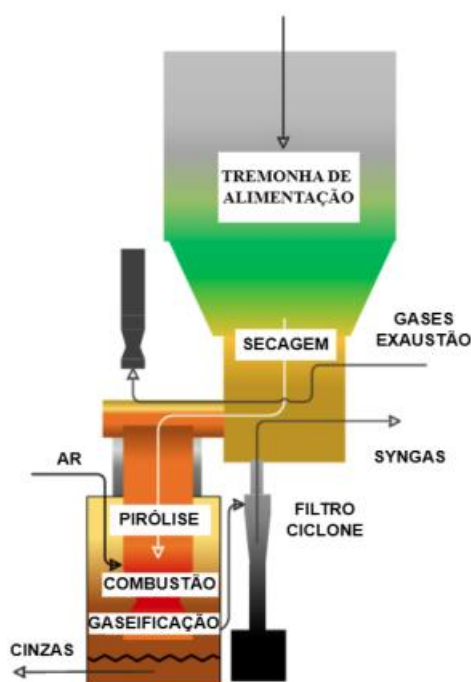


Fonte: Lima (1994)

Por outro lado, nos gaseificadores de leito fixo concorrente, ao contrário do anterior, tanto a biomassa quanto o agente gaseificador são inseridos pela parte superior do reator (Figura 4). Este modelo favorece uma combustão mais completa e uma menor formação de alcatrão, sendo ideal para processos que exigem um syngas mais limpo. Esse tipo de gaseificador, no entanto, pode ter uma eficiência térmica inferior, pois parte do calor gerado na zona de combustão não é totalmente

aproveitada. Esse modelo é ideal para processos em que a limpeza do gás é crítica, como em motores de combustão interna e turbinas a gás (Lima, 1994).

Figura 4 – Gaseificador de Leito Fixo Concorrente



Fonte: adaptado de Copa et al. (2020)

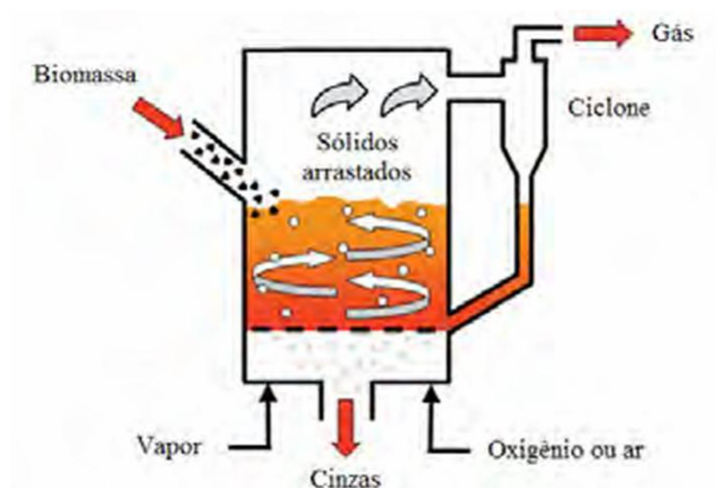
2.1.3.2 Gaseificadores de leito fluidizado

Divididos em leito borbulhante e circulante, esses gaseificadores mantêm a biomassa em um estado fluidizado (isto é, em suspensão com o agente gaseificador), promovendo uma maior transferência de calor e uma mistura homogênea (Nogueira, 2009).

Os fluidizados de leito circulante possuem uma eficiência elevada, isso porque operam de modo a manter as partículas de biomassa em suspensão completa dentro do reator, como ilustrado na Figura 5, em maiores velocidades de fluxo de gás e temperaturas (e, por consequência, promovem uma melhor mistura entre os componentes), permitindo uma maior taxa de conversão da biomassa e redução de alcatrão. Devido sua elevada eficiência e capacidade de conversão, são amplamente

utilizados em aplicações industriais que necessitam de grande escala de produção contínua de syngas, como plantas de geração de energia e instalações petroquímicas (Nogueira, 2009).

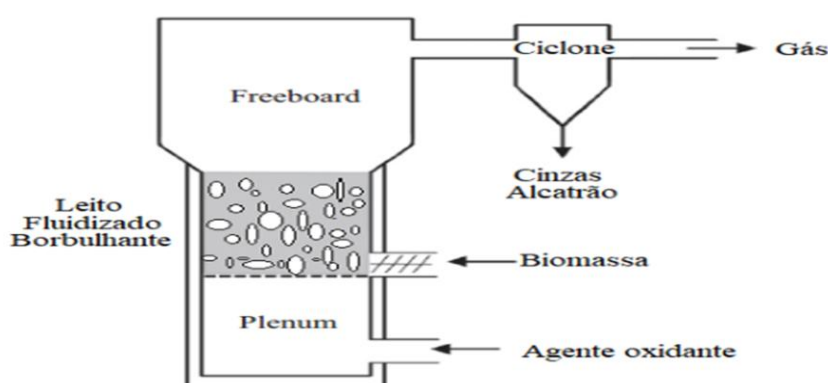
Figura 5 – Gaseificador de Leito Fluidizado Circulante



Fonte: Nogueira (2009)

Nos gaseificadores de leito borbulhante (Figura 6), a biomassa e o agente gaseificador são mantidos em uma fase semi-fluidizada, com partículas de biomassa suspensas e formando bolhas no leito. Isso proporciona uma distribuição uniforme de calor e um controle mais preciso das reações, permitindo que o processo ocorra em temperaturas moderadas. O modelo é especialmente adequado para biomassas com maior umidade e com grande variação de tamanho, apresentando boa eficiência e menor formação de alcatrão em comparação com os gaseificadores de leito fixo (Lima, 1994).

Figura 6 – Gaseificador de Leito Fluidizado Borbulhante



Fonte: Mota *et al.* (2018)

Cada tipo de gaseificador apresenta vantagens e limitações específicas, que variam de acordo com o tipo de biomassa, a umidade do material e o uso final do gás (Cênbio, 2002). Por isso, a seleção do gaseificador ideal depende de uma análise criteriosa das características da biomassa e dos requisitos energéticos e de qualidade do syngas para a aplicação desejada.

2.1.4 Agentes gaseificadores

São nomeados “agentes gaseificadores” os componentes críticos no processo de gaseificação, pois eles reagem com a biomassa a fim de produzir o syngas. Entre os agentes mais comuns, destacam-se o ar, o oxigênio puro, o vapor de água e o dióxido de carbono (CO_2). Cada um desses agentes apresenta diferentes características que influenciam na composição do gás de síntese, no poder calorífico e na eficiência do processo de conversão, de maneira que a escolha do agente gaseificador depende dos objetivos do processo, da disponibilidade de recursos e da aplicação final do GS (Nunes, 2022). A exemplo disso, vê-se que, em aplicações industriais, a combinação de oxigênio e vapor é comum para obter um syngas de alta qualidade, enquanto o ar é mais utilizado em operações de menor escala e custo.

