

CARLOS EDUARDO BARROZO

**PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

SÃO PAULO

2023

CARLOS EDUARDO BARROZO

**PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DO
APROVEITAMENTO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU**

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para conclusão do curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Prof.^a Patricia Helena Lara dos Santos Matai

SÃO PAULO

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Barrozo, Carlos Eduardo

PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DO APROVEITAMENTO
DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU / C. E. Barrozo -- São Paulo, 2023.
72 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída
e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia através do uso de biomassa 2.Casca da castanha de caju na
conversão de biomassa 4.Tipos de pirólise e gaseificadores 5.Gás de síntese
como fonte de energia por meio da pirólise e gaseificação da casca de castanha
de caju I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de
Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao meu Deus por me permitir aprender sobre sua criação e por sua benignidade imerecida em todos os momentos da minha vida. À minha esposa Denise pela compreensão e apoio em meses de estudo e dedicação ao qual nos privou de momentos juntos e aos meus pais por todo incentivo e sacrifícios que fizeram para que eu pudesse prosseguir com os meus estudos.

Agradeço a minha orientadora, Prof.^a Dr^a. Patricia Helena Lara dos Santos Matai que aceitou entrar neste desafio comigo e sempre disponível demonstrou paciência e apoio durante todas as etapas dessa jornada. Muito obrigado.

RESUMO

PRODUÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DO APROVEITAMENTO DA CASCA DA CASTANHA DE CAJU

A presente pesquisa consiste em apresentar formas de obtenção de gás de síntese através do processo de gaseificação e pirólise da casca de castanha de caju, biomassa proveniente da região nordeste do Brasil e também compará-la com outras biomassas comumente encontradas em no país. O objeto de estudo partiu da curiosidade de se observar o resultado trazido do contato da castanha de *caju in natura* com brasas de carvão. Esse processo de se observar a torra e a secagem da biomassa em contato com a brasa ardente de carvão resultava em se expelir um líquido viscoso da castanha ocasionando uma forte labareda de calor. A partir desse momento, o processo investigativo é iniciado primeiramente com o objetivo de se entender qual a característica constituinte na castanha de caju capaz de gerar tal efeito. Assim, após pesquisas iniciais foi possível compreender a versatilidade do produto advindo do cajueiro para aplicações em práticas sustentáveis e de energias renováveis quer na utilização do líquido da castanha de caju ou da casca da castanha de caju. Suas principais características fisico-químicas e seu poder calorífico evidenciam tal potencial de ser um conversor para de uso como fonte alternativa de energia.

Palavras-chave: *caju, casca da castanha de caju, biomassa, pirólise, gaseificação, gás de síntese.*

ABSTRACT

SYNTHESIS GAS PRODUCTION FROM THE USE OF CASHEW NUTS SHELL

The present research consists of presenting ways of obtaining synthesis gas through the process of gasification and pyrolysis of cashew nutshell, biomass from the northeast region of Brazil and also to compare it with other biomasses commonly found in our country. The object of study started from the curiosity of observing the result brought from the contact of cashew nuts in natura with coal embers. In this process of observing the roasting and drying of the biomass by expelling a viscous liquid from the chestnut and this in contact with the burning ember of coal, a strong flame of heat was propagated. From that moment on, the investigative process is initiated firstly with the objective of understanding which constituent characteristic in the cashew nut is capable of generating such an effect. Thus, after initial research, it was possible to understand the versatility of the product from the cashew tree for applications in sustainable practices and renewable energy, whether in the use of cashew nut liquid or cashew nutshell. Its main physical-chemical characteristics and its calorific value show such potential to be a converter for use as an alternative source of energy.

Keywords: *cashew, cashew nutshell, biomass, pyrolysis, gasification, synthesis gas.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Celulose e sua estrutura.....	14
Figura 3.2 – Estrutura de hemicelulose.....	14
Figura 3.3 - Estrutura da lignina.....	15
Figura 3.4 - Estrutura da parede celular.....	15
Figura 3.5 - Fontes de biomassa.....	16
Figura 3.6 – Impacto da umidade na temperatura do processo de gaseificação.....	22
Figura 3.7 - Capacidade instalada de bioenergia.....	23
Figura 3.8 - Diagrama de processo de gaseificação.....	27
Figura 3.9 - Tipos de gaseificadores.....	28
Figura 3.10 - Gaseificador de leito fluidizado circulante.....	33
Figura 3.11 - Processo Fischer-Tropsch.....	35
Figura 3.12 - Cajueiro, <i>Anacardium occidentale</i>	37
Figura 3.13 - Pendúculo de caju, <i>Anacardium microcarpum</i>	38
Figura 3.14 - Castanha de caju, <i>Cassuvium pomiverum</i>	39
Figura 3.15 - Comparativo entre área colhida no Brasil e no mundo de castanha de caju.....	40
Figura 3.16 - Principais produtores mundiais da castanha de caju com evolução anual de produção comparada com o Brasil.....	41
Figura 3.17 - Maiores produtores de cajucultura mundial, 2022.....	41
Figura 3.18 - Gaseificador a batelada utilizado na pirólise lenta da CCC.....	50

Figura 3.19 - CO ₂ , CO e H ₂ obtidos com taxa de aquecimento livre e temperatura de 670°C em processo de pirólise.....	53
Figura 3.20 - CO ₂ , CO e H ₂ obtidos com taxa de aquecimento livre e temperatura de 880°C em processo de pirólise.....	53
Figura 3.21 - Hidrogênio através da conversão de biomassa.....	56
Figura 3.22 - Comparativo entre processo HyPr-RING e gaseificação convencional na conversão de hidrogênio.....	59
Figura 3.23 - Comparativo de custo produtivo de hidrogênio através de gaseificação de biomassa e reforma de vapor de gás natural.....	60
Figura 5.1 - Produção de hidrogênio através de gaseificação de biomassa.....	64
Figura 5.2 - Efeito do uso de absorvedores de CO ₂ no processo de obtenção de gás de síntese.....	65
Figura 5.3 - Produção de gás por meio do processo HyPr-RING através de diferentes fontes de materiais orgânicos.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Amostras de biomassa com poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹) conforme estudo apresentado por Tavares (2016).....	19
Tabela 3.2 – Amostras de biomassa com poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹) conforme estudo apresentado por Figueiredo (2009).....	20
Tabela 3.3 – Amostras de biomassa com análise imediata em percentual de base úmida.....	20
Tabela 3.4 – Análise elementar de amostras de biomassas.....	21
Tabela 3.5 – Performance entre tipos de gaseificadores.....	31
Tabela 3.6 – Características do gaseificador de leito fluidizado.....	31
Tabela 3.7 – Produção de caju nos últimos 4 anos.....	43
Tabela 3.8 – Tipos de pirólise e produtos obtidos.....	44
Tabela 3.9 – Carbono fixo, enxofre, teor de cinzas, matérias voláteis e oxigênio da casca da castanha de caju.....	51
Tabela 3.10 – Percentual de carbono, hidrogênio, nitrogênio e poder calorífico da casca da castanha de caju.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
O	Oxigênio
N	Nitrogênio
CO	Monóxido de Carbono
H₂	Dióxido de Hidrogênio
AA	Ácido Anacárdico
FT	Fischer-Tropsch
Ni	Níquel
CCC	Casca da Castanha de Caju
CO₂	Dióxido de Carbono
ONU	Organização das Nações Unidas
RSU	Resíduo Sólido Urbano
CaO	Óxido de Cálcio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
AFI	Association of Foods Industries
LCC	Líquido da Castanha de Caju
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
CH₄	Metano
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
C₂H₄	Etileno
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Organização do trabalho

2. OBJETIVO

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Biomassa

3.1.1 Energia através do uso de biomassa

3.1.2 Processo de conversão da biomassa

3.1.3 Caju e seus derivados

3.1.4 Produção de caju no Brasil e no mundo

3.1.5 Casca da castanha de caju na conversão de biomassa

3.2 Pirólise de biomassa

3.2.1 Tipos de pirólise e estudos de aplicação

3.2.2 Pirólise da casca da castanha de caju

3.3 Gás de síntese como fonte de energia por meio da pirólise e gaseificação da casca de castanha de caju

4. METODOLOGIA

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

6. CONCLUSÃO

REFERÊNCIAS

1. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias e a facilidade de acesso a produtos e bens de consumo pela população têm gerado a demanda por novas formas de energia. Os efeitos provocados pela utilização de energia de fontes não-renováveis, como a liberação de gases de efeito estufa por meio de combustíveis fósseis na atmosfera, traz a necessidade de se encontrar formas disruptivas de haver energia sustentável e renovável. É preciso haver mudanças na matriz energética global para se atingir as metas estipuladas de geração e emissão de CO₂, pois essa diminuição de emissões está diretamente associada à redução de temperatura global e faz-se necessário evitar que a temperatura global não aumente 1,5°C ao final do século 21 com relação à média de temperatura registrada em 1750 (COP27, 2023). Por isso, ações têm sido promovidas e tomadas no sentido de pressionar as nações do mundo a desenvolver planos factíveis para redução desses gases nocivos. Deste modo, compromissos têm sido intermediados e criados pela Organização das Nações Unidas (ONU), como por exemplo o acordo de Paris, em substituição ao protocolo de Kyoto a partir de 2020, que traz o compromisso de países para o cumprimento deste fim. Assim, a contribuição na forma de energias renováveis na matriz global vêm demandando uma maior representatividade a cada ano e similarmente, tornando-se fundamental na diversificação da matriz energética brasileira. O hidrogênio obtido através do gás de síntese é capaz de ser um protagonista como energético sustentável pois possui o necessário para ser uma alternativa aos atuais problemas ambientais e energéticos possibilitando a sua produção a partir de diferentes fontes primárias renováveis. Como este não emite gases de efeito estufa no momento do consumo, auxiliaria na transição energética necessária para mitigar os efeitos do aquecimento global. Uma fonte primária abundante, sustentável e disponível no Brasil para a produção tanto de gás de síntese e de hidrogênio é a biomassa. O aproveitamento maior da capacidade de uso da biomassa está associado à destinação sustentável dos resíduos coletados quer nas cidades, industrias ou no campo. O Brasil apresenta situação privilegiada nesse sentido pois possui um dos maiores potenciais mundiais de produção de energia através de biomassa. Processos termoquímicos como o uso de gaseificação e pirólise podem ser aplicados na produção de gás de síntese através de biomassa.

Um tipo específico de biomassa que será o tema central desse estudo é a casca da castanha de caju (CCC), que possui baixo valor agregado no processo de cultura do caju, mas que apresenta potencial para a conversão dessa fonte renovável.

1.1 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos:

No capítulo 1 apresenta ao leitor uma visão introdutória do tema, destacando o problema, o incentivo trazido para essa discussão e a importância do estudo realizado;

O capítulo 2 apresenta o objetivo do estudo apresentado;

No capítulo 3 encontra-se a revisão bibliográfica;

O capítulo 4 se destaca a metodologia trazida nesse estudo;

Já no capítulo 5 apresenta os resultados e discussão obtidos no presente estudo;

O capítulo 6 apresenta a conclusão da presente monografia.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a possibilidade de se produzir gás de síntese para obtenção de hidrogênio e suas devidas aplicações através do processo de gaseificação e pirólise, tendo como insumo a casca da castanha de caju (*Anacardium occidentale*).

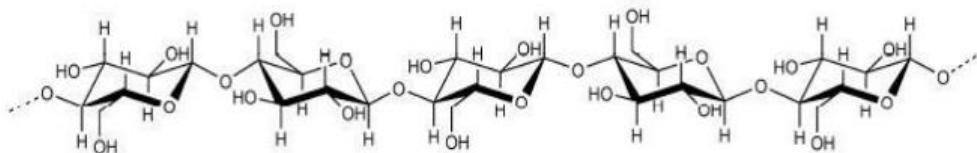
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa

A biomassa têm na sua constituição substâncias de matéria orgânica, podendo esta ser de origem animal ou vegetal. Embora seja um hidrocarboneto, a biomassa se difere dos combustíveis fósseis como por exemplo o petróleo, pois têm átomos de oxigênio na sua estrutura química. De acordo com Kimura (2009), alguns exemplos de biomassa que podem ser citados são tecidos lenhosos de árvores, resíduos agrícolas, espécies herbáceas, resíduos de madeira, grama, serragens e bagaços. Além desses, resíduos industriais tais como o papel utilizado em processos de produção, o lixo urbano (resíduos sólidos) e biosólidos se caracterizam como biomassa. Em relação aos resíduos vegetais, os agentes principais constituintes de biomassa são:

-*Celulose*: As ligações celulares da celulose são feitas por meio de ligações β -1,4-glicosídicas o que a torna um polímero de glicose e o componente primário da parede celular da fibra vegetal. A glicose está altamente compreendida na celulose. Estudos indicam que há aproximadamente 15 a 15.000 moléculas de glicose em apenas uma única molécula de celulose, que na média, é em torno de 3.000 unidades. A principal característica da celulose é ser insolúvel e resistente a várias reações químicas e isso a faz ser comumente utilizada em processos industriais devido também ser o principal composto das paredes celulares de plantas e também o polissacarídeo em maior abundância na Terra. A celulose representa em percentual de massa seca aproximadamente 30% do valor da massa total em paredes primárias e cerca de 50% a 80% em paredes secundárias. Sua fórmula molecular é $C_6H_{10}O_5n$, em que n significa a quantidade de grau de polimerização que varia de uma espécie vegetal para outra. Já nas paredes celulares, a miofibrila é a resultante das cadeias de celulose. Elas se unem lateralmente através do processo de ligação com hidrogênio. Na Figura 3.1 é possível observar como a miofibrila se forma.

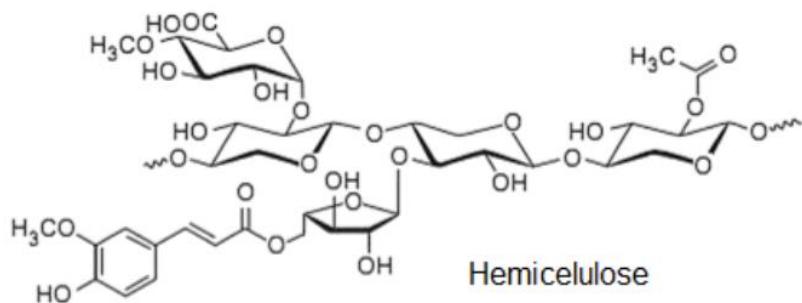
Figura 3.1 – Celulose e sua estrutura



Fonte: Ogata (2013)

- *Hemicelulose*: As hemiceluloses são polissacarídios que adicionadas a outros componentes, formam a parede celular das células vegetais. Tem-se por característica ser o segundo carboidrato mais abundante na Terra e é definido como um heteropolímero curto constituído por ácidos, pentoses e hexoses. Por ser um material hidrolisado, sua estrutura pode variar e apresentar baixa cristalinidade em relação à celulose. Conforme discutido por Saha et al. (2003), por ser um polímero amorfó, a hemicelulose é classificada de acordo com os açúcares em sua estrutura, podendo conter os seguintes componentes: galactanas, glucanas, mananas, xilananas e galacturananas, e ainda podendo também conter outros açúcares mas menor quantidades como α -L-fucose e α -L-ramnose. Através da Figura 3.2 é possível observar a estrutura da hemicelulose.