Assim, a Tabela 1 demonstra como a composição química do syngas é afetada a depender do gaseificador e condição de processo utilizados.

Tabela 1 - Composição do gás de síntese em diferentes gaseificadores e condições de processo

Tipo de Gaseificador	Leito Fluidizado	Leito Fixo Concorrente	Leito Fixo Contracorrente
Agente Gaseificador	Ar	Ar	O_2
N_2 (%)	51	53	3
CO (%)	14	24	48
CO_2 (%)	20	9	15
H_2 (%)	9	11	32
CH_4 (%)	7	3	2
H_2 / CO	0,64	0,46	0,67

Fonte: Adaptado de Nunes (2022)

O uso de ar como agente gaseificador é uma escolha prática e econômica devido à sua abundância, além de não envolver custos adicionais, mas resulta em um syngas com baixo poder calorífico. Uma vez que o ar contém aproximadamente 79% de nitrogênio, esse componente inerte dilui o gás de síntese, reduzindo a concentração de compostos energéticos, como o monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H₂). Em geral, o GS gerado com ar possui uma concentração de cerca de 15 a 20% de monóxido de carbono e hidrogênio, mas, devido à diluição pelo nitrogênio, a energia do gás é limitada, sendo ideal para usos que não exijam um gás altamente energético. O uso de ar resulta em um syngas com baixo poder calorífico (entre 4 e 6 MJ/Nm³), adequado para usos em processos que requerem menos energia, como aquecimento direto e geração de vapor, mas que podem não ser viáveis para fins industriais de alta demanda energética (Costa et al., 2019)..

Por outro lado, o uso de oxigênio puro evita a diluição por nitrogênio e aumenta significativamente o poder calorífico do gás de síntese, entretanto, sua utilização é mais cara, uma vez que requer equipamentos específicos para a separação do oxigênio do ar. A gaseificação com oxigênio puro pode aumentar o poder calorífico do syngas para níveis entre 10 e 12 MJ/Nm³, sendo uma escolha vantajosa para indústrias que necessitam de um gás mais puro e energético, concentrado em CO e H₂. O uso de oxigênio também reduz a formação de impurezas como alcatrão, minimizando a necessidade de tratamentos posteriores (Silva et al., 2021). .

Outro agente gaseificador a ser citado é o vapor de água, que favorece a produção de hidrogênio devido à reação de deslocamento gás-água (reação *water-gas shift reaction*), que converte monóxido de carbono e vapor em dióxido de carbono e hidrogênio. Esse processo eleva a proporção de hidrogênio no GS, tornando-o mais adequado para aplicações que necessitem de hidrogênio puro, como células de combustível, além de também contribuir para um gás com maior poder calorífico, mas exige maior controle do processo e custo adicional para gerar o vapor necessário. Nesse processo, o vapor de água pode aumentar a proporção de hidrogênio no syngas em até 50%, melhorando seu valor calorífico e adequando-o para processos que visam a produção de hidrogênio para fins energéticos (Albuquerque, 2020).

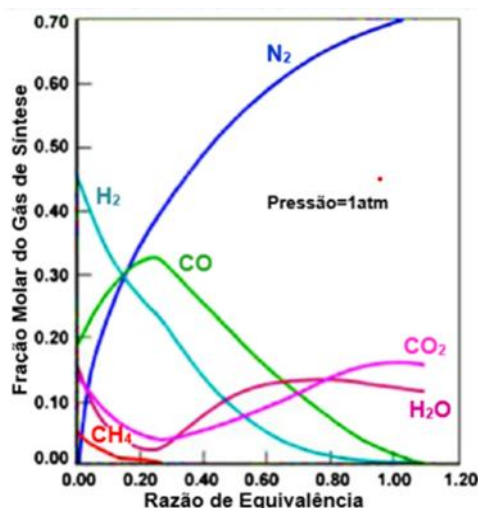
Por fim, o dióxido de carbono é um agente utilizado em menor escala, com a vantagem de possibilitar a captura de carbono, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Embora o CO₂ não seja o responsável direto pelo

aumento do poder calorífico do gás de síntese, ele promove reações secundárias que aumentam a conversão do carbono presente na biomassa (dentre elas, a reação de Boudouard, que converte carbono sólido em monóxido de carbono). Essa abordagem torna-se atrativa em contextos em que a sustentabilidade e a redução de emissões de CO_2 são prioridades, pois permite a utilização de um subproduto de outros processos industriais, ajudando a reduzir a pegada de carbono (Ferreira, 2019).

2.1.5 Tratamento posterior ao gás de síntese

Após a produção do syngas, não é improvável que o material contenha impurezas como alcatrão, partículas sólidas e compostos de enxofre (Arena, 2011). A Figura 7 demonstra a variação da composição do gás de síntese com base na razão de equivalência, ilustrando graficamente, os diferentes elementos que compõem o resultado do processo.

Figura 7 - Variação da composição do gás de síntese com base na razão de equivalência



Fonte: Adaptado de ARENA (2011)

Dessa maneira, os tratamentos posteriores, que podem incluir técnicas como filtração, lavagem e catalisadores de limpeza, são essenciais para melhorar a qualidade do syngas, pois reduzem os impactos ambientais, além de garantirem sua aplicabilidade em motores e turbinas. Tal como o tratamento anterior ao processo,

estes também representam custos e complexidade para a gaseificação, entretanto tornam-se indispensáveis pelos benefícios já citados (Gómez, 2010).

Após a gaseificação, o syngas gerado contém impurezas como alcatrão, partículas sólidas e compostos de enxofre e nitrogênio, que devem ser removidos para garantir sua qualidade e reduzir o impacto ambiental. A etapa de tratamento posterior é essencial, especialmente quando o syngas será utilizado em motores de combustão, turbinas ou células de combustível, onde a presença de contaminantes pode causar danos e reduzir a eficiência (Arena, 2011).

A remoção de alcatrão é uma das etapas mais críticas, pois o alcatrão pode condensar e obstruir tubulações e danificar os equipamentos. Para isso, são usados filtros mecânicos e ciclones, que removem as partículas maiores, além de filtros de cerâmica e catalisadores que quebram as moléculas de alcatrão em componentes menores (Brito et al., 2010). Catalisadores de níquel, por exemplo, são comumente usados para reduzir o alcatrão e melhorar a qualidade do GS para aplicações energéticas.

Outro tratamento inclui a remoção de compostos de enxofre e nitrogênio, que, quando presentes em níveis elevados, podem formar óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x), poluentes atmosféricos que contribuem para a chuva ácida e problemas respiratórios (Santana, 2023). Para essa remoção, utilizam-se técnicas de lavagem química com soluções de hidróxido de sódio ou adsorventes como carvão ativado, que capturam os compostos indesejados.

Além disso, a remoção de partículas finas de cinzas e metais é realizada por meio de filtros e ciclones de alta eficiência. Essas partículas, se inaladas ou liberadas na atmosfera, representam um risco para a saúde humana e ambiental. Portanto, o uso de filtros cerâmicos ou eletrostáticos garante a captura das partículas antes do uso do gás de síntese em aplicações que exigem alta pureza (Mendiburu et al., 2014).

A purificação com água, também conhecida como “lavagem úmida”, é um método usado para resfriar e remover traços de alcatrão e partículas restantes do syngas. Este processo, porém, gera águas residuais contaminadas que requerem tratamento adequado antes do descarte ou reuso, o que representa um desafio adicional no processo de gaseificação.

Por fim, a etapa de compressão e secagem final do syngas é realizada para reduzir o teor de umidade e ajustar a pressão do gás para sua aplicação final. Isso é essencial para garantir a estabilidade do GS em turbinas e células de combustível,

promovendo uma combustão eficiente e prolongando a vida útil dos equipamentos (Catizzzone et al., 2021).

2.2 BIOMASSA

O uso da biomassa como fonte de energia é uma prática milenar, mas sua importância tem crescido devido à necessidade de encontrar alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis. A biomassa é considerada neutra em carbono, uma vez que o dióxido de carbono (CO_2) liberado durante a combustão é reabsorvido pelas plantas durante o crescimento, este ciclo fechado de carbono é uma das razões pelas quais a biomassa é vista como uma solução potencialmente sustentável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, particularmente quando comparada a combustíveis fósseis que adicionam novas moléculas de CO_2 à atmosfera (Mota et al. 2018).

2.2.1 Definição de biomassa

A biomassa, um material orgânico renovável que pode ser utilizado como fonte de energia, gerado principalmente a partir de plantas, resíduos agrícolas, florestais, e resíduos animais, representa a massa total de matéria orgânica produzida por organismos vivos ou mortos, acumulada em um ecossistema ou área (Lima, 2012). Esse recurso é rico em carbono e outras moléculas orgânicas complexas que podem ser convertidas em energia através de processos bioquímicos (como a digestão anaeróbica) e termoquímicos (como a combustão e a gaseificação).

Em termos de composição, a biomassa é formada por três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina. A celulose e a hemicelulose são carboidratos complexos que servem como fontes de energia quando quebrados em açúcares mais simples (Santana, 2023). A lignina, por outro lado, é uma estrutura resistente que fornece rigidez às plantas, sendo mais difícil de degradar. Essa composição varia de acordo com o tipo de biomassa, influenciando diretamente a eficiência de conversão em energia, seja por combustão direta ou processos como a gaseificação.

A biomassa também possui variações em sua composição mineral, afetando a formação de cinzas e a possibilidade de geração de escórias, o que pode dificultar o uso em determinados processos (como a gaseificação em leitos fluidizados, por exemplo). Estes fatores tornam o pré-tratamento da biomassa, tópico a ser tratado adiante, uma etapa crucial para otimizar o desempenho energético e a qualidade do combustível produzido (Lima, 2012).

Além de seu uso energético, a biomassa é uma fonte promissora para a produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, e de produtos químicos renováveis (Oliveira, 2022). Sua versatilidade e capacidade de substituição dos derivados de petróleo aumentam seu potencial no desenvolvimento de uma bioeconomia, de maneira que esses atributos tornam a biomassa um componente essencial no desenvolvimento de tecnologias de energia renovável e na transição para uma matriz energética mais sustentável e diversificada.

2.2.2 Tipos de biomassa

A biomassa utilizada na gaseificação pode ser classificada em quatro categorias principais: biomassa lenhosa, herbácea, marinha e de resíduos animais. Cada uma dessas categorias possui características distintas e variam em densidade, umidade e composição química, que afetam a eficiência do processo de gaseificação.

A biomassa lenhosa é uma das fontes mais utilizadas na gaseificação devido à sua alta densidade energética e baixa umidade, qualidades que favorecem a eficiência do processo. Proveniente principalmente de resíduos florestais e de madeira de reflorestamento, esse tipo de biomassa é constituído principalmente por lignina, celulose e hemicelulose, substâncias que oferecem uma elevada estabilidade térmica e uma baixa formação de alcatrão durante a gaseificação. A lignina, presente em grandes quantidades na biomassa lenhosa, contribui para uma produção de syngas de alta qualidade, pois seus compostos aromáticos quebram-se de forma eficiente em altas temperaturas, liberando menos alcatrão em comparação a outros tipos de biomassa (Gonçalves et al., 2021).

Além disso, a biomassa lenhosa é versátil e amplamente disponível em regiões com cobertura florestal significativa, tornando-se uma escolha popular para a gaseificação em larga escala. Estudos apontam que o uso de resíduos de madeira pode minimizar o desperdício de recursos naturais, além de apresentar benefícios

ambientais importantes, pois evita o descarte inadequado de resíduos florestais (Gonçalves et al., 2021). Dessa forma, a biomassa lenhosa é valorizada tanto por sua eficiência energética quanto por seu potencial de redução de resíduos.

A biomassa herbácea, como gramíneas e resíduos agrícolas, é uma opção interessante devido à sua abundância, especialmente em áreas agrícolas, e baixo custo. Esse tipo de material tende a ter um menor conteúdo energético em comparação com a biomassa lenhosa, além de possuir uma umidade inicial mais elevada, o que pode exigir processos de secagem adicionais antes da gaseificação, mas é abundante e de baixo custo (Fontes, 2018). Outra questão relevante é a composição mineral da biomassa herbácea, que frequentemente apresenta altos teores de sílica e potássio. Esses minerais podem afetar a formação de escória, um resíduo sólido que se deposita nas paredes internas dos reatores, dificultando a condução térmica e, em alguns casos, até mesmo interrompendo o processo de gaseificação.

Sobre as biomassas marinhas, como as algas, essas estão ganhando destaque por sua alta taxa de crescimento e facilidade de cultivo em regiões costeiras, onde não competem com o uso da terra para agricultura. As algas contêm compostos orgânicos e minerais que podem ser aproveitados para a produção de energia, mas sua gaseificação ainda enfrenta alguns desafios técnicos; a presença desses sais (como sódio e cloro nas algas) pode gerar, por exemplo, a corrosão dos equipamentos e comprometer a durabilidade do sistema (Santos et al., 2021). Portanto, a viabilidade do uso de biomassa marinha em gaseificação está ligada ao desenvolvimento de técnicas de purificação e secagem eficientes que removam os agentes corrosivos do processo.