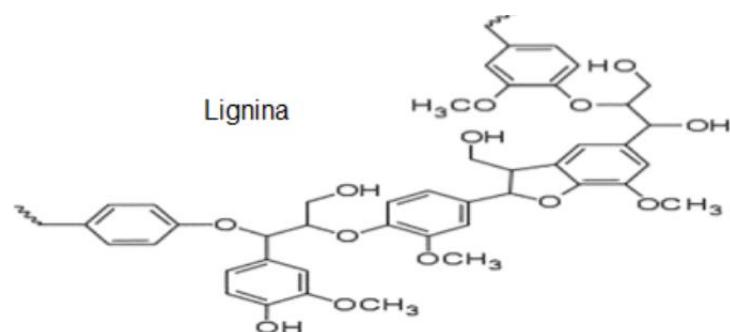
Figura 3.2 – Estrutura da Hemicelulose



Fonte: Ogata (2013)

- *Lignina*: A lignina é um material que têm por característica trazer resistência, rigidez e impermeabilidade aos ataques biológicos nos tecidos vegetais. Segundo o citado por D'Almeida (1988), a lignina atua como ponte de ligação entre as fibrilas de celulose, provendo baixa reatividade dos materiais lignocelulósicos. Esta estrutura celular é complexa constituída pela polimerização de três álcoois conforme evidenciado na Figura 3.3. A formatação dessa estrutura a torna capaz de prover resistência à compressão na parede celular.

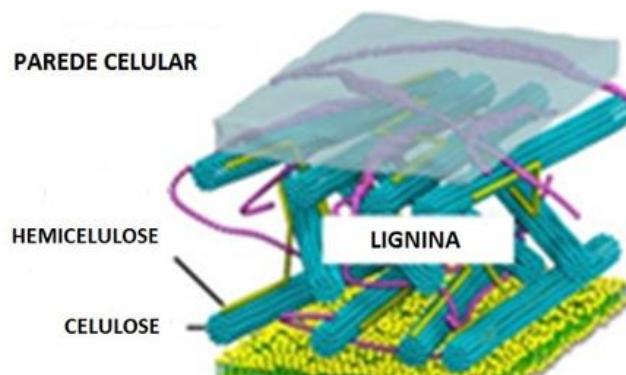
Figura 3.3 – Estrutura da Lignina



Fonte: Ogata (2013)

Na Figura 3.4 é possível observar a estrutura celular vegetal completa e unificada com a composição entre lignina, celulose e hemicelulose.

Figura 3.4 – Estrutura da Parede Celular

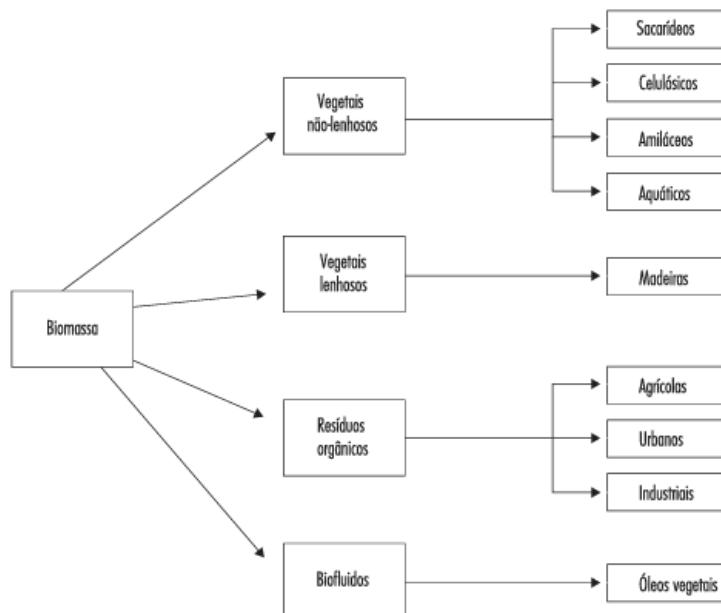


Fonte: Farinas (2011)

3.1.1. Energia através do uso de biomassa

A biomassa utilizada para fins de produção de energia pode ser compreendida em uma gama abrangente de resíduos potencialmente capazes de gerar fontes alternativas de energia (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008). A Figura 3.5 apresenta uma representação dos grupos de fontes de biomassa.

Figura 3.5 – Fontes de biomassa.



Fonte: Cortez; Lora; Ayarza (2008)

Segundo Cortez; Lora; Ayarza (2008), a biomassa se divide em 4 grupos primários, sendo eles os vegetais não-lenhosos, vegetais lenhosos, resíduos orgânicos e biofluídos. No Brasil há grande geração e uso de biomassa quer nos processos agrícolas ou industriais sendo que esses dois setores são os grandes responsáveis pela geração dos seguintes resíduos de biomassa: resíduos florestais, vegetais, industriais, e animais. Além desses, os resíduos sólidos urbanos originários de residências e comércio também contribuem com o impacto ambiental com destinação inapropriada do lixo. A seguir estão elencados principais constituintes de biomassa de acordo com o seu devido processo de uso.

-Resíduos Vegetais: Os resíduos vegetais podem ser originados de sobras de alimentos ou resíduos de processamento de uma matéria prima, tendo por característica ser substâncias ricas em matéria orgânica. O Brasil é mundialmente conhecido por ser um grande exportador de produtos agrícolas para o mundo, porém, em consequência disso é também um grande gerador de resíduos associados ao processo de lavoura e do desmatamento das florestas. Resíduos como palha, folhas, sobra de madeiras, tocos, galhos, resíduos de serragens, serrapilheira, cascas e caules têm se tornado um grande problema se não descartados adequadamente. Diante das melhorias trazidas ao agronegócio e com a ajuda da tecnologia, anualmente é percebido um acréscimo percentual de colheita de safras das quais em consequência, também se resulta no acréscimo de resíduos deixados no campo. Através de estudos empregados para o uso do resíduo vegetal como fonte alternativa de energia se evidenciou que o poder calorífico médio (não especificado pelo autor se poder calorífico superior ou poder calorífico inferior) desse insumo em matéria seca é de 15,7 MJ/kg tornando-se factível ao uso energético.

-Resíduos Orgânicos Urbanos: Os resíduos urbanos são obtidos através do descarte de matéria orgânica domiciliar ou comercial, sendo esta principalmente concentrada nos grandes centros urbanos. No Brasil o tema resíduo urbano é um grande problema, pois de acordo com o IPEA (2021), aproximadamente 160 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos em média são gerados todos os dias no país. Este mesmo instituto traz a comparação da geração de RSU no Brasil entre 2010 e 2019, sendo importante destacar que em 2010 cerca de 56,8% do total de lixo gerado no país era devidamente destinado a aterros sanitários e em 2019, o percentual de destinação correta do lixo passou a ser de 59,5%. Mas segundo o artigo divulgado pela GNPW Group (2021), não basta apenas fazer a destinação correta dos resíduos mas sim saber como os converter em energia. Por exemplo, o poder calorífico médio inferior do resíduo domiciliar 5,44 MJ/kg. O Japão é o país que menos envia resíduos para aterros mas é o que mais utiliza o RSU para recuperação de energia, com aproximadamente cerca de 78%. Dinamarca e Suécia, que recuperam energeticamente mais de 50% do seu lixo.

-Resíduos Orgânicos Industriais: Os resíduos industriais são os gerados no meio de processamento e produção dos bens de consumo e das instalações industriais. Os tipos de resíduo produzidos podem ser aparas, cavaco, pó de serra, etc. Dependendo da aplicação da indústria, resíduos como bagaço de frutas, sabugos e palhas também são obtidos e altamente possível de ser aplicados em conversão energética. Atualmente esses itens são comumente usados na retroalimentação dos processos de produção industrial como na queima direta em fornos e caldeiras ou de maneira mais inovadora, por meio da biodigestão anaeróbia. O rejeito do processo industrial também é reaproveitado para a produção do biogás. Por exemplo, resíduos da produção de álcool, leite e seus derivados e até rejeitos de matadouros podem ser utilizados para alimentar o processo fabril.

-Resíduos Orgânicos Animais: O aproveitamento energético das criações animais se justificam pois, por exemplo, segundo o informativo divulgado pelo IBGE (2022), no ano de 2021 o Brasil obteve o recorde de rebanho bovino composto por mais de 224 milhões de cabeças de gado, sendo este o maior índice da série histórica, além de ser forte exportador de carne aviária e suína. Os dejetos desses animais são transformados em fertilizantes melhorando as características físicas, químicas e biológicas do solo. Porém esses também podem ser aplicados no aproveitamento energético pelo processo de biodigestão onde a queima do gás metano produzido nesse processo pode ser empregada ao uso de geradores para produção de eletricidade.

Com essas fontes energéticas disponíveis e com tecnologias presentes é possível se fazer a aplicação de processos de conversão biológico ou termoquímico da biomassa. Diferentes métodos e processos de utilização do processo de conversão de energia podem ser aplicados de acordo com o tipo de biomassa a ser utilizada como insumo. Citando novamente o exemplo e o poder energético dos resíduos no Brasil, segundo a AGÊNCIA BRASIL (2019), houve em 2019 a geração de 79.000.000 toneladas de resíduos sólidos sendo que estes produtos advindos do lixo poderiam gerar, conforme o mesmo estudo 100.500 MW/ano de energia. Porém, segundo os estudos trazidos por Figueiredo (2009), “Uma das principais propriedades investigadas para a

utilização de uma biomassa como combustível é a quantidade de calor que o provável combustível libere através da queima de uma unidade de massa, ou seja, o poder calorífico". Para isso, faz-se necessário observar os diferentes dados de poder calorífico das diferentes fontes de biomassa usualmente encontrada no Brasil. Assim, os dados trazidos por Figueiredo (2009) e por Tavares et al. (2010) contidos nas Tabelas 3.1, 3.2 apresentam o poder calorífico das diferentes biomassas, já as Tabelas 3.3 e 3.4 trazem os dados de análise imediata e análise elementar dessas amostras respectivamente.

Tabela 3.1 – Amostras de biomassa com poder calorífico superior (MJ.kg⁻¹) conforme estudo apresentado por Tavares et al. (2010).

Cultura	Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)
Café (casca e resíduos)	15,90
Cacau (casca e resíduos)	16,32
Coco-da-baía	19,07
Castanha de caju	19,66
Soja (palha e resíduos)	13,81
Milho (palha, sabugo e resíduos)	14,94
Cana-de-açúcar (bagaço e torta de filtro – umidade de 30%)	15,23
Feijão (palha e resíduos)	15,48
Arroz (casca e palha)	13,81
Trigo (palha e resíduos)	15,69
Mandioca	13,83

Fonte: Tavares et al. (2010)

Tabela 3.2 – Amostras de biomassa com poder calorífico superior (MJ/kg) conforme estudo apresentado por Figueiredo (2009).

Amostras	Poder Calorífico
Caroço de azeitona	19,0
Casca de avelã	19,3
Pele da semente de avelã (seedcoat)	19,3
Madeira macia	20,0
Madeira dura	18,8
Palha de trigo	17,0
Casca de árvore	20,5
Sabugo de milho	17,0
Milho seco	17,8
Madeira de abeto	20,1
Madeira de faia	19,2
Folha de tabaco	15,0
Madeira de ailanto	19,0
Casca de nozes	21,6
Casca de amêndoas	18,8
Casca de semente de girassol	18,0

Fonte: Figueiredo (2009)

Tabela 3.3 – Amostras de biomassa com análise imediata em percentual de base seca

Amostra	Carbono fixo	Voláteis	Cinzas	Umidade
Caroço de azeitona	26,1	70,3	3,6	9,2
Casca de avelã	28,3	69,3	1,4	9,0
Pele da semente de avelã (seedcoat)	27,0	71,2	1,8	6,8
Madeira macia	28,1	70,0	1,7	8,8
Madeira dura	25,0	72,3	2,7	7,8
Palha de trigo	23,5	63,0	13,5	8,5
Casca de árvore	31,8	66,6	1,6	8,8
Sabugo de milho	12,5	86,5	1,0	12,1
Milho seco	17,6	78,7	3,7	10,6
Madeira de abeto	28,3	70,2	1,5	7,6
Madeira de faia	24,6	74,0	0,4	7,4
Folha de tabaco	11,2	72,6	17,2	8,4
Madeira de ailanto	24,8	73,5	1,7	8,1
Casca de nozes (base seca)	37,9	59,3	2,8	-
Casca de amêndoas (base seca)	22,7	74,0	3,3	-
Casca de semente de girassol (base seca)	19,8	76,2	4,0	-

Fonte: Figueiredo (2009)

Tabela 3.4 – Análise Elementar de amostras de biomassas.

Amostra	C	H	O	N
Caroço de azeitona	50,0	6,2	42,2	1,6
Casca de avelã	52,9	5,6	42,7	1,4
Pele da semente de avelã (seedcoat)	51,0	5,4	42,3	1,3
Madeira macia	52,1	6,1	41,0	0,2
Madeira dura	48,6	6,2	41,1	0,4
Palha de trigo	45,5	5,1	34,1	1,8
Casca de árvore	53,1	6,1	40,6	0,2
Sabugo de milho	49,0	5,4	44,6	0,4
Milho seco	-	-	-	-
Madeira de abeto	51,9	6,1	40,9	0,3
Madeira de faia	49,5	6,2	41,2	0,4
Folha de tabaco	-	-	-	-
Madeira de ailanto	49,5	6,2	41,0	0,3
Casca de nozes	53,5	6,6	35,5	1,5
Casca de amêndoas	47,9	6,0	41,6	1,1
Casca de semente de girassol	47,4	5,8	41,4	1,4

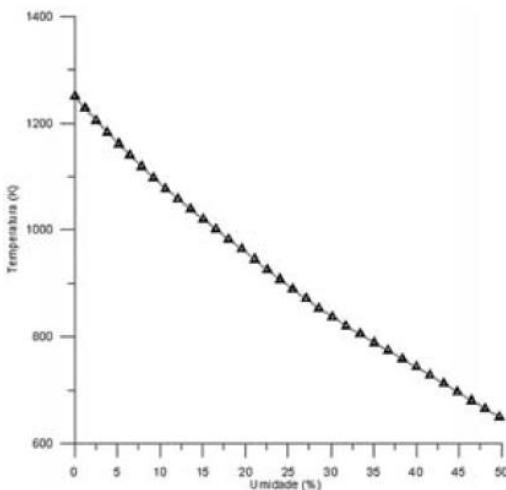
Fonte: Figueiredo (2009)

Conforme dados trazidos neste trabalho, observa-se que os resíduos provenientes da indústria do caju (cajucultura) têm o potencial para ser um bom energético dentre os resíduos normalmente produzidos no país, tendo esse um percentual melhor do que inclusive os resíduos comumente utilizados em práticas agrícolas no Brasil, como cana-de-açucar, milho e soja. A importância de se analisar quer o poder calorífico, análise imediata e análise elementar das diferentes biomassas presentes se dá em encontrar o melhor rendimento e eficiência na conversão energética do insumo. A análise elementar fornece em termos de composição química os elementos constituintes de cada material, em percentual quer de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Já com a análise imediata de biomassa se quantifica e se determina as reações sofridas após o processo de conversão energética. Como forma de análise tem-se:

-Umidade: A umidade é liberada quando ocorre o aquecimento da biomassa. Este é um parâmetro útil para se determinar o custo e a eficiência térmica do processo pois se houver um elevado teor de umidade, se faz necessário uma maior quantidade de energia para início da queima e em consequência uma diminuição no rendimento do

processo. A Figura 3.6 mostra o impacto que a umidade têm dentro do processo de gaseificação.