Por último, os resíduos animais, como estrume e esterco, são outra fonte possível de biomassa para gaseificação. Embora apresentem um valor calórico moderado, esses materiais possuem o benefício adicional de conter nutrientes como nitrogênio e fósforo, que podem enriquecer o syngas produzido (Fontes et al., 2018). Para essa fonte, no entanto, os altos teores de umidade e cinzas exigem frequentemente a mistura com outras biomassas, como lenhosa ou herbácea, a fim de garantir um melhor desempenho da gaseificação, equilibrando o teor de umidade e facilitando o processamento (Santos et al., 2021). No entanto, mesmo com essa abordagem, os resíduos animais exigem sistemas de gaseificação adaptados para evitar problemas com o acúmulo de cinzas e otimizar a eficiência energética.

Assim, a escolha do tipo de biomassa para gaseificação deve considerar não apenas o poder calorífico, mas também a disponibilidade de material e os possíveis tratamentos necessários para otimizar o processo. Cada tipo de biomassa requer diferentes abordagens para maximizar a eficiência do GS produzido, destacando a importância da seleção correta para a viabilidade econômica e técnica do processo de gaseificação (GBA, 2020).

Em suma, biomassas lenhosas são preferidas pela alta densidade energética e menor formação de alcatrão, enquanto biomassas herbáceas e marinhas requerem pré-tratamentos para lidar com umidade e minerais indesejáveis. Resíduos animais, embora menos utilizados, podem ser promissores, especialmente quando misturados com outras biomassas, o que permite melhorar o desempenho do processo e viabilizar a produção de energia renovável em áreas rurais (Gonçalves et al., 2021).

2.2.3 Tratamentos necessários

Visto a relevância do método estudado e seu alinhamento com as preocupações atuais quanto à eficiência energética e ambientalismo, é imprescindível desenvolver o processo com etapas que garantam o melhor aproveitamento dos recursos ofertados e minimização dos resíduos provenientes do mesmo (GÓMES et al., 2010). Por isso, são desenvolvidas etapas de preparo prévio da matéria-prima trabalhada (a biomassa).

2.2.3.1 *Tratamento prévio*

Para além do processo de gaseificação, é necessário destacar os estágios anteriores pelos quais a biomassa é submetida. Desse modo, o material frequentemente passa por um pré-tratamento para melhorar sua eficiência e reduzir a formação de alcatrão. O tratamento pode incluir secagem, redução de tamanho e pré-tratamentos químicos para ajustar a composição química e facilitar o processo, apesar de torná-lo mais caro, afinal, adiciona etapas, processos e demanda novos esforços.

Esse estágio é essencial para garantir a eficiência e qualidade do syngas no processo de gaseificação em decorrência dos diversos fatores, inerentes à biomassa, que influenciam diretamente o rendimento da gaseificação, como as variações naturais em sua composição, umidade e densidade (Rauch et al., 2014).

A secagem da biomassa é uma das etapas mais importantes no pré-tratamento. O processo visa reduzir seu teor de umidade, uma vez que altos níveis de água no material podem afetar a eficiência do processo e aumentar a formação de alcatrão; a umidade elevada consome calor durante a gaseificação, desviando energia que poderia ser usada para a conversão do carbono em gás. Idealmente, a biomassa deve ter menos de 15% de umidade para uma gaseificação eficiente, o que pode ser alcançado através de secagem ao ar livre ou em secadores industriais (Fernandes et al., 2019).

A redução de tamanho, também chamada de moagem, é outro tratamento importante que facilita a homogeneidade e a reação da biomassa com o agente gaseificador. Partículas grandes de biomassa, como pedaços de madeira, possuem uma superfície de contato menor, o que dificulta a reação uniforme (Souza 2020). Por esse motivo, a moagem ou trituração atuam como um tratamento do material, pois aumentam a área de superfície da biomassa, permitindo uma melhor mistura e eficiência na conversão térmica.

A torrefação é uma técnica de tratamento térmico leve, onde a biomassa é aquecida a temperaturas entre 200 e 300°C em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, sendo desidrata e decompondo-se parcialmente, de modo a reduzir a presença de compostos voláteis e melhorar o teor energético do material. A torrefação gera uma biomassa mais densa, uniforme e com características próximas ao carvão, facilitando o manuseio e aumentando a eficiência do processo de gaseificação, pois reduz-se a tendência de formar alcatrão e impurezas, o que torna o processo também mais sustentável (Oliveira et al., 2018).

Existem, além destes, pré-tratamentos feitos especialmente para determinados tipos de biomassas. As herbáceas e os resíduos agrícolas, por exemplo, contêm níveis elevados de minerais e impurezas, que podem causar problemas de corrosão e formação de escória durante a gaseificação. Para contornar isso, são aplicados tratamentos químicos, como lavagens com água ou solventes, que ajudam a remover esses minerais. Esse tipo de tratamento é fundamental para biomassas com altas concentrações de cinzas e metais, que, de outra forma, prejudicam o funcionamento do gaseificador e a qualidade do syngas produzido (Souza, 2020)

Nota-se que o pré-tratamento também varia conforme o tipo de gaseificador e a biomassa utilizada. Gaseificadores de leito fluidizado, por exemplo, são mais tolerantes a biomassa de menor qualidade e umidade em comparação com os de leito

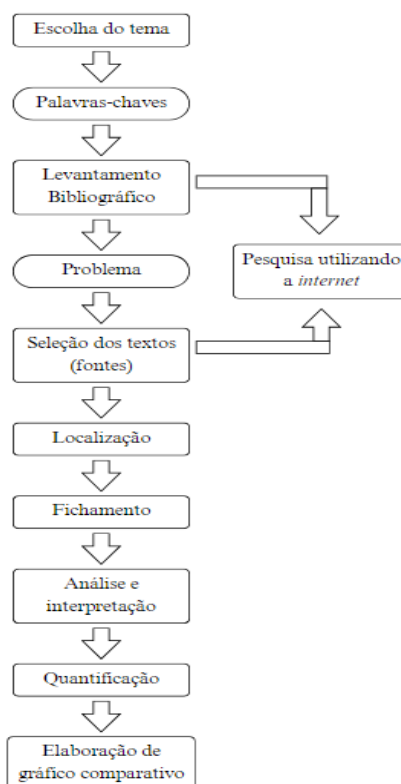
fixo, que exigem material mais seco e homogêneo. Com isso, os tratamentos prévios se mostram fundamentais para garantir um desempenho otimizado e uma menor necessidade de manutenção do equipamento (Brito et al., 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa teve como método de trabalho uma revisão bibliográfica, buscando compilar, analisar e sintetizar o conhecimento existente sobre o tema em questão de maneira fundamentada. A revisão bibliográfica trata-se de uma metodologia que se dedica a analisar fontes teóricas e empíricas disponíveis na literatura e é particularmente relevante quando o objetivo é aprofundar o entendimento sobre um tópico já amplamente discutido na academia (Gil, 2008; Lakatos, 2017).