Figura 3.6 – Impacto da umidade na temperatura do processo de gaseificação



Fonte: Kimura (2009)

-*Matéria volátil*: São constituídos basicamente por hidrocarbonetos e voláteis liberados no processo de conversão da biomassa causando o enriquecimento do carbono. O sólido resultante da conversão após a liberação dos voláteis é chamado de char ou carvão.

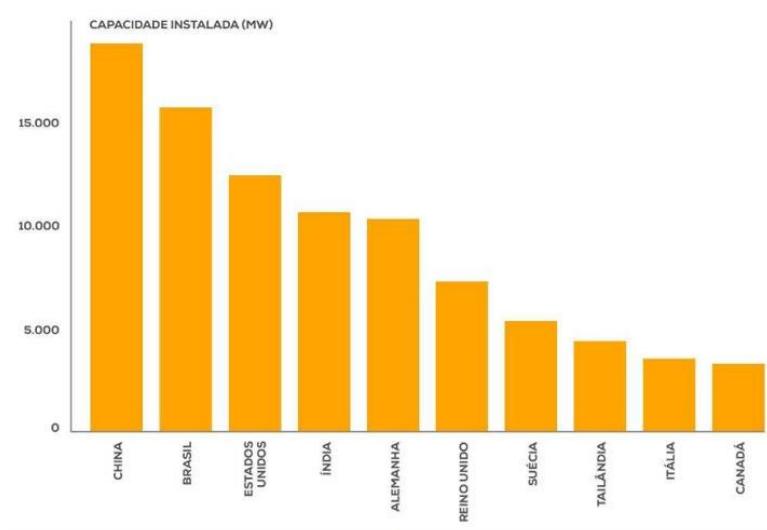
-*Carbono fixo*: É aquele que não é eliminado no aquecimento na ausência de ar, ficando presente no char ou carvão vegetal após o processo de pirólise. Este é encontrado através da subtração da massa inicial da biomassa menos a umidade, os voláteis e a cinza. Este é um parâmetro muito útil para avaliar o potencial combustível do sólido, sendo a sua conversão em gases determinante para a taxa de reação dos processos de combustão e gaseificação, assim como para seu rendimento.

-*Cinzas*: são constituídas por resíduos inorgânicos presentes no processo da queima da biomassa, formadas primariamente por silicatos e óxidos.

Poder calorífico é o calor de combustão gerado pela queima completa de quantidade determinada do combustível.

A importância de um estudo estratégico para o uso de energia através de biomassa no Brasil é apresentado pela Agência Internacional para as Energias Renováveis – IRENA (2022). No material divulgado por esse instituto cita-se que aproximadamente 75% do uso ou empregabilidade de energia renovável no mundo envolve bioenergia. Segundo esta agência, a capacidade da biomassa ser o agente transformador a aumentar o fornecimento e a capacidade de oferta de energia em países populosos e com demanda crescente, como Brasil, Índia e China se torna totalmente viável, tanto que na Figura 3.7 isto é destacado através do ranking de capacidade instalada de bioenergia por país. Com mais de 15 mil Megawatts de capacidade instalada, o Brasil ocupa o segundo lugar nesse ranking, sendo ultrapassado apenas pela China e superando países populosos e com capacidade agrícola produtiva conhecida como Estados Unidos e Índia.

Figura 3.7 – Capacidade Instalada de Bioenergia



Fonte: Irena (2022)

3.1.2. Processo de conversão de biomassa

A conversão de biomassa geralmente está dividida em processos de conversão biológica ou térmica, sendo que a digestão anaeróbica e a fermentação são os principais processos biológicos de conversão. Em relação aos processos térmicos destacam-se a pirólise e gaseificação, as quais serão analisados em mais detalhes posteriormente sendo a base de discussão desse estudo. Há, também, outros processos térmicos como a combustão e a liquefação. As principais características de cada um desses processos estão apresentadas a seguir.

a. Processos biológicos:

I) Fermentação: A fermentação resulta na decomposição anaeróbica da glicose e dos nutrientes com a finalidade de se obter energia. Esta se dá por meio de processo bioquímico. Por exemplo, no processo de fermentação alcoólica, micro-organismos presentes fazem a conversão de açúcares de vegetais como cana-de-açúcar, beterrada, milho e batata em dióxido de carbono e álcool etílico (etanol). O processo de fermentação ocorre da seguinte maneira:

- Aclimatação do micro-organismo;
- Soltura de dióxido de carbono e acréscimo de taxa de etanol e calor;
- Desprovimento de substrato, resultando em liberação de dióxido e redução do crescimento celular.

Sobre os micro-organismos mais comumente utilizados como leveduras é importante verificar o estudo trazido por Walker, GM e Walker, R.S.K (2018). Segundo os autores, a *Saccharomyces cerevisiae* (levedura) é muito utilizada com essa finalidade por possuir características como trazer alta eficiência na conversão metabólica, na fermentação e por ser resistente a concentrações elevadas de açúcar, cerca de 10-20% m/v. Porém, os autores também citam que fatores externos como linhagem da levedura, contaminação microbiana, temperatura, pH do meio dentre outros podem também afetar o rendimento da fermentação. A literatura ainda cita ações de otimização do processo fermentativo como se fazer o monitoramento da produção

celular, assim como o acompanhamento da metabolização dos açúcares em etanol. Além disso, também são citados parâmetros importantes para o acompanhamento do crescimento celular: a vitalidade das células e sua viabilidade e a capacidade de reprodução das células. Com esses parâmetros definidos, medidas de controle podem ser adotadas.

II) Digestão anaeróbica: A digestão anaeróbica se baseia na conversão do material pela ação de bactérias sem ar. Durante o processo de metabolismo das bactérias anaeróbias, grande parte da energia química contida nos substratos é transformada dióxido de carbono e metano pela decomposição de materiais orgânicos tais quais proteínas, carboidratos e lipídeos.

b. Processos térmicos

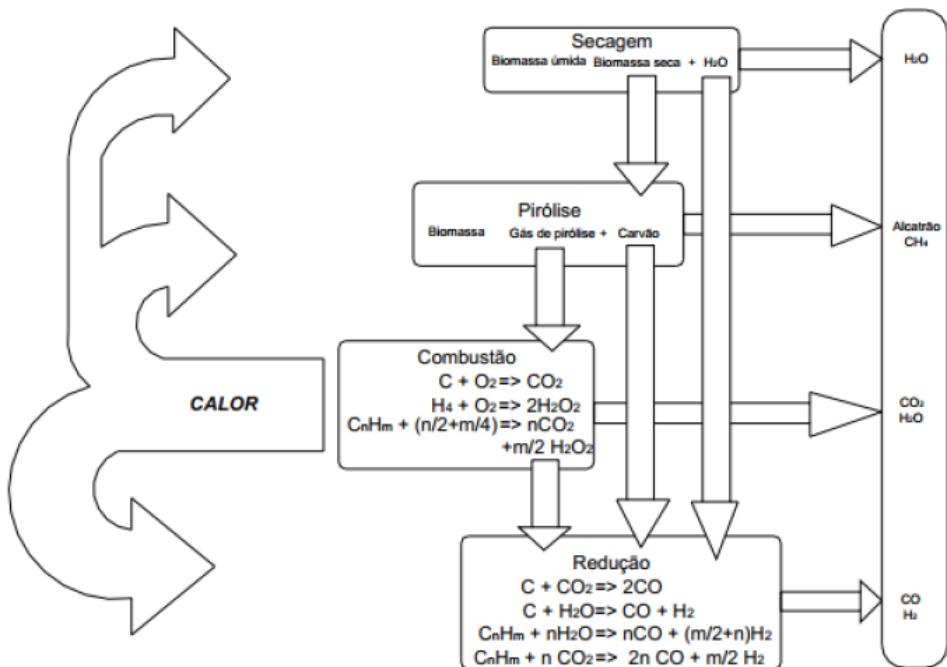
I) Combustão: A combustão é constituída pela reação química exotérmica com liberação de energia entre um combustível e um oxidante, geralmente sendo este o oxigênio com a finalidade de se liberar calor e formar como produto final espécies diferentes de produtos. O processo de combustão libera calor que pode ser utilizado para produção de vapor e este para geração de energia elétrica, por exemplo. Segundo Carioca e Arora (1984), a conversão energética para este fim usualmente ocorre em queimadores, combustores ou fornalhas. Como resultado do processo de combustão é a mistura dos gases como monóxido de carbono, vapor d'água, oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono. A eficiência do processo de combustão de biomassa, segundo o autor mencionado anteriormente, varia em torno de 60% a 75% dependendo da umidade encontrada na biomassa e fatores como o tipo de câmara de combustão utilizado no processo e do tipo de controle do ar.

II) Gaseificação: A gaseificação fundamenta-se em converter biomassa em gases. De acordo com a definição trazida por Carioca e Arora (1984), este processo implica em não apenas modificar a característica da biomassa como seus voláteis e água em gases e vapores. O resultado é uma mistura de gases, que segundo os autores, é composta por “monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo”. Fato

importante é que este processo foi comumente utilizado, desde o século XIX, principalmente na geração de calor industrial ou na ativação de motores pela gaseificação ocorrida com a queima da madeira. Os gases obtidos deste processo podem ser processados para a formação de hidrocarbonetos líquidos ou de metanol e isso denota o quanto a gaseificação pode ser facilmente difundida uma vez que sua empregabilidade de uso é alta. Além de ser versátil em diversas aplicações industriais também é uma fonte a substituir os derivados do petróleo. Segundo Carioca e Arora (1984), em termos energéticos, “o processo de gaseificação é tão eficiente quanto a combustão”. A Figura 3.8 exibe um diagrama do processo de gaseificação com as suas quatro etapas do processo:

- Secagem (173°C - 200°C): Nessa faixa de temperatura ocorre a remoção gradativa de umidade;
- Pirólise (200°C - 500°C): Nessa faixa de temperatura na ausência de oxigênio, ocorre a decomposição molecular, produzindo três subprodutos: carvão vegetal, alcatrão e voláteis;
- Oxidação Parcial (800°C - 1300°C): Faixa de temperatura da qual se necessita uma baixa quantidade de oxigênio a qual ocorre também as reações exotérmicas e necessárias para se produzir energia para realizar a próxima fase;
- Gaseificação ou Redução (500°C - 1000°C): Nessa faixa de temperatura, todo o oxigênio é consumido e reações de redução entre produtos gasosos e resíduos sólidos ocorrem, CO_2 e H_2O para H_2 e CO respectivamente.

Figura 3.8 – Diagrama de processo de gaseificação



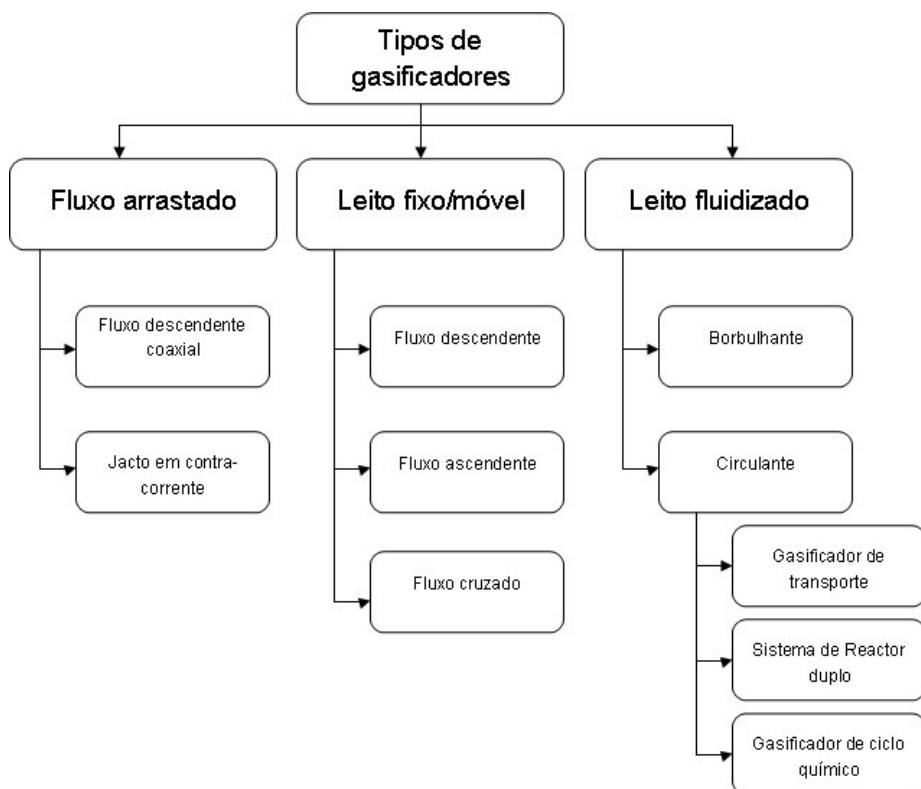
Fonte: Andrade (2007)

Além do processo de gaseificação, dependendo do tipo de gaseificador utilizado, resulta em diferentes eficiências. Estes podem ser classificados de acordo com diferentes superfícies de contato e agente gaseificante. Por isso, esses são divididos em três grupos:

- 1) Gaseificadores de fluxo arrastado;
- 2) Gaseificadores de leito fixo/móvel;
- 3) Gaseificadores de leito fluidizado.

Cada grupo citado acima como descrito nos processos da Figura 3.8 dependendo da aplicação possibilita ainda ser mais subdividido em fluxo ascendente coaxial e jato de contracorrente para gaseificadores de fluxo arrastado, fluxo cruzado, descendente ou ascendente para gaseificadores de leito fixo/móvel e fluxo borbulhante e circulante para os gaseificadores de leito fluidizado. A seguir são apresentados detalhes de cada tipo de gaseificador.

Figura 3.9 – Tipos de gaseificadores



Fonte: Andrade (2007)

1) Gaseificadores de fluxo arrastado:

Este é um tipo de reator do qual o combustível em tamanho micrométrico é arrastado por agentes gaseificantes em alta pressão (20-70 bar). Ao ser aplicado em biomassa, devido à natureza fibrosa, não apresenta um grau de conversão muito significativo. Biomassa que contenha óxido de cálcio e que não seja alcalina, tem por característica ponto de fusão de cinzas elevado e com isso maior necessidade de oxigênio ao processo para geração de calor. Porém, nos casos de cinzas da biomassa no qual seu pH seja alcalino, estas exibem um cenário ao contrário e por terem uma temperatura de fusão menor quando comparada ao carvão, possibilitam abaixar o índice de oxigênio necessário para que se obtenha uma temperatura maior do que a de fusão das cinzas. No entanto, o agravante na utilização de biomassa com índice elevado de umidade é o impacto causado no isolamento refratário do gaseificador pois essa condição reduz o tempo de vida útil desse componente e gera uma maior necessidade de manutenção do equipamento. Embora os gaseificadores de fluxo de

arrasto consigam atingir elevadas temperaturas e em consequência consigam destruir o alcatrão formado da biomassa, a utilização desse tipo de equipamento na conversão ou gaseificação não o faz ser tão utilizado.

2) Gaseificadores de Leito móvel/fixo

Os tipos de gaseificadores de leito móvel ou fixo recebem esse denominação devido ao fato de que a biomassa a ser consumida ficar posicionada sobre uma grelha. São comumente encontrados para esse tipo de aplicação os de leito vertical, compostos de colunas com sustentação perfurada com finalidade de aerar todo o ambiente, podendo ter água circulante para o gerenciamento da temperatura durante o processo de fermentação. Com isso, remove-se o dióxido de carbono, o oxigênio necessário é fornecido e também controla-se o calor gerado no processo. Estes gaseificadores podem ser subdivididos em três grupos: fluxo ascendente ou descendente e fluxo cruzado, sendo ambos fáceis de se projetar e operar, podendo trabalhar com biomassa geralmente particionada em pequenas lascas ou pedaços de granulometria grosseira ou de alta densidade. Normalmente a biomassa passa por um processo de pré-tratamento para remoção de umidade excessiva e impurezas para obter maior eficiência térmica. O processo de gaseificação ocorre quando os gases voláteis produzidos na área de pirólise sobem para a zona de gaseificação, na qual os gases voláteis reagem com um agente gaseificante, como dióxido de carbono ou vapor de água para produzir gás de síntese. Esse gás é composto principalmente por hidrogênio, monóxido de carbono, nitrogênio e dióxido de carbono. Para se obter tal mistura de gases, o processo de uso do gaseificador é mantido com baixo teor de cinzas e em baixa velocidade de gás com longo tempo de permanência da biomassa em seu meio. Porém, um ponto desfavorável no uso desse tipo de gaseificador é a uniformidade de temperatura, composição gasosa e de combustível.

3) Gaseificador de leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado têm por característica principal o aumento da eficiência da reação através do contato entre biomassa e gases, assim como uma intensa circulação da mistura das partículas. Isso resulta em altas taxas de reação gás-sólido e uma temperatura uniforme em todo o leito. Segundo Belgiono et al.

(2003), essa eficiência é expressiva quando comparado ao gaseificador de leito fixo, tendo um coeficiente de eficiência na taxa de 5:1. Isso ocorre porque as partículas consumidas ficam suspensas em um leito de partículas inertes fluidizadas pelo fluxo ascendente de ar, criando condições favoráveis de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara da reação. Outra característica desse tipo de gaseificador é a faixa de operação de temperatura na faixa de 700°C a 900°C. Esta por ser uma faixa de atuação limitada, gera uma desvantagem pois isso resulta no gás produzido um maior nível de alcatrão devido à combustão incompleta do carvão. Seu funcionamento é feito por meio de inserção de gás ou líquido e este fluido que ao ser passado por um catalisador em alta velocidade faz com que o material inserido também se comporte como fluido. Segundo o estudo trazido por Basu (2006) algo que pode ser trazido como uma vantagem ao emprego desse tipo de gaseificador é sua excelente mistura gás-sólido bem como à grande inércia do leito. Por também apresentar uma uniformidade de temperaturas no leito de gaseificação o risco de se obter uma aglomeração de combustível é reduzido. O gaseificador de leixo fluidizado pode ser subagrupado em dois tipos: os de leito borbulhante e circulante.

Moura (2011) comparou a condição de operação de cada leito juntamente aos respectivos sistemas de combustão. Esses detalhes estão descritos nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5 – Performance entre tipos de gaseificadores

Comparação de parâmetros chaves de operação para sistemas de combustão de carvão				
Modificado por Basu e Fraser (1991)				
	Leito Borbulhante	Leito Circulante	Pulverizado	Alimentador de fogo
Velocidade do gás [m/s]	1,5 - 3	4 - 8,5	4 - 6	1,2
Queda de pressão no leito [em mmH ₂ O]	80 - 100	40 - 70	NA	NA
Diâmetro da tubulação de alimentação do carvão [mm]	6 - 0	6 - 0	<0,01	32 - 6
Tamanho médio de partícula [μm]	500 - 1500	150 - 500	NA	NA
Coeficiente de troca de calor leito superfície [W/m ² K]	300	120	NA	NA
Taxa de arraste [kg/m ² s]	0,1 - 1	10 - 40	NA	NA
Excesso de ar [%]	20 - 25	10 - 20	15 - 30	20 - 30
Emissão de NO _x [ppmv]	100 - 300	50 - 200	400 - 600	400 - 600
Eficiência de combustão	90 - 96	85 - 99	99	85 - 90
Taxa de calor liberado na grelha MW _{th} /m ²	0,5 - 1,5	3 - 5	4 - 6	0,5 - 1,5

Fonte: Moura (2011)

Tabela 3.6 – Características do gaseificador de leito fluidizado

Características	Grelha	Borbulhante	Circulante	Pulverizado
Altura do leito ou região de queima do combustível [m]	0,2	1-2	10-30	27,45
Velocidade superficial [m/s]	1-2	1,5-2,5	3-5	4,6
Excesso de ar [%]	20-30	20-25	10-20	15-30
Taxa de liberação de calor [MW/m ²]	0,5-1,5	0,5-1,5	3,0-4,5	4-6
Granulometria carvão [mm]	32-6	6-0	6-0	<0,1
Turn Down razão	4:1	3:1	3-4:1	3:1
Eficiência de combustão	85-90	90-96	95-99,5	99-99,5
Óxidos de nitrogênio [ppm]	400-600	300-400	50-200	400-600
Adsorção de SO ₂ [%]	-	80-90	80-90	-

Fonte: Moura (2011)

3.1) Gaseificador de leito fluidizado borbulhante

A premissa de funcionamento desse gaseificador é que a biomassa seja apresentada com um tamanho inferior a 10mm juntamente com um agente gaseificante, seja este oxigênio, ar ou vapor ou através de uma combinação de elementos para se resultar numa maior produtividade de hidrogênio. Segundo Moura (2011) “a cinza resultante da decomposição do combustível (biomassa) é facilmente retirada pela base do leito. A temperatura do leito, no caso da utilização de biomassa, é mantida abaixo dos 900ºC de forma a evitar a aglomeração do combustível (biomassa) com as cinzas”.

3.2) Gaseificador de leito fluidizado circulante

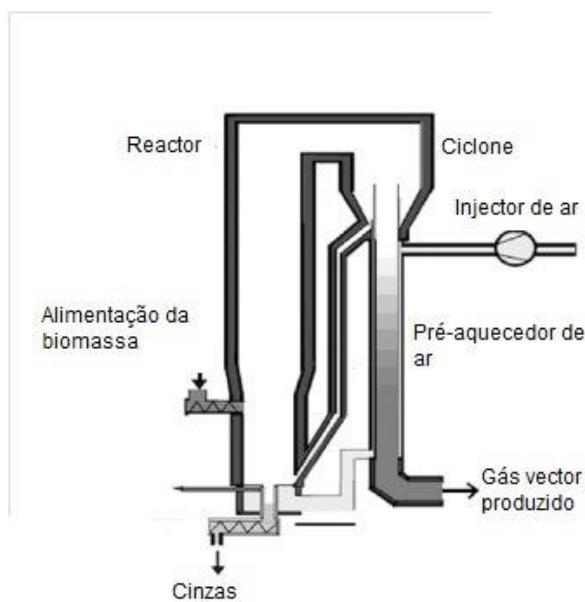
No gaseificador de leito fluidizado circulante, as partículas são quebradas e separadas da corrente de gás e ficam circulando até que atinjam por questão de atrito ou de reação química, um tamanho inferior ao diâmetro de corte ou superior ao diâmetro da maior partícula arrastada pelo fluxo de gás. Quando estas são quebradas em tamanho menor, as partículas saem desse ciclo através do fluxo de gás e quando há formação de diâmetro maior as partículas permanecem no leito do gaseificador, onde se concentram os demais sólidos.

Para esse tipo de gaseificador a velocidade de fluidização normalmente é maior se comparada aos demais com o gaseificador de leito borbulhante, cerca de 3.5-5.5 m/s e 0,5-1,0 m/s respectivamente. Esta velocidade contribui para que os sólidos inertes se movimentem para fora do leito fluidizado circulante. A temperatura de trabalho desse tipo de gaseificador está compreendida entre 800 e 1000ºC e varia nessa faixa de acordo com o tipo de combustível e da aplicação. Segundo Yang (2003), a operação do gaseificador de leito circulante compreende as seguintes variáveis para operação:

- Altura total do leito: 15m a 40m;
- Temperatura: 20ºC a 1000ºC;
- Fluxo líquido de sólido através do riser :10 kg/m²s a 1000 kg/m²s;
- Pressão: 100kPa a 2000kPa;
- Diâmetro médio da partícula: 50mm a 500mm;

Os gaseificadores de leito fluidizado circulante possuem as seguintes vantagens quando comparados com os demais gaseificadores, sendo essas: temperaturas constantes e sem oscilação, operação contínua sem interrupções para qualquer partícula de diferentes tamanhos, geometrias ou densidades, maior vazão de gás, contato mais efetivo entre partícula e gás. Como desvantagem têm-se que devido ao atrito, as superfícies internas se desgastam com maior rapidez. Além disso graças à uniformidade de temperatura no leito devida à transferência de calor de emulsão faz com que as paredes sejam menos favoráveis em relação a baixas velocidades de fluidização e com isso, gradientes laterais podem ser necessários. Também devido ao arraste há perda de partículas e normalmente as estruturas necessárias para esse tipo de leito são maiores do que as de leito fixo. A Figura 3.10 mostra a forma de trabalho de um gaseificador de leito fluidizado circulante.

Figura 3.10 - Gaseificador de leito fluidizado circulante



Fonte: Basu (2006)

III) Liquefação: este é o processo térmico utilizado para converter materiais carbonáceos em produtos líquidos. Neste processo, a biomassa é decomposta em fragmentos de moléculas mais leves podendo este processo ser realizado de forma direta através de catalisadores ou indiretamente com a conversão da matéria em

vapores para assim serem posteriormente sintetizados e transformados em produtos líquidos. (CARIOCA; ARORA, 1984). A seguir são apresentados maiores detalhes de cada tipo de liquefação:

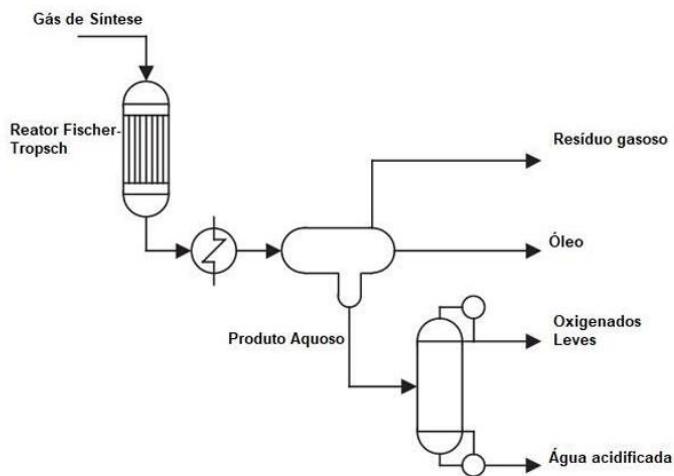
- Liquefação indireta

A liquefação indireta recebe essa terminologia porque a gaseificação se torna um processo transitório, ou seja, primeiramente a biomassa é oxidada parcialmente a fim de se produzir gás de síntese ($\text{CO}+\text{H}_2$) e assim, num segundo passo ser condensado e convertido em combustíveis líquidos. O processo de conversão da liquefação indireta utilizado de conversão é o do tipo Fischer-Tropsch (F.T.). De acordo com a contribuição trazida por Maitlis e Klerk (2013), a principal reação que ocorrer durante a síntese Fischer-Tropsch é mostrada na eq. (3.2.1):



A eq. 3.2.1 indica que paralelamente ao aumento da cadeia de hidrocarbonetos também ocorre a formação de água. A separação dessa água formada durante a síntese é mostrada na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Processo Fischer-Tropsch.



Fonte: Ahad e Klerk (2018)

Segundo Ahad e Klerk (2018) “a composição do produto aquoso é regida por equilíbrio vapor-líquido. As cadeias curtas de carbono oxigenadas são produzidas durante a síntese de F.T., são de natureza polar e preferencialmente se dissolvem na fase aquosa”.

- Liquefação Direta

A liquefação direta é a conversão completa da biomassa em combustíveis líquidos sem a necessidade de se gaseificar o produtos sendo que esta conversão compreende os seguintes passos:

1. Preparação da biomassa para que se tenha o tamanho correto e com umidade adequada;
2. Adição de solvente à biomassa;
3. Aquecimento dessa mistura até condições propícias;
4. Aquecimento no processo com gás, quer H_2 ou H_2/CO com alta pressão para acréscimo da composição entre hidrogênio/carbono e redução de oxigênio;
5. Reação principal;
6. Processo de separação dos condensados dos gases não condensáveis;
7. Separação sólido-líquido.

A performance da liquefação direta pode ser acompanhada através do rendimento em bio-óleo, valor de pH, relação entre hidrogênio/carbono, poder calorífico e teor de oxigênio.

IV) *Pirólise*: O termo pirólise é ocorrido na ausência de oxigênio a decomposição térmica de materiais contendo carbono. Como este é o processo a ser considerado nesta discussão, maiores detalhes serão apresentados no item 3.2.

3.1.3. Caju e seus derivados

O caju tem por definição a espécie *Anacardium occidentale*, conforme apresentado pela Figura 3.12; esta faz parte da família Anacardiaceae que é uma planta encontrada no nordeste brasileiro. O cajueiro é comumente encontrado na região costeira do Brasil e se encontra misturado nas vegetações de clima semiárido que se adaptam bem ao clima seco, geralmente com galhos tortuosos e troncos grossos está muito presente em restinga, dunas e praias. Esta árvore se categoriza em dois principais tipos: o anão e o comum. Além disso, o cajueiro possui folhagem rosada ao crescer e com o passar do tempo segue o processo de esverdimento das mesmas; suas flores são de tamanho pequeno e perfumadas. O cajueiro anão possui altura aproximada de 4 metros sendo suas folhas na forma de um ovo invertido ou obovadas, com formato coriáceas e subcoriáceas e as flores em panículas. O tipo comum possui similar característica do tipo anão mas este podendo atingir uma altura que fica na faixa entre 5 e 12 metros, porém, se estiver em situações mais favoráveis, pode atingir até 20 metros de altura.

Figura 3.12 - Cajueiro, *Anacardium occidentale*



Fonte: Autor (2023)

O cajueiro produz um fruto chamado de castanha de caju, com peso aproximado de 15 gramas in natura, pequeno, de consistência dura e coloração escura sendo que normalmente a frutificação dessa árvore ocorre entre os períodos mais quentes do ano, na primavera e verão.

A castanha de caju é classificada de acordo com o tamanho das amêndoas e também por sua coloração quando tostadas. Após passar por um processo de secagem e torra, seu nome popular é castanha-de-caju. Em relação ao tamanho, de acordo com o padrão estabelecido pela AFI (Association of Foods Industries), as amêndoas podem ser agrupadas em 5 tipos de tamanhos: 180, 210, 240, 320 e 450. A variação de tamanho se dá de acordo com a classificação de contagem da amêndoas por libra-peso. Quanto ao critério de cor, as amêndoas são classificadas como de primeira, segunda, terceira e quarta qualidades. Anexo ao fruto, ou seja à castanha de caju, há um pedúnculo (seu pseudofruto), que também é comestível, com coloração vermelha ou laranja, o qual é comumente confundido como fruto e varia entre o tamanho de 5 a 11 cm.