Com base na leitura crítica e análise dos materiais, busca-se identificar as contribuições e lacunas no campo de estudo. Este processo permite não só construir uma base sólida de conhecimento como também desenvolver uma compreensão crítica das diferentes abordagens e teorias sobre o tema. Além disso, a revisão bibliográfica oferece novas perspectivas sobre as metodologias mais usadas na área e suas limitações, contribuindo para uma análise comparativa e reflexiva sobre o assunto. A Figura 8 demonstra, através de um fluxograma, os passos comumente tomados para a realização de uma pesquisa bibliográfica.

Figura 8 – Etapas da pesquisa bibliográfica



Fonte: Adaptado de GIL, 2008.

A pesquisa foi desenvolvida a partir de bases de dados acadêmicas, incluindo artigos científicos, livros, teses e publicações de periódicos especializados no tema, garantindo, assim, que as fontes utilizadas sejam consistentes e de credibilidade reconhecida (Bocato, 2006). Inicialmente, foram definidos os critérios de busca e seleção dos materiais bibliográficos; com base em palavras-chave que representam o foco do estudo, essa etapa permite delimitar os textos que são pertinentes ao trabalho, priorizando aqueles que apresentam relevância atual ou abordagens inovadoras sobre o tema.

Por fim, ressalta-se que esta pesquisa será limitada aos materiais bibliográficos disponíveis, o que pode restringir a abrangência das conclusões em função de eventuais lacunas na literatura, que exemplificam a necessidade de novos estudos acerca do tema proposto (Bocato, 2006).

4 DADOS TÉCNICOS DE PLANTAS DE GASEIFICAÇÃO E RESULTADOS

A tecnologia de conversão de biomassa em gás de síntese vem ganhando força e se tornando mais usual ao longo dos últimos anos. Destaca-se o Hemisfério Norte, com Europa e América do Norte, e países com elevada demanda de energia, como China e Índia (Aimi et al., 2024).

Embora ainda haja um caminho a ser trilhado para que esta tecnologia se torne acessível e de fácil instalação ao redor do mundo, já pode-se encontrar diversas plantas em funcionamento (Manzano, 2007).

2.3 DADOS TÉCNICOS

Para a construção do descritivo foi utilizado de relatórios enviados para a AIE (Agência Internacional de Energia). Na sequência, apresentam-se algumas das maiores e mais consolidadas plantas de gaseificação existentes no mundo, assim como um projeto ainda não operante. Além do critério da relevância da planta, também foi considerado a quantidade de material técnico disponível sobre ela, para que fosse possível dar continuidade ao estudo.

2.3.1 Planta GoBiGas (Suécia)

A planta GoBiGas utilizava-se de dois processos para o seu funcionamento: o primeiro sendo a conversão de biomassa (resíduos florestais) em gás de síntese com o uso de um reator de leito fluidizado, com eficiência térmica variando na casa de seus 70%; e o segundo, a transformação do gás de síntese em biometano, a partir da metanação (Goteborg Energi, 2015).

O biometano produzido tinha como destino a rede de distribuição de gás natural do país, onde a ideia era reduzir o consumo de combustível fóssil e aumentar o uso de combustíveis renováveis. A planta de GoBiGas gerava, aproximadamente, 20 megawatts de biometano por ano, que era empregado para aquecer mais de 10.000 residências (Goteborg Energi, 2015).

Devido a concorrência e baixo preço do gás natural, a planta teve seu funcionamento encerrado 4 anos após seu comissionamento (2014 a 2018). Embora não esteja mais em funcionamento, nos demonstrou a viabilidade técnica do uso de

combustíveis renováveis gerados a partir da gaseificação como sendo uma fonte alternativa ao uso de combustíveis fósseis (IEA Bioenergy, 2015).

Figura 9 – Planta GoBiGas (Suécia)



Fonte: Goteborg Energi, 2015

2.3.2 Planta Choren (Alemanha)

A planta de Choren tinha como objetivo a produção de combustível líquido a partir da biomassa. Assim, pode-se dividir as atividades em dois processos: o primeiro sendo a gaseificação da biomassa e o segundo a síntese de combustíveis líquidos a partir do GS com o uso da técnica FT. A produção anual girava em torno de 18 milhões de litros de combustível líquido, sendo o principal o biodiesel (Rudloff, 2010).

O gaseificador utilizado em Choren era o de leito fluidizado circulante, para garantir uma maior taxa de conversão da matéria orgânica em gás de síntese, devido a recirculação. A biomassa empregada no gaseificador eram restos de madeira e palha (Choren, 2008).

O objetivo da planta de Choren era de provar a viabilidade da conversão de biomassa em combustíveis líquidos, para reduzir o uso de combustíveis fósseis e impactar positivamente na sociedade (Choren, 2008).

Devido as dificuldades financeiras e de se manter competitiva, a planta de Choren foi interrompida. Teve seu funcionamento ativo entre 2008 e 2011 (Gazzoni, 2012).

Figura 10 – Planta Choren (Alemanha)



Fonte: Rudloff, 2010

2.3.3 India Glycols Ltd (Índia)

Devido sua elevada demanda energética, a Índia vem investindo em fontes de energias renováveis. Como exemplo, temos a planta de gaseificação India Glycols Ltd, que visa a produção de biometanol a partir de resíduos agrícolas.

O objetivo é a substituição parcial do metanol de fontes fósseis pelo biometanol vindo da gaseificação e pós-processamento do gás de síntese. O projeto visa a fabricação de 5 toneladas diárias de biometanol (Vishal, 2018).

O processo utiliza um gaseificador de leito fluidizado que converte a biomassa em GS, que posteriormente é injetado em um reator com controle de temperatura, pressão e uso de catalisadores, onde é gerado o biometanol (Vishal, 2018).

Além de estar gerando energia renovável, a planta de India Glycols Ltd consome resíduos agrícolas, ajudando no controle de queimadas, um dos grandes agravantes da poluição atmosférica na Índia (Vishal, 2018).

A planta começou a operar em 2013 e está em progresso até os dias de hoje, partindo de um piloto e ganhando maiores proporções. Outro ponto importante, a geração de biometanol a partir da gaseificação faz parte da estratégia da Índia de ser cada vez menos dependente da importação de combustível fóssil, aumentando sua segurança energética.

Figura 11 – Planta India Glycols Ltd (Índia)



Fonte: Vishal, 2018

2.3.4 Northwest Advanced Bio-Fuels – NWAB (Estados Unidos da América)

O projeto NWABF tem como objetivo a utilização da biomassa encontrada, principalmente nos estados do nordeste dos EUA, para produção de combustível para aviação, diminuindo a emissão de gases poluentes. O objetivo é a produção de 60 milhões de galões de combustíveis por ano (aproximadamente 227 milhões de litros). Empresas aéreas americanas já possuem contratos com previsão de compra de tais combustíveis, para auxiliar na redução da emissão de gases poluentes (Biofuels Central, 2023).