O consumo do pseudofruto do caju pode trazer alguns benefícios para a saúde pois têm alta concentração de vitamina C, podendo ser consumido in natura ou através de sucos, vinagres ou doces. O pseudofruto é conhecido cientificamente pelos nomes de *Anacardium microcarpum* e *Cassuvium pomiverum*. O seu cultivo representa

importante atividade econômica para o país, principalmente no nordeste do Brasil, pois aproximadamente 98% da produção do caju brasileiro se encontra nessa região. Em relação à extensão territorial, a cajucultura ocupa uma área de plantio maior do que 650 mil hectares, impactando diretamente na economia da região produtora, quer na manutenção de empregos para a população local, quer nos demais benefícios que essa prática traz para todo o ecossistema do cultivo do caju. A produção da castanha-de-caju em sua maioria está destinada à exportação e segundo as estimativas apresentadas por Brainer (2022), dados a produção anual seguindo dados de preço do Conab seriam de aproximadamente 497.047,00 (mil Reais).

Figura 3.13 - Pendúculo de caju, *Anacardium microcarpum*.



Fonte: Autor (2023)

Além do pseudofruto, outras partes do cajueiro são utilizados quer para fins de manufatura ou como fonte medicinal. Conforme citado por Brainer (2022), por exemplo, tópicos e produtos adstringentes podem ser obtidos através da extração da casca do tronco do cajueiro. Também do tronco obtém-se a goma do cajueiro, uma resina de cor amarelo-alaranjada que pode ser utilizada com alternativa ao uso da resina natural formada por polissacarídeos e glicoproteínas que é extraída de duas espécies de acácia da região subsaariana chamada de goma arábica, uma comumente utilizada na indústria alimentícia no preparo de confeitos, geleias, xaropes, maionese, doces e condimentos. Além disso, está presente nas indústrias do papel e farmacêutica. A madeira do cajueiro é altamente apreciada pela indústria do corte por ter característica durável e de bela coloração. Da seiva da árvore é

extraído substrato para produção de tinta, das flores obtem-se propriedades tónicas por conterem anacardina e das raízes extrai-se compostos purgantes. De fato, do cajueiro é possível haver diversas aplicações de uso quer para fins industriais ou medicinais como na fabricação de produtos de higiene bucal, diuréticos, analgésicos, e na cura de feridas entre outras aplicações.

Figura 3.14 - Castanha de caju, *Cassuvium pomiverum*.



Fonte: Autor (2023)

3.1.4. Produção de caju no Brasil e no mundo

Outro ponto trazido no estudo de Brainer (2022) é o histórico de produção mundial da cajucultura. Em 2020, 7,1 milhões de hectares de área formam utilizados para o plantio e colheita de castanha-de-caju, sendo que a Costa do Marfim é o país com maior produção desse fruto, seguido por Índia e Tanzânia, respectivamente. O Brasil possui a participação de 6,0% do total de produção mundial. Em 2012, o país possuía a terceira maior área, com a participação de 13,6% da área mundial, porém a produção foi afetada principalmente pelos demasiados períodos sem chuvas que afetaram a região nordeste, onde se concentra a produção nacional. Na Figura 3.15 é possível observar e comparar anualmente o total de área de cultivo do caju no Brasil e no mundo.

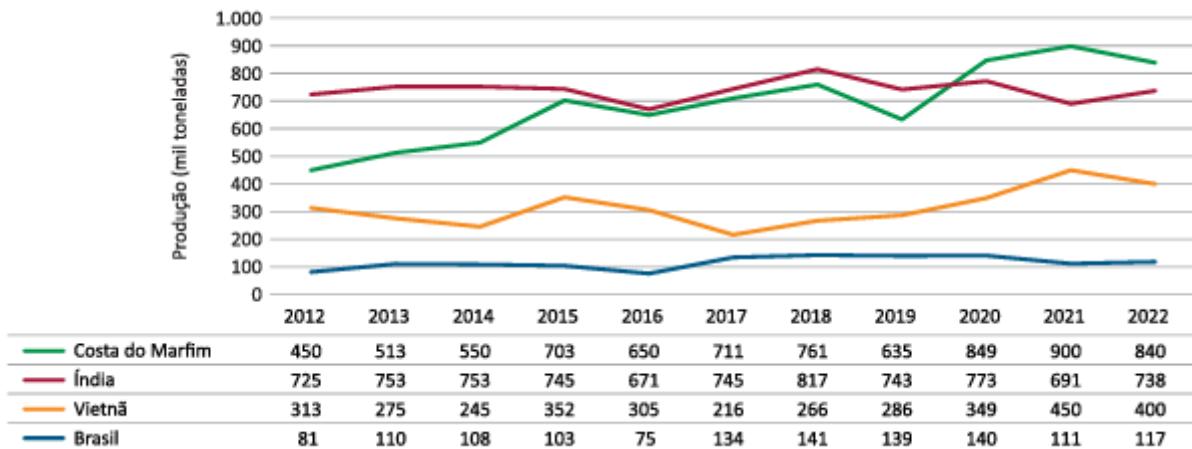
Figura 3.15 – Comparativo entre área colhida no Brasil e no mundo de castanha de caju



Fonte: Brainer (2022)

A Costa do Marfim mesmo tendo uma produtividade de 417kg/ha é inferior se comparada à média mundial, de 589kg/ha. Porém, devido à sua área de plantio de aproximadamente de dois milhões de hectares, isso fez que por extensão territorial país ocupasse o topo do ranking mundial como o maior produtor de castanha de caju. A Índia em 2022 ocupou a segunda colocação na produção de castanha de caju com produção anual aproximada de 772,8 mil toneladas, em 2021. Interessante destacar que até 2019 a Índia ocupava o primeiro lugar como principal produtor de castanha de caju, tanto em função da grande extensão de área com cajueiros com cerca de 1,1 milhão de hectares, como de sua produtividade de cerca de 693 kg/ha. Por ter um histórico nessa prática produtiva e por ser o precursor na produção do caju, a Índia ainda possui em muito lugares métodos tradicionais de cultivo do caju mas que estão sendo substituídos por espécies e formas de cultivo mais eficientes e de melhor produtividade. O Vietnã não está entre os países que mais cultivam a cajucultura porque possuem dois fatores que contribuem para tal. O país possui uma área de plantio com cerca de 280,9 mil hectares e também uma elevada produtividade, de cerca de 1.241 kg/ha. Na Figura 3.16 é possível observar e comparar a evolução de produção da cajucultura (mil/ton) no Brasil e nos três principais produtores mundiais (BRAINER, 2022).

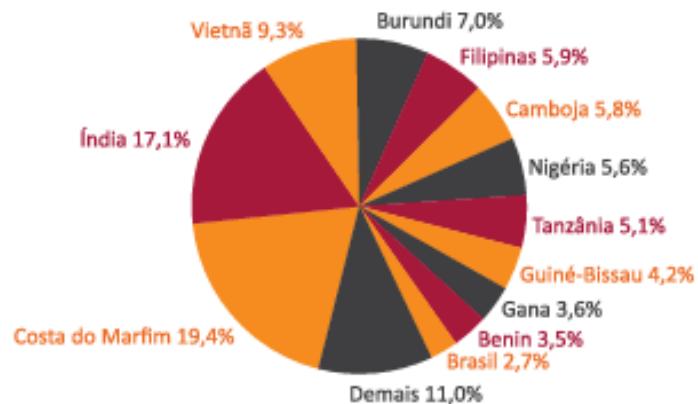
Figura 3.16 – Principais produtores mundiais de castanha de caju com evolução anual de produção, comparada com o Brasil



Fonte: Brainer (2022)

Na Figura 3.17 é possível observar e comparar de toda produção mundial de cajucultura o percentual produtivo de cada país (BRAINER, 2022).

Figura 3.17 – Maiores produtores de cajucultura, em 2022



Fonte: Brainer (2022)

O Brasil possuía, em 2020, 426,1 mil hectares plantados com cajueiro, sendo a região nordeste a principal fonte de cultivo desse produto, representando 99,7% da produção nacional. O maior estado produtor da cajucultura no Brasil é o Ceará, ocupando quase

dois terços da área utilizada em âmbito nacional para a produção e colheita do caju, seguido, respectivamente, por Piauí e Rio Grande do Norte, que juntos somam 28,7% da produção de cajucultura. O restante é distribuído entre os demais estados produtores localizados na região nordeste. Em 2022, o cultivo do caju abrangeu uma área estimada no Brasil em torno de 425,2 mil hectares, sendo 63,9%, no Ceará; 17,2%, no Piauí; e 11,7%, no Rio Grande do Norte. A produção nordestina em 2022 totalizou 116,4 mil toneladas, sendo que os principais contribuintes para tal feito novamente foram os estados do Ceará, do Piauí e do Rio Grande do Norte, que respectivamente somaram 106,2 mil toneladas, o que percentualmente é equivalente a 90,6% da produção nacional. Apenas o estado do Ceará em destaque contribuiu com 54,1% dessa parcela. Como o nordeste representa quase toda a produção brasileira de castanha de caju, e de forma, qualquer variação na produção desta região causada pela falta de chuvas ou por pragas reflete diretamente sobre a produção brasileira. (BRAINER, 2022).

Na Tabela 3.7 é possível observar e analisar quer em parâmetro nacional, quer por estado ou por região a área total destinada à cajucultura, o total produtivo (ton), o rendimento (kg/ha) e o valor monetário da produção de caju nos últimos quatro anos.

Tabela 3.7 - Produção de caju nos últimos 4 anos

País/ Região/ Estados	Área colhida (ha)					Produção (t)					Rendimento (kg/ha)					Valor da produção (Mil Reais)				
	2019	2020	2021 ¹	2022 ¹		2019	2020	2021 ¹	2022 ¹		2019	2020	2021 ¹	2022 ¹		2019	2020	2021 ²	2022 ²	
Brasil	426.302	426.131	426.813	425.244		138.597	139.921	110.669	117.228		325	328	259	276		385.889	451.625	469.237	497.047	
Nordeste	424.990	424.861	425.589	424.005		137.708	139.078	109.862	116.372		324	327	258	274		383.890	449.893	465.815	493.417	
Ceará	269.819	269.900	271.071	271.636		87.659	85.177	63.076	63.444		325	316	233	234		256.395	80.602	285.734	346.087	
Piauí	69.380	71.132	72.327	73.027		21.631	23.155	19.020	25.070		312	326	263	343		52.666	64.765	79.694	124.723	
Rio Grande do Norte	51.397	50.846	50.378	49.611		16.862	17.524	16.667	17.659		328	345	331	356		48.827	60.102	87.252	98.272	
Maranhão	12.550	11.214	10.860	9.006		3.946	3.726	3.574	3.285		314	332	329	365		6.835	7.249	12.259	7.804	
Bahia	15.428	15.466	15.000	15.000		2.438	4.017	3.500	2.865		158	260	233	191		7.878	12.281	16.870	9.991	
Pernambuco	2.377	2.307	2.235	2.228		3.942	4.125	2.833	2.890		1.658	1.788	1.268	1.297		8.292	21.066	10.454	16.002	
Paraíba	3.406	3.194	2.941	2.771		868	823	668	678		255	258	227	245		2.113	2.308	2.685	2.193	
Alagoas	633	802	777	726		362	531	524	481		572	662	674	663		885	1.520	2.112	1.584	
Norte	1.162	1.120	1.074	1.089		809	756	718	767		696	675	669	704		1.839	1.575	3.044	3.252	
Pará	1.153	1.110	1.064	1.079		800	746	708	756		694	672	665	701		1.800	1.560	3.002	3.205	
Tocantins	9	10	10	10		9	10	10	11		1.000	1.000	1.000	1.100		39	16	42	47	
Centro-Oeste	150	150	150	150		80	87	89	89		533	580	593	593		160	157	577	668	
Mato Grosso	150	150	150	150		80	87	89	89		533	580	593	593		160	157	577	668	

Fonte: Brainer (2022)

3.1.5. Conversão da biomassa a partir da casca da castanha de caju

A utilização da casca da castanha de caju como agentes de conversão de energia traz vantagens e grandes benefícios ambientais pois para este fim é evitado o envio desse insumo para aterros. Além desse fato, com a compactação desse insumo é possível se extrair o óleo da casca de castanha de caju (LCC), rico em ácidos anacárdicos (AA), que são alquilfenóis com reconhecida atividade biocida. Assim é possível então se estabelecer alternativas para o aproveitamento de toda a cadeia produtiva do caju, quer na fabricação de novos produtos ou conversão energética e assim também aumentar a rentabilidade da cadeia produtiva da cajucultura. No âmbito social, o uso da casca da castanha de caju pode viabilizar o incremento na produção, impulsionando o setor agroindustrial, com crescimento da disponibilidade de empregos e no estímulo ao fortalecimento do setor produtivo cajueiro. No tocante aos benefícios ambientais, a conversão e uso pleno da cajucultura contribui na sustentabilidade desse ecossistema produtivo, pois o uso e aproveitamento total das cascas das castanhas e seus subprodutos reduz os impactos negativos da geração de resíduos dos processamentos industriais. Com quantidades significativas geradas a partir da obtenção da amêndoia na cultura do caju, o aproveitamento da casca se

torna válido através dos possíveis ganhos energéticos, bem como associados a valores econômicos. Além disso, as emissões de gases nocivos associados com a conversão energética pela CCC são consideravelmente menores quando comparadas às emissões oriundas dos combustíveis fósseis.

3.2. Pirólise de biomassa

A pirólise é a decomposição térmica da matéria orgânica em ambiente com controle limitado de oxigênio ou na ausência do mesmo resultando em produtos compostos nas três diferentes fases de estado da matéria: gasosa, líquida ou sólida. O gás resultante dessa queima é basicamente composto por CO₂, hidrogênio, CO e hidrocarbonetos de baixa massa molar.

3.2.1. Tipos de pirólise e estudos de aplicação

A pirólise pode ser categorizada de acordo com o tipo de processo utilizado durante sua operação, conforme as seguintes classificações: carbonização, pirólise lenta (convencional), pirólise rápida e pirólise muito rápida (flash) conforme citado por Demirbas (2008). Na Tabela 3.8 são apresentados os mais relevantes processos empregados na pirólise de biomassa lignocelulósica.

Tabela 3.8 – Tipos de pirólise e produtos obtidos

Processo de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temp. (°C)	Produtos obtidos
Carbonização	dias	muito baixa	400 a 450	carvão vegetal
Lenta	5 a 30 min	Baixa	até 600	bio-óleo, carvão e gás
rápida	0,5 a 5 s	muito alta	550 a 650	bio-óleo
flash-líquido	menos de 1 s	alta	inferior a 650	bio-óleo
flash-gás	menos de 1 s	alta	superior a 650	produtos químicos e gás combustível

Fonte: Kimura (2009)

- Carbonização

Biocarvão ou carvão vegetal é o produto final resultante do processo de carbonização. Este processo ocorre em faixas de temperatura de aproximadamente 400°C a 450°C com taxa de aquecimento muito baixa e alto tempo de residência no material, podendo ser de horas ou até mesmo dias de processamento da matéria. A inserção de calor no material é feita através de catalítico e a qualidade do produto final está diretamente associada ao tipo de matéria-prima utilizada. Portanto, quanto melhor a matéria-prima, melhor será a qualidade do carvão vegetal. O processo de carbonização é também utilizado para se obter o biochar, comumente utilizado na produção de energia e também como fonte de limpeza do meio-ambiente, pois atua na captação como sequestrador de carbono da atmosfera.

- Pirólise lenta

A pirólise lenta se caracteriza por realizar termicamente a decomposição da matéria a baixas taxas de aquecimento (°C/s) e elevados tempos de processamento quer na ausência ou controle limitado de oxigênio. Nesse processo, a decomposição térmica de compostos com peso molecular elevado resulta na quebra em fragmentos menores. Com este tipo de controle, o rendimento e a eficiência do carvão vegetal são maiores e, consequentemente, reduzindo a quantidade bio-óleo e de gás. Para este fim, Phan et al. (2008); Hajaligol et al. (2001) e Funazukuri; Hudgins e Silveston (1986) citaram, apresentaram e comprovaram em seus estudos os efeitos da variação da temperatura no processo de pirólise lenta da biomassa. Os estudos partiram da desidratação e descarboxilação da matéria primeiramente em baixas temperaturas e resultando no aumento da temperatura de pirólise durante o processo em si o que ocasiona a redução da eficiência e do rendimento da fração sólida do processo, ou seja, o bio-carvão. Como em consequência, observa-se aumento de rendimento da parte gasosa. Já em relação ao efeito durante a fase líquida, através desse estudo os autores mostraram que o maior índice é atingido na faixa de temperatura entre 500°C a 600°C passando a ocorrer uma diminuição do rendimento ao se atingir temperaturas maiores causado pelo craqueamento térmico de compostos pesados.

Outro estudo de avaliação dos efeitos da pirólise lenta foi trazido por Williams e Besler (1996) que analisaram o impacto da variação de calefação durante o processo de pirólise na influência sobre o eficiência dos produtos ali gerados. O objetivo principal

desse estudo foi contribuir para a definição de uma faixa de temperatura capaz de se encontrar uma melhor eficiência do bio-carvão na fase sólida gerada no processo e assim, aumentar em consequência, o rendimento dos demais produtos gerados durante as fases líquida e gasosa garantindo altos conteúdos energéticos.

Já Lee et al. (2007) puderam contribuir com este tema ao analisar o resultado da pirólise lenta e ao compararem o efeito desse processo em cinco diferentes resíduos agrícolas usualmente utilizados no Brasil, entre eles a casca do côco, amêndoas de palma, casca de arroz, o bagaço da cana-de-açúcar e casca de “árvore guarda-chuva” (*maesopsis eminii*) com a finalidade de verificar quais desses insumos poderiam prover o maior eficiência do bio-carvão para fins de aplicação no solo para estudo de eficiência agrícola. No estudo, todos os insumos foram inseridos em gaseificador de aço inoxidável de leito fixo acoplado a um forno elétrico no qual “porções de 100 a 400 gramas de biomassa foram aquecidas à temperatura de 500°C numa taxa de aquecimento de 10°C min-1, mantidas durante pelo menos 1 h para pirólise completa. Foi utilizado nitrogênio como gás de arraste num fluxo de 1,5 L min-1 para obtenção dos produtos condensáveis (bio-óleo, incluindo a água)”. Segundo os autores, neste experimento, foi possível analisar os gases por cromatografia a gás não só de cada componente, mas, também, a estruturação dos diferentes tipos de gases não condensáveis. Realizou-se a comparação todos os bio-carvões produzidos através da pirólise lenta dos cinco tipos diferentes de biomassa através dos resultados de propriedades físico-química de cada componente. A conclusão dos autores foi que o processo de pirólise lenta do bagaço de cana-de-açúcar e da casca da madeira de árvore “guarda-chuva” foram os mais favoráveis pois o bio-carvão produzido deste processo trouxe melhor eficiência no enriquecimento do solo para renovação do plantio. Desta forma, criadas alternativas na utilização desses insumos para maximização de produção desse tipo de bio-carvão quer para aplicação agrícola ou para conversão como fonte de calor.

Outro estudo analisado foi o elaborado por Aysu e Kuçuk (2013) ao qual foi avaliado a pirólise experimental de biomassa da ferula, sendo este um gênero de plantas da família Apiaceae, (*ferula orientalis*) com o intuito de se obter o bio-óleo e biochar. Segundo os autores, para este experimento foi utilizado um gaseificador de leito fixo com faixa de operação entre as temperaturas de 350°C a 600°C em meio de nitrogênio

como gás de arraste. Os resultados obtidos mostraram que o bio-óleo resultante da pirólise lenta da férula poder calorífico superior ao da biomassa de origem. Ainda de acordo com os autores, o resultado foi assim obtido por se utilizar óxido de zinco como catalisador ao invés de óxido de alumínio e a pirólise foi realizada em temperatura de 500°C com taxa de variação de 50°C/min, em condições não catalíticas.

Park et al. (2014), também estudaram os efeitos da pirólise lenta, porém da palha de arroz com temperaturas variando de 300°C a 700°C, e avaliaram os rendimentos do biocarvão e do bio-óleo bem os gases condensáveis obtidos no final do processo. Utilizou-se um “gaseificador de reator de leito fixo em aço inoxidável acoplado a um forno elétrico semelhante ao estudo realizado por Lee et al. (2007) no qual foram utilizadas porções medidas de 100 a 110 gramas de amostra com fluxo de alimentação de 1,5L/min de nitrogênio durante uma hora para se fazer todo o ciclo da pirólise lenta a uma taxa de variação de temperatura de 10°C/min”. Os resultados produzidos no processo de pirólise lenta obtidos foram avaliados e os autores concluíram que para a temperatura de 500°C, o rendimento médio de bio-carvão foi de 40% enquanto que para este mesmo valor de temperatura o rendimento energético do bio-óleo e dos gases não condensáveis foram entre 50% a 60%.

Shariff; Aziz e Addullah (2014) estudaram a pirólise lenta de biomassa visando entender qual seria o impacto do teor de cinzas do óleo de palma contido no fruto quando comparado ao rendimento do bio-carvão após processamento em pirólise lenta com taxa de temperatura a 550°C a uma taxa de aquecimento de 5°C/min por uma hora para amostras de 100g de biomassa. Desta forma, os autores observaram o impacto causado pelo teor de cinzas na redução do rendimento do bio-carvão e pelo alto teor de carbono fixo tanto para a pirólise da biomassa bruta como da biomassa lavada.

Hernandez-Mena e Arai (2014) empregaram bambu em um gaseificador de leito fixo trabalhando em temperaturas na faixa entre 300°C a 600°C e a uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Para entender o comportamento do bambu frente a sua degradação térmica através da pirólise, os autores fizeram a análise a termogravimétrica (TGA/DTG) da biomassa. Os resultados obtidos foram avaliados através de análises físico-químicas para entender qual seria a participação da pirólise lenta nas alterações de propriedade do bio-carvão.

Houve um maior rendimento energético comparado à biomassa em si devido à produção simultânea de bio-carvão e bio-óleo. Segundo os autores, o bio-carvão produzido a partir da pirólise lenta do bambu mostraram ser adequados ao uso e aplicação agrícola e como fonte de energia por apresentar propriedades adequadas. Além disso, a elevada porosidade observada e teor de carbono sugerem a sua aplicação como carvão ativado após uma ativação física ou química.

- Pirólise rápida

A pirólise rápida tem como principal característica ser realizada a altas taxas de aquecimento com um curto intervalo de tempo de permanência nas fases sólidas e gasosas e sólidas no gaseificador. Diferentemente da pirólise lenta na qual se objetiva obter o maior rendimento na fase sólida, a pirólise rápida se baseia num processo que visa à conversão da biomassa em líquido, tendo por resultado o bio-óleo como produto principal. Segundo o estudo apresentado por Yaman (2004) o processo de uso da pirólise rápida é realizada em uma ampla faixa de temperatura que varia entre “450°C a 850°C com um curto tempo de permanência de vapor variando entre 0,5s a 10s com uma elevada taxa de aquecimento, variando entre 10°C/s a 200°C/s.

A recuperação de voláteis em bio-óleo é possível através da recombinação desses quando armazenados na superfície do biochar, visto que o tempo de contato desses materiais com o biochar seria consideravelmente reduzido, em torno de 10 segundos”.

Guedes; Adão e Quessada (2010) por exemplo avaliaram o resultado obtido da pirólise rápida de biomassa feita resultante de biocombustíveis derivados do bio-óleo como aditivo de gasolina. Segundo os autores, no experimento foi utilizado como insumo para o processo de conversão energética as folhas da cana-de-açúcar e da gramínea capim elefante. Como resultado desse processo, foi observado que esse bio-óleo obteve um alto rendimento de ácidos carboxílicos no bio-óleo, dado atingido devido alta concentração de hemicelulose principalmente devido a palha de cana-de-açúcar e, consequentemente, pela alta porcentagem de ésteres no biocombustível. O capim elefante possui em média 30% de celulose e também de hemicelulose, e menos que 10% de lignina, contribuindo de forma significativa para o rendimento do bio-óleo.

- Pirólise Instantânea (flash/líquido e flash/gás)

A pirólise instantânea tem como principal característica taxas de aquecimento extremamente altas com tempo de residência de vapor curto (<0,5s) e taxas de aquecimento acima de 1000°C/s. Esta através de curto espaço de tempo e alta temperatura promove a produção de voláteis, que podem ser recuperados e transformados em bio-óleo ou gás de síntese incondensável. Conforme a matéria-prima é aquecida, a maioria de suas ligações químicas será quebrada para liberar mais voláteis; além disso, alguns voláteis quimicamente instáveis se racharão em gás de síntese que não se condensa por causa da rachadura secundária.

3.2.2. Pirólise da casca de castanha de caju

A literatura mostra diferentes trabalhos aplicados para a pirólise da casca de castanha de caju com diferentes condições experimentais das quais, em teoria, se torna viável o uso desse material para fins energéticos.

Através do estudo realizado por Moreira (2015) é possível verificar os métodos adotados na condução dos resultados obtidos, sendo este processo realizado de duas formas: casca da castanha de caju *in natura* e casca da castanha de caju *in natura* triturada com uso de gaseificador com aquecimento por chama, conforme indicado na Figura 3.18 com o objetivo de se obter o bio-óleo a partir da fase líquida do processo de pirólise e as cinzas de pirólise, já na fase sólida. Além desses resultados obtidos no experimento, também a autora fez a análise e comparação das características físico-químicas da CCC *in natura* por meio de análise elementar, poder calorífico e análises de enxofre.

Figura 3.18 - Gaseificador de pirólise tipo batelada utilizado na pirólise lenta da CCC



Fonte: Moreira (2015)

Com a realização do experimento observou-se que a casca da castanha de caju que in natura ou triturada apresentam um índice de umidade total na faixa de 9% quando comparadas com outras biomassas. Moreira (2015) também cita que em relação ao teor de umidade da casca da castanha de caju se comporta similarmente à outras formas de biomassa, variando entre 8,4% a 9,1% do seu peso. Nesse estudo a autora também fez menção ao artigo elaborado por Almeida (2008), ao qual é relatado em seu estudo com palha da cana de açúcar que “valores de umidade menores que 10% em massa são adequados para conversão em processos termoquímicos como a pirólise e a gaseificação”. Além disso, os valores encontrados para enxofre, carbono fixo, oxigênio, matérias voláteis e teores de cinzas nas amostras da casca da castanha de caju *in natura* e triturada foram divulgados na tabela 3.9 juntamente com os teores de carbono fixo e oxigênio.

Tabela 3.9 - Carbono fixo, enxofre, teor de cinzas, matérias voláteis e oxigênio da casca da castanha de caju

	Casca da castanha de caju <i>in natura</i>	Casca da castanha de caju triturada
Teor de cinzas - % massa	7,9	5,3
Matérias voláteis - % massa	69,8	70,9
Carbono fixo - % massa	22,3	23,8
Enxofre - % massa	<0,1	<0,1
Oxigênio - % massa	34,80	38,06

Fonte: Moreira (2015)

A análise elementar da amostra de CCC dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e poder calorífico inferior e superior apresentou os resultados conforme tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Percentual de carbono, hidrogênio, nitrogênio e poder calorífico da casca da castanha de caju

	Casca da castanha de caju <i>in natura</i>	Casca da castanha de caju triturada
Carbono - % massa	50,5	49,9
Hidrogênio - % massa	6,20	6,04
Nitrogênio - % massa	0,6	0,7
PCS – MJ kg⁻¹	21,3	20,7
PCI – MJ kg⁻¹	20,0	19,4
PCS – BU – MJ kg⁻¹	19,4 / 19,3	18,8 / 18,9
PCI – BU – MJ kg⁻¹	18,0 / 17,9	17,4 / 17,5

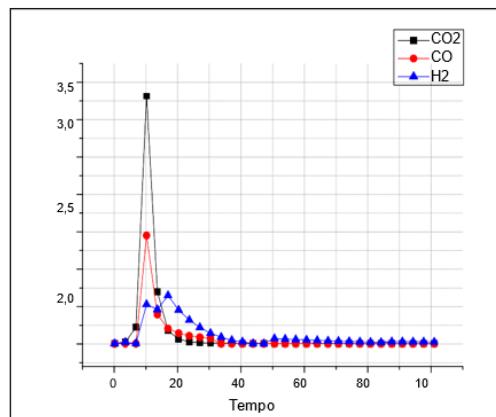
Fonte: Moreira (2015)

Das; Sreelatha e Ganesh (2004) realizaram um outro estudo com a utilização da pirólise lenta da casca da castanha de caju *in natura* obtendo os seguintes resultados na análise elementar: 49% para o carbono 7% de hidrogênio e 0,4% de nitrogênio. Ao ser submetida ao processo de retirada da fase líquida a temperatura de 150°C, os valores obtidos foram 35%, 5% e 0,4%, respectivamente.

Figueiredo (2009) também fez a análise elementar da casca da castanha do caju através de pirólise e no experimento e os resultados obtidos foram: percentuais para

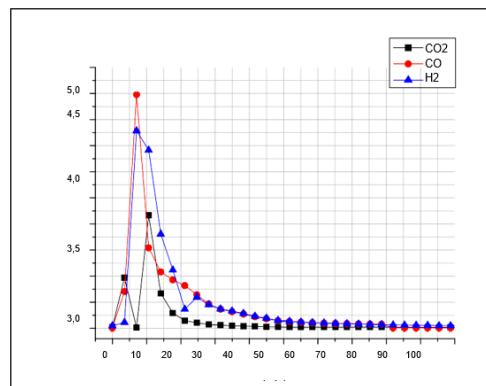
o carbono, hidrogênio e nitrogênio: 53%, 7% e 0,8% respectivamente e com o poder calorífico (PCS) em $22,45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Além dos resultados citados acima, Figueiredo (2009) também estudou a influência da temperatura durante o processo na obtenção de resultados. Esses dados foram observados da forma que ao se aumentar a temperatura do processo em 210°C partindo de temperatura de 670°C para 880°C com uma taxa de aquecimento livre na pirólise a 100% de N_2 , foi percebido uma maior formação de CO em detrimento da formação de CO_2 , ou seja, houve um aumento da concentração de CO e consequentemente uma diminuição da formação de CO_2 . Também foi perceptível, um aumento de tempo para emissão de voláteis, com aumento em torno de 10 minutos. Com essa alteração, as concentrações C_2H_4 , CH_4 e H_2 aumentaram expressivamente de acordo com o aumento da temperatura. Através das Figuras 3.19 e 3.20 é possível verificar a contribuição do aumento da temperatura no resultado de produção de H_2 . A Figura 3.19 traz o resultado da pirólise com taxa de aquecimento livre e temperatura de 670°C e a Figura 3.20 traz o resultado de pirólise nas mesmas condições mas com temperatura a 880°C , (dados extraídos de FIGUEIREDO, 2009).