Similar a planta de Choren, o projeto NWABF mira a utilização de um gaseificador de leito fluidizado para transformar a biomassa em gás de síntese para, posteriormente, ser dispensada em um reator para a síntese de cadeias de hidrocarbonetos, através do processo de Fischer-Tropsch (Business Wire, 2021).

O uso de resíduos florestais, além de ajudar com a produção de combustível renovável e “descarte” correto, previne os incêndios florestais, algo que vem se agravando ao longo dos últimos anos em solo americano (Northwest Advanced Biofuels, 2024).

2.3.5 Resumo dos Dados Técnicos

A Tabela 2 foi construída de forma a reunir e resumir as informações técnicas acerca das plantas anteriormente discutidas, conforme segue.

Tabela 2 – Resumo das informações técnicas – plantas de gaseificação

Planta	Capacidade de Produção	Tecnologia
Choren (Alemanha)	18 milhões de litros/ano de biocombustível	Leito Fluidizado Circulante + Reator Fischer-Tropsch
GoBiGas (Suécia)	20 MW de biometano por ano	Leito Fluidizado + Reator para metanação
India Glycols Ltd (Índia)	5 toneladas/dia de biometanol	Leito Fluidizado + Reator para metanol
NWABF (EUA)	60 milhões de galões/ano de combustível	Leito Fluidizado + Reator Fischer-Tropsch

Planta	Pré-Processamento	Matéria Prima
Choren (Alemanha)	Trituração e secagem	Madeira residual e palha
GoBiGas (Suécia)	Trituração e secagem	Resíduos florestais
India Glycols Ltd (Índia)	Trituração e secagem	Resíduos agrícolas
NWABF (EUA)	Trituração, secagem e ajuste de tamanho	Resíduos florestais

Planta	Produto Final	Tratamento ao gás de síntese
Choren (Alemanha)	Diesel sintético	Síntese de Fischer-Tropsch
GoBiGas (Suécia)	Biometano	Metanação
India Glycols Ltd (Índia)	Biometanol	Síntese de metanol
NWABF (EUA)	Combustível para empresas aéreas	Síntese de Fischer-Tropsch

Planta	Status da Planta
Choren (Alemanha)	Desativada
GoBiGas (Suécia)	Desativada
India Glycols Ltd (Índia)	Em operação
NWABF (EUA)	Em construção

Fonte: Autoria própria

2.4 RESULTADOS

A Tabela 2 nos permite realizar algumas análises e comparar com o que, de fato, era esperado.

O fato de todas as plantas utilizarem de um gaseificador de leito fluidizado corrobora com o que foi apresentado anteriormente. Em escala industrial, é preferido os gaseificadores de leito fluidizado devido sua maior taxa de aproveitamento e conversão da biomassa em gás de síntese, permitindo que o processo seja mais competitivo frente outras tecnologias (Lima, 1994).

Outro ponto importante de se ressaltar é que nas quatro plantas que tiveram seus aspectos técnicos levantados, todas utilizam do GS para a produção de algum combustível líquido, o que nos demonstra o grau de investimento e preocupação da sociedade (principalmente de países ricos, desenvolvidos ou populosos – evidenciado pelo fato das plantas estarem localizadas na Europa, Estados Unidos e Índia) em substituir, ainda que de forma não completa, a utilização de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis (Oliveira, 2022). Embora atualmente o GS proveniente de plantas de gaseificação são, em sua maioria, utilizados para produção de combustíveis líquidos e na indústria química, a projeção é que aumente drasticamente seu uso na geração de energia elétrica, através do uso de ciclos combinados gás-vapor e até motores (NETL, 2012).

Como já exposto durante a revisão bibliográfica, o pré-processamento da biomassa se faz de suma importância, e pode ser verificado através da Tabela 2. A secagem e trituração, comum em todas as plantas estudas, são responsáveis por, sequencialmente, diminuir a quantidade de umidade presente na biomassa e garantir que a energia inserida no processo de gaseificação através da combustão parcial da biomassa seja utilizada, de fato, para que a reação termoquímica ocorra, não

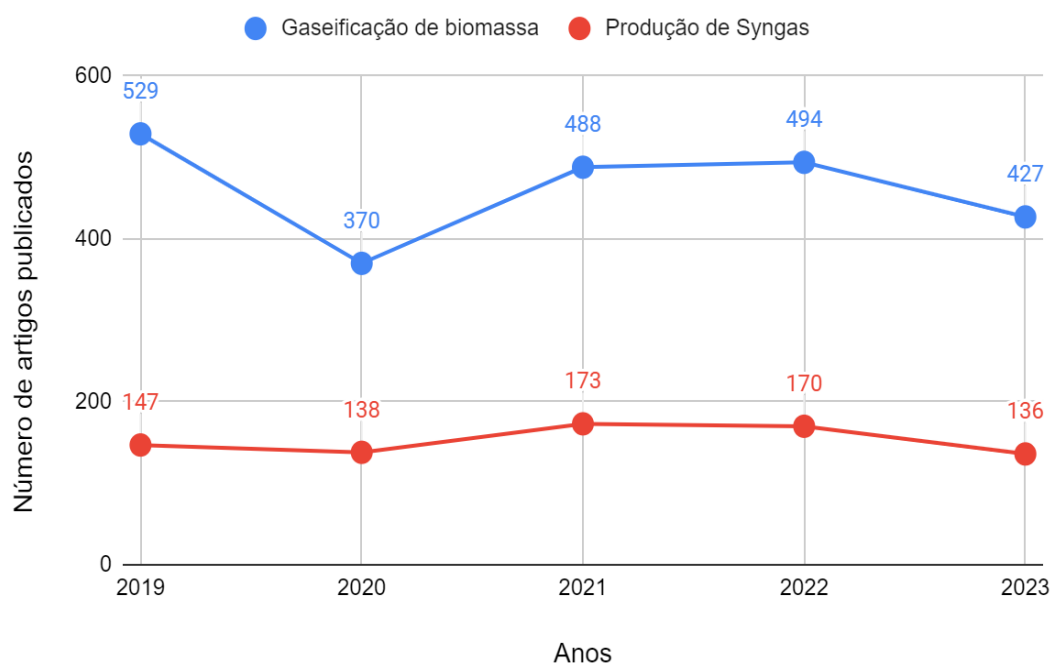
ocorrendo perdas para a evaporação de umidade presente na matéria biomassa (Fernandes et al., 2019), enquanto que a trituração é responsável por conferir as partículas de biomassa dimensões menores, consequentemente aumentando sua área de contato e facilitando na troca térmica e tornando a reação de gaseificação mais homogênea (Souza, 2020).