Figura 3.19 – CO_2 , CO e H_2 obtidos com taxa de aquecimento livre e temperatura de 670°C em processo de pirólise



Fonte: Figueiredo (2009)

Figura 3.20 - CO₂, CO e H₂ obtidos com taxa de aquecimento livre e temperatura de 880°C no processo de pirólise



Fonte: Figueiredo (2009)

3.3. Gás de síntese como fonte de energia por meio da pirólise e gaseificação da casca de castanha de caju

Conforme já mencionado, a obtenção de gás de síntese mostra-se viável a partir da conversão de biomassa como da casca da castanha de caju para aplicação do hidrogênio e outros gases para fins energéticos. Segundo Tavares et al. (2010) alguns

estudos foram iniciados com a intenção de avaliar alternativas para a geração de hidrogênio através da reforma a vapor do gás de síntese gerado pela gaseificação da casca da castanha de caju. Como esse rejeito é abundante com cerca de 900.000 toneladas por ano, além do ganho da geração de energia através de uma fonte renovável, também haveria uma solução para um problema ambiental com o descarte apropriado desse material. Assim, com a obtenção de gás de síntese seria possível implantar um sistema célula a combustível de fonte totalmente renovável.

Nesse estudo sobre o potencial da casca da castanha de caju para fins de obtenção de hidrogênio, Tavares et al. (2010) apresentaram os seguintes processos durante seu procedimento experimental: preparação da amostra, determinação da umidade, teor de matéria volátil, teor de cinzas, porcentagem de carbono, hidrogênio e oxigênio. Dentre as medidas obtidas os resultados apresentados foram: 6,04% de umidade; 87,68% de teor volátil (composta de hidrocarbonetos e gases tais como hidrogênio, monóxido de carbono e metano); 12,32% de teor de cinzas; 47,49% de carbono; 6,01% de hidrogênio; 0,44% de nitrogênio e 46,06% de oxigênio.

Já Meng et al. (2005) também apresentaram um estudo sobre a produção de gás de síntese e hidrogênio através da biomassa de duas formas: pelo uso de pirólise e por gaseificação:

- *Gás de síntese através da pirólise da biomassa:* No estudo apresentado pelos autores, foi destacado que os produtos de pirólise rápida podem ser encontrados nas fases de gases, líquidos e sólidos:

- (i) Produtos gasosos incluem H₂, CH₄, CO, CO₂ e outros gases dependendo da natureza orgânica da biomassa para pirólise;
- (ii) Produtos líquidos incluem alcatrão e óleos que permanecem em à temperatura ambiente, como acetona, ácido acético, etc;
- (iii) Os produtos sólidos são compostos principalmente por carvão e praticamente carbono puro e outros materiais inertes.

Embora a maioria dos processos de pirólise sejam projetados para produção de biocombustíveis, o gás de síntese pode ser produzido diretamente através pirólise rápida ou instantânea se alta temperatura e suficiente tempo de residência da fase volátil são permitidos, como descrito na eq. 3.3.1:



O metano e outros vapores de hidrocarbonetos produzidos podem ser reformados para uma maior produção de hidrogênio como citado através da eq. 3.3.2:

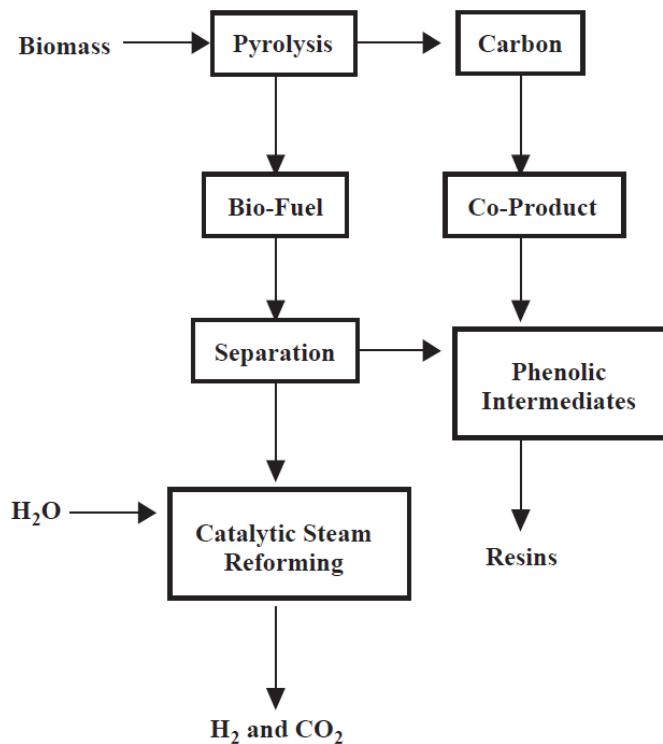


Para aumentar ainda mais a produção de hidrogênio, a reação de shift água-gás pode ser aplicada conforme mostra a eq. 3.3.3:



Além dos produtos dessa reação na fase gasosa, os produtos extraídos como o bio-óleo também pode ser retrabalhado para se gerar de hidrogênio. O óleo de pirólise pode ser separado em duas frações com base na solubilidade em água. A fração solúvel em água pode ser usada para produção de hidrogênio enquanto a fração insolúvel em água pode ser empregada em formulações de adesivos. A Figura 3.21 mostra a obtenção de H₂ através da conversão de biomassa

Figura 3.21 – Hidrogênio através da conversão de biomassa



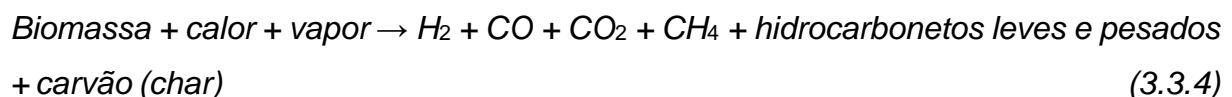
Fonte: Meng et al. (2005)

Neste estudo experimental realizado, quando o catalisador à base de Ni é usado, o máximo rendimento em hidrogênio pode chegar a 90%. Com a reforma de vapor adicional e a reação de shift água-gás, o rendimento na produção de hidrogênio pode ser aumentado significativamente. Temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e tipo de catalisador usado são importantes parâmetros de controle do processo de pirólise. Para favorecer os produtos gasosos, especialmente durante a produção de hidrogênio são necessários: alta temperatura, alta taxa de aquecimento e tempo de residência elevado. Esses parâmetros podem ser regulados pela seleção entre diferentes tipos de reator e modos de transferência de calor, tais como transferência de calor por convecção gás-sólido e transferência de calor por condução sólido-sólido. Alguns sais inorgânicos, como cloretos, carbonatos e cromatos, exibem efeito benéfico na taxa de reação de pirólise. No tocante à viabilidade financeira, a produção de hidrogênio pela pirólise de biomassa se mostrou atrativa.

Por exemplo, Yeboah et al. (2003) construiram uma planta de demonstração para a produção de hidrogênio por meio de gás de síntese a partir da pirólise de cascas de amendoim e reforma a vapor em reator de leito fluidizado com taxas de produção de

250kg H₂/dia. Os autores estimaram o custo de produção de H₂ através pirólise de biomassa como estando na faixa de US\$ 8,86/GJ a US\$ 15,52/GJ, dependendo do tamanho da instalação e tipo de biomassa. Para efeito de comparação, os custos de produção de hidrogênio por sistemas de eletrólise eólica e sistemas de eletrólise fotovoltaica são estimados, respectivamente, entre US\$20,2/GJ e US\$41,8/GJ, Verifica-se, portanto que a pirólise de biomassa é um método competitivo para produção de hidrogênio.

- *Gás de síntese através da gaseificação de biomassa:* A biomassa pode ser gaseificada a altas temperaturas (acima de 1000k) sendo que sofrem oxidação parcial resultando em produção de gás e carvão. O carvão é finalmente reduzido e formam H₂, CO, CO₂ e CH₄. Este processo de conversão pode ser expresso como trazido por meio da eq. 3.3.4:



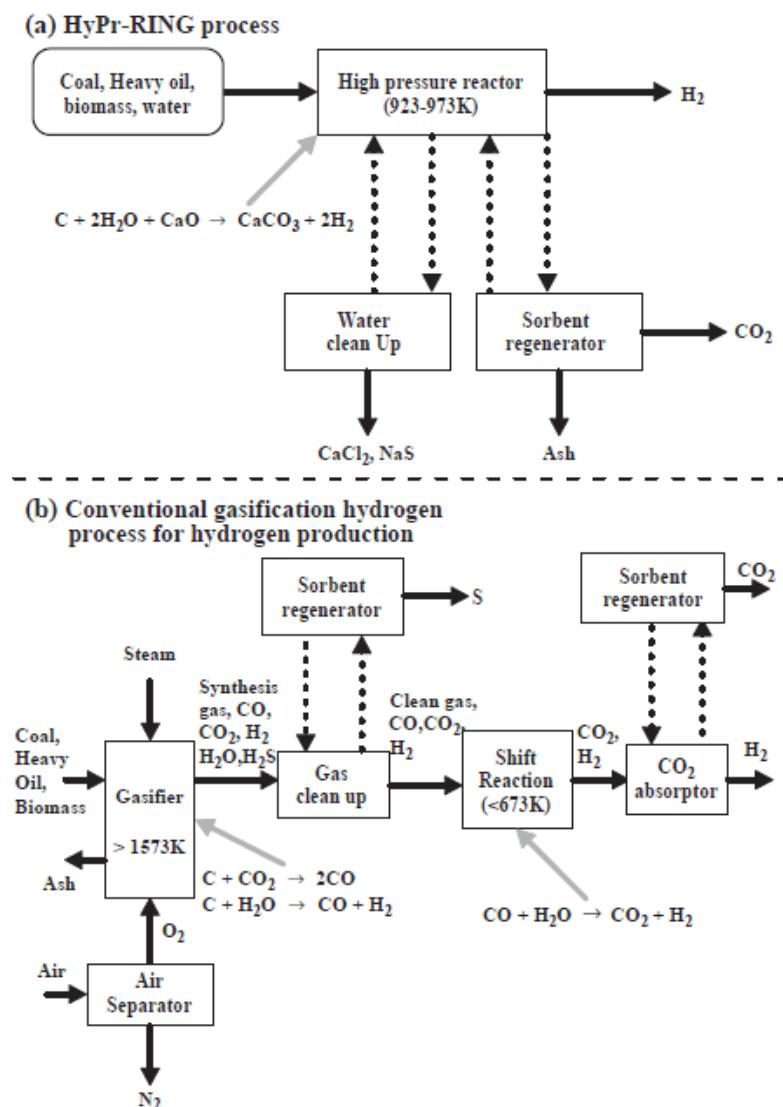
Ao contrário da pirólise, a gaseificação da biomassa sólida é realizada na presença de O₂. Além disso, a gaseificação visa produzir produtos gasosos enquanto a pirólise visa produzir bio-óleos e carvão. Os gases produzidos podem ser reformados a vapor para se produzir por exemplo hidrogênio e este processo pode ser melhorado por reações de shift água-gás. O processo de gaseificação é aplicável à biomassa com teor de umidade inferior a 35%. Uma das principais questões na gaseificação de biomassa é lidar com a formação de alcatrão e cinzas que ocorrem durante o processo de produção. Para otimizar o processo de produção de gás de síntese e hidrogênio, vários esforços têm sido feitos por pesquisadores para testar produção a partir da gaseificação de biomassa com vários tipos de biomassa e em várias condições operacionais. Por exemplo, ao se usar um gaseificador de leito fluidizado junto com catalisadores adequados e através de reação de shift, é possível alcançar a produção de hidrogênio cerca de 60 % em volume. Essa alta eficiência de conversão torna gaseificação de biomassa uma alternativa atrativa para produção de gás de síntese com o objetivo final de se obter hidrogênio. Nos últimos anos, um novo método de

gaseificação, ou seja, produção de hidrogênio por reação integrada (HyPr-RING) foi proposto por Lin et al. (2002). A metodologia HyPr-RING envolve a gaseificação com vapor de água de materiais carbonosos e a captura de CO₂ pelo CaO. Segundo os autores, a análise termodinâmica indica que, se o gás CO₂ pode ser removido durante a reação de shift gás-água, o CO pode ser convertido para H₂ a uma temperatura comparativamente alta. Isto sugere que as três reações ou etapas necessárias para a produção de H₂ (processo convencional - gaseificação de carvão, reação de shift gás água e separação de CO₂) podem ocorrer sob as mesmas condições de funcionamento e podem ser integradas em um único reator. A principal reação deste novo método está apresentada na eq. 3.3.5:



Esta reação é exotérmica e alto rendimento de hidrogênio pode ser alcançada a uma temperatura relativamente baixa (923K – 973 K). Comparativamente à gaseificação convencional, o processo HyPr-RING conforme ilustrado na Figura 3.22, pode ser conduzido de forma mais simples visto que a reação para a produção de hidrogênio e a separação de gás é realizada em um único reator a uma menor temperatura. Este novo processo de gaseificação tem sido analisado teoricamente e demonstrado experimentalmente já que é uma técnica muito eficiente para produção de hidrogênio a partir de biomassa. Quando a biomassa tem alto teor de umidade (acima de 35%), a gaseificação requer uma condição de água supercrítica. Sob as severas condições obtidas pelo aquecimento da água a uma temperatura acima de sua temperatura crítica (647K) e compressão a uma pressão acima de sua pressão crítica (22MPa), a biomassa é rapidamente decomposta em pequenas moléculas ou gases em poucos minutos com alta eficiência. A gaseificação em água em condição supercrítica é um processo promissor para gaseificar a biomassa com alto teor de umidade devido à alta taxa de gaseificação (100% atingível) e alta proporção volumétrica de hidrogênio (50% alcançável). A Fig. 3.22 apresenta um comparativo entre processo HyPr-RING (hydrogen production by reaction-integrated novel gasification) e gaseificação convencional na conversão de Hidrogênio.

Figura 3.22 – Comparativo entre processo HyPr-RING (hydrogen production by reaction-integrated novel gasification) e gaseificação convencional na conversão de Hidrogênio



Fonte: Meng et al. (2005)

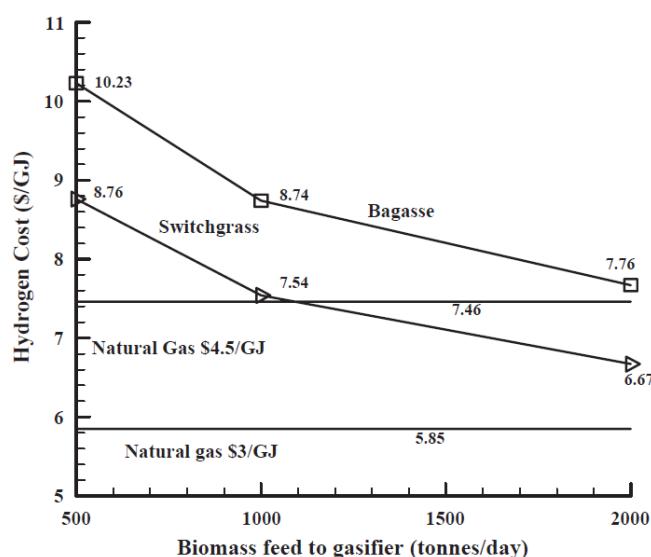
Nos últimos anos, uma extensa pesquisa tem sido realizada para avaliar a adequação de várias tipos de gaseificação de biomassa úmida em considerando a água em condição supercrítica. No entanto, pesquisas foram principalmente em escala de laboratório e em um estágio inicial de desenvolvimento. Os princípios e mecanismos básicos não são bem compreendidos ainda.