O tipo de biomassa utilizado em cada planta está atrelado a aspectos geográficos e econômicos de cada país. A planta da Índia, por exemplo, utiliza de resíduos agrícolas, devido ao fato de o país ser um dos maiores produtores de uma grande variedade de produtos como cereais, leguminosas, oleaginosas e fibras (BMI Research, 2018). Já as demais, utilizam de resíduos florestais, o que confere uma maior densidade energética a biomassa utilizada (Gonçalves et al., 2021).

Além dos dados expostos e discutidos sobre as plantas de gaseificação, se faz interessante demonstrar, através de uma revisão bibliométrica, a relevância do tema abordado. Assim, foi construído o Gráfico 1, expondo o volume de artigos publicados no Brasil com os temas "Gaseificação de Biomassa" e "Produção de Syngas" contidos no título dos mesmos ao longo dos anos de 2019 a 2024, podendo ser encontrados no site Scopus. Observa-se que o número de publicações se manteve praticamente constante, indicando que o tema permanece no interesse do meio científico na atualidade.

Ou seja, é possível inferir que as questões relacionadas à valorização de biomassa e à produção de combustíveis alternativos a partir de resíduos continuam a ser áreas de pesquisa relevantes. Esses dados reforçam a importância da temática, que se alinha aos objetivos de transição energética e desenvolvimento sustentável, especialmente no Brasil, onde a disponibilidade de biomassa contribui para uma perspectiva de longo prazo na substituição de fontes de energia fósseis.

Gráfico 1- Volume de artigos publicados com os termos “Gaseificação de biomassa” e “Produção de *syngas*” no título entre os anos 2019 e 2024 no Brasil.



Fonte: Scopus (2024)

5 CONCLUSÃO

A tecnologia de gaseificação está em constante evolução e se apresenta como sendo uma ótima alternativa frente as fontes de energia provenientes de combustíveis fósseis. Com o aumento da população e maior uso de eletricidade por parte da sociedade, cada vez mais se faz importante o desenvolvimento e investimento em tecnologias como tal.

Além de ser uma fonte de energia renovável (seja no uso em ciclos combinados ou na geração de combustíveis sintéticos), o consumo da biomassa pela gaseificação também atua como um modo de descarte dela, evitando que seja realizado de modo incorreto, gerando ainda mais gases poluentes, como por exemplo, através de incêndios.

Embora traga muitos pontos positivos, ainda há desafios a serem combatidos, como baratear esta tecnologia, através de mais investimentos e estudos, para que possa confrontar as fontes convencionais de energia e se tornar cada vez mais comum. Os gases de síntese possuem um poder calorífico muito inferior aos combustíveis fósseis, como já discutido, sendo assim, precisamos de uma eficiência muito alta no processo e de baixo custo, para tornar viável.

Entre as plantas pesquisadas, nenhuma utilizava do gás de síntese como fonte de combustível direta para geração de energia elétrica em ciclos combinados com turbina a gás e vapor. Isto se dá ao fato do maior desenvolvimento das tecnologias associadas a produção de combustível sintético e do incentivo, comumente dado pelos governos, para a substituição de combustíveis fósseis por renováveis.

Por fim, fica evidente que muito esforço vem sendo colocado sobre a tecnologia de gaseificação de biomassa, com incentivo em pesquisas de universidades de diversos países, além do incentivo governamental por parte, principalmente, de países desenvolvidos. Embora ainda não tenhamos total domínio sobre tal tecnologia a ponto de tornar comum seu uso em escala industrial e uso comercial, com as constantes pesquisas este panorama tende a mudar.

REFERÊNCIAS

AIMI, C. A.; MACIEL, G. P. S. Estudo da viabilidade de implantação de uma planta de gaseificação do lixo urbano para geração de energia elétrica. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 31., 2019, Porto Alegre. **Anais [...]** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br>. Acesso em: 3 dez. 2024.

ALBUQUERQUE, J. *et al.* Produção de hidrogênio por gaseificação de biomassa utilizando vapor de água como agente oxidante. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, São Paulo, v. 37, n. 3, 2020.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. **International Journal of Integrated Waste Management: Science and Technology**, Caserta, v. 32, n. 4, p. 625-639, 2011.

BIOFUELS CENTRAL. Northwest advanced biofuels sustainable aviation fuel project. **Biofuels Central**, Houston, 2023. Disponível em: <https://biofuelscentral.com/northwest-advanced-biofuels-sustainable-aviation-fuel-project/>. Acesso em: 3 dez. 2024.

BMI RESEARCH. **India**: agribusiness report Q1 2018: includes 5 years forecasts to 2021. London, 2017a. Disponível em: <http://www.bmiresearch.com>. Acesso em: 22 out. 2024.

BOCCATO, V. R. C. Uma pesquisa bibliográfica: princípios e fundamentos. **Revista Fucamp**, Monte Carmelo, v. 5, n. 6, p. 64-83, 2006.

BRITO, A. *et al.* Formação de alcatrão e compostos indesejáveis em processos de gaseificação de biomassa. **Revista Brasileira de Bioenergia**, Botucatu, v. 1, p. 45-57, 2010.

BUSINESS WIRE. **Northwest advanced bio-fuels secures construction equity commitment, MOU for sustainable aviation fuel project in Washington State**. Business Wire, San Francisco, 2021. Disponível em: <https://www.businesswire.com/news/home/20210323005427/en/Northwest-Advanced-Bio-Fuels-Secures-Construction-Equity-Commitment-MOU-for-Sustainable-Aviation-Fuel-Project-in-Washington-State>. Acesso em: 10 ago. 2024.

CATIZZONE, E. *et al.* Purificação de águas residuais de purificador de gás de síntese derivado de biomassa usando biochar e carvões ativados. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 18, n. 8, ref. 4247, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph18084247>. Acesso em: 10 nov. 2024.

CHOREN. **CHOREN - Purdue, May 2008**. West Lafayette, 2008. Disponível em: <https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/presentations/CHOREN-Purdue-May2008.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.

COPA, J. R. *et al.* Techno-economic assessment of the use of syngas generated from biomass to feed an internal combustion engine. **Energies**, v. 13, n. 12, p. 3097, 2020.

COSTA, M. *et al.* Gaseificação com ar e sua aplicação em pequenas e médias escalas. **Journal of Biomass Energy**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, 2019.

FERNANDES, L. *et al.* Secagem da biomassa como pré-tratamento essencial para gaseificação eficiente. **Energy and Biomass Research Journal**, Lavras, v. 22, n. 3, 2019.

FERREIRA, L. *et al.* Utilização de CO₂ como agente de gaseificação em processos sustentáveis. **Sustainable Energy Journal**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, 2019.

FONTES, J. C.; MOTA, L. P. Gaseificação de biomassa: uma análise dos resíduos agrícolas e animais como fontes de energia renovável. **Revista Brasileira de Engenharia e Energia**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 134-145, 2018. Disponível em: <https://www.revista.eng.br>. Acesso em: 10 nov. 2024.

GAZZONI, J. Energia sustentável para todos. **BiodieselBR**, Curitiba, 2025. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/gazzoni/energia-sustentavel-para-todos-180912>. Acesso em: 3 dez. 2024.

GBA, Instituto de Energia e Ambiente. **Fontes de biomassa para energia renovável: potenciais e desafios**. São Paulo: GBio, 2020. Disponível em: <https://gbio.webhostusp.sti.usp.br>. Acesso em: 10 nov. 2024.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GÓMEZ-BAREA, A.; LECKNER, B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 4, p. 444-509, 2010.

GONÇALVES, A. S.; PEREIRA, M. R.; OLIVEIRA, L. S. Estudo sobre o uso de biomassa lenhosa na gaseificação para geração de energia. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 45-56, 2021.

GÖTEBORG ENERGI. **The GoBiGas Project**: demonstration of the production of biomethane from biomass. Gothenburg: Göteborg Energi AB, 2015. Disponível em: https://www.goteborgenergi.se/Files/Webb20/Kategoriserad%20information/Forsknin%20gsprojekt/The%20GoBiGas%20Project%20-%20Demonstration%20of%20the%20Production%20of%20Biomethane%20from%20Biomass%20v%20230507_6_0.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

IEA BIOENERGY. **GoBiGas webinar**, IEA Bioenergy, Gothenburg, 2018. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/06/GoBiGas_Webinar_20_june_final.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

KINTO, A. H. *et al.* **Gaseificação em leito fluidizado**. São Paulo: Cenbio, 2002. Disponível em: <http://www.cenbio.com.br>. Acesso em: 10 nov. 2024.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: tratamento e biorremediação**. São Paulo: Hemus, 1995.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento térmico de resíduos**. 1994. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1994.

MANZANO AGUGLIARO, F. Gaseificação de resíduos de inverno para a obtenção de energia elétrica no sul da Espanha: localização mediante SIG. **Interciencia**, Caracas, v. 32, n. 2, p. 131-136, 2007. Disponível em: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0378-18442007000200012. Acesso em: 30 ago. 2024.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MENDIBURU, L. *et al.* Estudo sobre o uso de gás de síntese de biomassa em motores de combustão e turbinas a gás. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 110-123, 2014.

MOTA, E.; MARTINS, C.; LIMA, R. Propriedades e conversão de biomassa: desafios e perspectivas para o futuro energético. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL, 1., 2018, Rio de Janeiro. **Anais[...]** Rio de Janeiro: CBE, 2018. p. 110-121. Disponível em: <https://www.cbe.com.br/anais>. Acesso em: 10 nov. 2024.

MOTTA, I. L. *et al.* Biomass gasification in fluidized beds: a review of biomass moisture content and operating pressure effects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 94, p. 998-1023, 2018.

NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (NETL). **Worldwide gasification capacity**. Albany, [2024?]. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

NORTHWEST ADVANCED BIOFUELS. **Technology**. Northwest Advanced Biofuels, 2024. Disponível em: <https://www.nwabiofuels.com/technology>. Acesso em: 30 ago. 2024.

NUNES, J. R. **Biomass gasification as an industrial process with effective proof-of-concept**: a comprehensive review on technologies, processes and future developments. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020.

OLIVEIRA, M. A. **Biomassas e biocombustíveis competitivos para estruturação do mercado brasileiro de hidrogênio**. Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2022. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 10 nov. 2024.

OLIVEIRA, T. *et al.* Torrefação da biomassa: influências nas propriedades do syngas. **Bioenergy Journal**, Springer, v. 12, n. 1, 2018.

RAUCH, R. *et al.* Problemas de corrosão em sistemas de gaseificação de biomassa e alternativas para mitigação. **Jornal de Energia Renovável**, São Paulo, v. 3, p. 201-220, 2014.

RUDLOFF, H. **The CHOREN BTL Beta Plant**. Gülzow-Prüzen: FNR, 2010.

Disponível em:

https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/allgemein/images/veranstaltungen/BtL_2010/beitr%C3%A4ge/rudloff2.pdf. Acesso em: 30 ago. 2024.

SANKIR, M.; SANKIR, N. D. **Tecnologias de produção de hidrogênio: estado atual e desenvolvimentos futuros**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2017.

SANTANA, H. E. *et al.* Gaseificação da biomassa lignocelulósica e aplicações do gás de síntese. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 12., p. 201-202, 2023, São Cristóvão. **Anais [...]** São Cristóvão: UFS, 2023.

SANTANA, H. E. *et al.* Gaseificação da biomassa lignocelulósica e aplicações do gás de síntese. *In*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 12., 2023, São Cristóvão. **Anais [...]**. São Cristóvão: SIMPROD, 2023. p. 201-202.

SANTOS, R. G.; ALMEIDA, M. L.; SILVA, P. A. P. Desafios e soluções para a gaseificação de biomassa: um estudo comparativo entre diferentes fontes de biomassa. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA RENOVÁVEL, p. 221-230, 2021, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: CBE, 2021. Disponível em: <https://www.cbe.com.br>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SANTOS, R. M.; XAVIER, A. B.; PEREIRA, C. L. Resíduos animais na gaseificação: uma alternativa para a geração de energia no meio rural. **Journal of Renewable Energy**, Amsterdã, v. 8, n. 3, p. 241-253, 2021.

SILVA, F. J.; OLIVEIRA, M. A.; SOUZA, C. M. Biometanol: produção, caracterização e usos. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, São Paulo, v. 2, p. 128-137, 2022.

SILVA, R. *et al.* O uso de oxigênio puro na gaseificação e suas vantagens industriais. **Revista Química Industrial**, Rio de Janeiro, v. 45, n. 6, 2021.

SOUZA, A. *et al.* Efeitos da moagem na eficiência da gaseificação da biomassa. **Journal of Biomass Processing**, Basel, v. 17, n. 5, 2020.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Energia e Ambiente. **Fontes de biomassa para energia renovável: potenciais e desafios**. São Paulo: GBio, 2020. Disponível em: <https://gbio.webhostusp.sti.usp.br>. Acesso em: 10 nov. 2024.

VIANA, N. M. *et al.* Biomassas e biocombustíveis competitivos para estruturação do mercado brasileiro de hidrogênio carbono neutro ou negativo. *In*: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 7., 2023, Brasília, DF.

Anais [...]. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 243. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1158347/1/Biomassa-e-biocombustiveis.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.

VISHAL, K.; SHARMA, R.; SINGH, R. Advanced biofuels in India: a comparative analysis between India and the EU. *In*: SINGH, A. *et al.* **Advances in Biofuels and Bioenergy**. Cham: Springer, 2018. p. 145-168. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328368686_Advanced-biofuels-in-India-A-comparative-analysis-between-India-and-the-EU-June_2018. Acesso em: 27 out. 2024.