Yu; Aihara e Antal (1993) relataram que a gaseificação de glicose em água em condição água supercrítica (873K e 34,5Mpa), é diferente da condição não supercrítica. Uma vantagem é que, durante gaseificação, não ocorre formação de alcatrão nem carvão. Usando a glicose como um composto de referência, o rendimento de hidrogênio de mais de 50 vol.% pode ser alcançado com o uso de catalisadores adequados em condição supercrítica da água. Reatores tubulares são amplamente utilizados na gaseificação de água supercrítica por causa de suas estruturas robustas para suportar altas pressões. Embora este processo de gaseificação ainda esteja em seu início estágio de desenvolvimento, a tecnologia já mostrou sua competitividade econômica quando comparada com outros métodos de produção de hidrogênio.

Spritzer e Hong (2003) estimaram o custo de hidrogênio produzido pela gaseificação de água em condição supercrítica em cerca de US\$3/GJ (US\$ 0,35/kg).

A Figura 3.23 apresenta um comparativo de custo produtivo de hidrogênio através de gaseificação de biomassa e da reforma a vapor do gás natural

Figura 3.23 – Comparativo de custo produtivo de hidrogênio através de gaseificação de biomassa e através da reforma a vapor do gás natural



Fonte: Meng et al. (2005)

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para este trabalho se constituiu na revisão bibliográfica, comparação entre dados analíticos, e busca e análise de informações divulgadas em livros, sites, artigos e publicações. Entre a literatura estudada, têm-se a tese de Renata Moreira sobre o “Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju, 2015”. Também sobre aplicações de outros tipos de biomassa é destacado o estudo trazido por Park (2014) sobre a pirólise lenta da casca de arroz e de Shariff (2008), sobre o estudo da pirólise lenta de óleo de palmeira. Entender as diferenças entre as distintas biomassas contribuiu na comparação das características fisico-químicas de cada componente. Além disso, os estudos pesquisados destacaram a viabilidade do uso de gaseificadores para produção de hidrogênio através da conversão da casca da castanha de caju tais como a tese trazida por Yeboah (2003) sob o tema “Hidrogênio a partir de biomassa para transporte urbano” e por Meng (2004), sob o tema “Uma visão geral da produção de hidrogênio através de biomassa”. Dentre as fontes consultadas, destaca-se o estudo elaborado pelo Ministério de Minas e Energia, (2008) liderado por Eduardo José Fagundes Barreto sob o tema: “Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia”, que teve o objetivo apresentar alternativas de eletrificação e de beneficiamento às comunidades rurais na região amazônica.

Com base nas referidas fontes são abordados tópicos que foram usados como estrutura para este estudo, tais como:

- Princípios para uso de biomassa como combustível;
- Calor de reação e poder calorífico;
- Etapas do processo de combustão de sólidos;
- Processo de gaseificação de sólidos.

Com esses conceitos em mente sobre a viabilidade do uso de biomassa além de se entender as possíveis aplicações, iniciou-se o processo de estudo sobre o produto

advindo do cajueiro. A literatura sobre o tema Cajucultura de Maria Simone de Castro Pereira Brainer do Escritório Técnico de Estudo Econômico do Nordeste – ETENE de 2022 traz a comparação da produção do caju no Brasil e no mundo reforçando a viabilidade do emprego da casca de castanha de caju material para fins energéticos.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos dados obtidos nos estudos apresentados por Moreira (2015) e Kimura, (2009) quanto á análise imediata da CCC é possível destacar as seguintes características:

5.1. Umidade total

Os valores apresentados pelos autores e compartilhados foram todos obtidos abaixo de 10%, no resultado do processo de secagem pela qual a castanha passa para se extrair a amêndoas e posterior retirada do líquido da castanha de caju o que possibilita o uso desta biomassa para os processos de pirólise.

5.2. Teor de cinzas

O teor de cinzas obtidos nos experimentos foram de 5,3% e 3,29% para os experimentos de Moreira (2015) e Kimura (2009) respectivamente. Este resultado é um importante parâmetro para o processo de combustão, pois altos teores de cinzas podem causar problemas de incrustações, entupimentos e corrosão em processos de combustão e pirólise, resultando em aumento dos custos de operação (SAIT *et al.*, 2012). Logo, o baixo teor de cinzas pode demonstrar a boa aplicabilidade dessas biomassas em processos termoquímicos de conversão energética. Embora os teores de cinzas afetem o rendimento de pirólise de uma forma negativa, o trabalho feito por Moreira, (2015) mostra a viabilidade da CCC para utilização em processos de conversão termoquímicos.

5.3. Poder calorífico

O poder calorífico mostra a capacidade da matéria de liberar energia, ou seja, quanto maior for esse valor, mais energia a biomassa terá. No caso dos experimentos de

Moreira (2015) e Kimura (2009) os valores obtidos para poder calorífico superior foram de 21,3 MJ/kg e 23,29 MJ/kg respectivamente. Comparado com outras biomassas, o poder calorífico superior da CCC é maior do que do bagaço da cana-de-açúcar (17,74 MJ/kg), da palha de arroz (2,72 MJ/kg) ou casca de soja (13,81 MJ/kg).

5.4. Material Volátil

O processo de pirólise da CCC apresenta um alto teor de matéria volátil que comprova que uma grande quantidade de gases combustíveis podem ser liberados a partir do aquecimento dessas biomassas quando devidamente secas, visto que quanto maior for o teor de material volátil, maior é a facilidade da biomassa entrar em ignição em baixas temperaturas com estabilidade de chama e maior a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama. Além disso, quanto maior o teor de material volátil, maior a capacidade de produção de óleo a partir de uma biomassa submetida à pirólise.

Com base nos dados trazidos acima, este insumo se torna uma excelente opção para aplicação em fins energéticos.

A conversão de biomassa em gás de síntese e hidrogênio foi destacada através da pesquisa feita por Meng et al. (2005) da qual foi apresentado o resultado através de tecnologias de processamento de combustível por meio do processo Hypr-Ring, conforme Figura 5.1. Através dessa tecnologia foi possível de forma muito mais simples obter-se as reações através de catalisadores e gaseificadores distintos resultando na obtenção do gás de síntese através da conversão de biomassa por meio de um único reator operando em altas pressão e temperatur, (como 20 MPa e 1000 K) resultando em uma eficiência de 1 mol de carbono gerar 2 mols de hidrogênio.

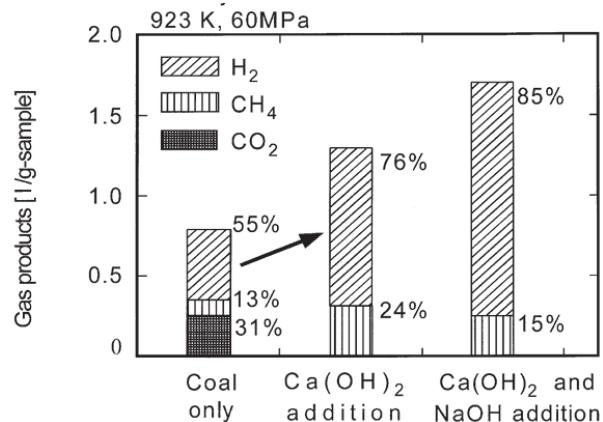
Figura 5.1 – Produção de hidrogênio através de gaseificação de biomassa.

Feedstock	Reactor type	Catalyst used	Hydrogen production (vol.%)
Sawdust	Not known	Na ₂ CO ₃	48.31 at 700 °C 55.4 at 800 °C 59.8 at 900 °C
Sawdust	Circulating fluidized bed	Not used	10.5 at 810 °C
Wood	Fixed bed	Not used	7.7 at 550 °C
Sawdust	Fluidized bed	Not known	57.4 at 800 °C
Not known	Fluidized bed	Ni	62.1 at 830 °C
Sawdust	Fluidized bed	K ₂ CO ₃ CaO Na ₂ CO ₃	11.27 at 964 °C 13.32 at 1008 °C 14.77 at 1012 °C
Pine sawdust	Fluidized bed	Not known	26–42 at 700–800 °C
Bagasse			29–38 at 700–800 °C
Cotton stem			27–38 at 700–800 °C
<i>Eucalyptus gobulus</i>			35–37 at 700–800 °C
<i>Pinus radiata</i>			27–35 at 700–800 °C
Sewage sludge	Downdraft	Not known	10–11
Almond shell	Fluidized bed	La–Ni–Fe Perovskite	62.8 at 800 °C 63.7 at 900 °C
Switchgrass	Moving bed	Cu–Zn–Al	27.1

Fonte: Meng et al. (2005)

Lin et al. (2001) fizeram alguns experimentos utilizando o processo Hypr-Ring para obtenção de hidrogênio por meio de carvão com temperatura a 923K e pressão de 60MPa. A análise primária desse estudo foi verificar qual seria o impacto do uso de catalisador e absorvente de CO₂ durante o processo de conversão energética. A Figura 5.2 mostra o resultado de gás produzido sem catalisador e absorvente de CO₂, do qual verificou-se 0,8 l/g de carvão, medido a 298K e 101KPa. O gás continha teores de cerca de 55% de H₂, 13% de CH₄, 31% de CO₂ e 1% de C₂H₆ e cerca de 0,2% de CO. Já com o absorvente de CO₂ tipo (Ca(OH)₂), a taxa de produção de gás aumentou até 1,3 l/g-carvão. A composição do gás era de cerca de 76% de H₂, 24% CH₄ e menos de 1 por cento de C₂H₆. O CO₂ foi de 0,1% e apenas traços de CO foram encontrados no produto gasoso. Com o absorvente de CO₂ e o catalisador (NaOH), o produto gasoso aumentou mais para 1,70 l/g de carvão, incluindo 85% de H₂, 15% CH₄ e menos de 0,1% de CO₂.

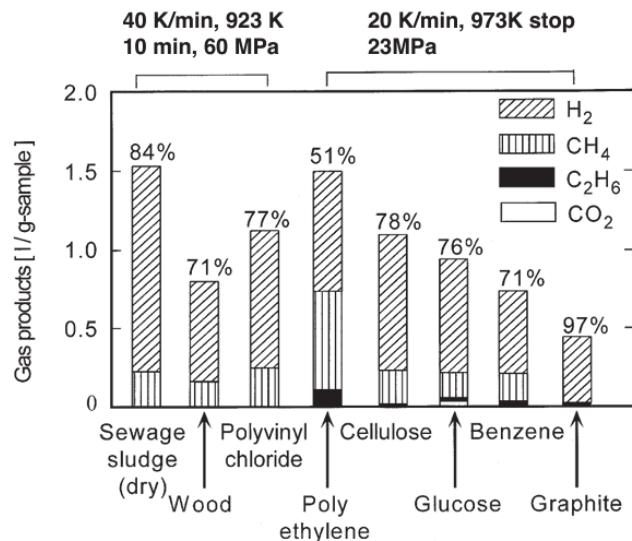
Figura 5.2 – Efeito do uso de absorvedores de CO₂ no processo de obtenção de gás de síntese.



Fonte: Lin et al. (2001)

A Figura 5.3 mostra os resultados da produção de gás por meio do processo (HyPr-RING) através de diferentes fontes de materiais orgânicos.

Figura 5.3 – Produção de gás por meio do processo HyPr-RING através de diferentes fontes de materiais orgânicos



Fonte: Lin et al. (2001)

Segundo a análise dos dados experimentais obtidos pelos autores, para o processo de Hypr-Ring observa-se o resultado de conversão de gás contendo 80% de hidrogênio e 20% de metano em um reator de estágio único. O processo HyPr-Ring pode aceitar materiais com alto teor de água, como carvão marrom, carvão sub-betuminoso e também qualquer outro tipo de material orgânico.

6.CONCLUSÃO

A casca da castanha de caju apresenta um grande potencial para ser uma fonte renovável para a geração de energia, primeiramente porque seu poder calorífico apresenta excelentes valores quando comparados com outras formas de biomassas e também porque aproximadamente 60% da massa da noz de caju está associado à sua casca, sendo esta uma biomassa muito abundante no nordeste brasileiro. Como esta região concentra a maior parte da produção nacional, o processo de conversão de energia com a utilização da CCC, devido a fatores logísticos, se torna mais difícil em outras regiões do Brasil. A obtenção de energia através da casca de castanha de caju pode ser feita várias maneiras, como por exemplo, através da briquetagem das cascas, que consiste em transformar o resíduo em combustível sólido pelas etapas de moagem, secagem e compactação. Uma outra forma de conversão energética do caju é através da conversão do líquido da casca de castanha (LCC) na produção de energéticos como o biodiesel ou também conforme destacado nesse trabalho, através do processo de pirólise e gaseificação, por meio de conversão da dessa biomassa em um gás energético. A obtenção de gás de síntese e de hidrogênio a partir de processos termoquímicos dessa biomassa se mostrou viável pelo prisma das tecnologias atualmente presentes, como o Hypr-Ring e de reforma a vapor do gás de síntese, do qual faz com que o teor de hidrogênio resultante da análise elementar do processo se eleve e assim, apresenta um resultado mais satisfatório. Quanto à caracterização do resíduo em estado sólido, por meio de análise elementar e análise imediata dessa biomassa, resultados favoráveis mostram que pode ser utilizada como combustível.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

1. Analisar aplicações de uso do líquido da castanha de caju (LCC) e possibilidade de uso na absorção de calor;

2. Estudar a viabilidade econômica do processo de pirólise de biomassa;
3. Estudar a homogeneidade das temperaturas durante processo de combustão e gasificação;

REFERÊNCIAS

AGENCIA BRASIL: **Brasil gera 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, 2019.** Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/brasil-gera-79-milhoes-de-toneladas-de-residuos-solidos-por-ano>. Acesso em 10 de mar. de 2023.

AGENCIA SENADO, IPEA: **Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores, 2021.** Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores>. Acesso em 07 de mar. de 2023.

AHAD, N.; KLERK, A., **Fischer-Tropsch acid water processing by kolbe electrolysis**, p. 415-419 – 211, 2018.

ANDRADE, R.V., **Gaseificação de Biomassa: Uma análise teórica e experimental**, 2007.

AYSU, T.; KUÇUK, M.M., **Liquefaction of giant fennel (*Ferula orientalis* L.) in supercritical organic solvents: Effects of liquefaction parameters on product yields and character**, *J. Supercrit. Fluids*, 83, 104–123, 2013.

BASU, P., **Combustion and gasification in fluidized beds.** Taylor & Francis Group, p. 257, 2006.

BRAINER, M.S.C.P., **Cajucultura**, 2022.

BELGIORNO, V.; DE FEO, G.; DELLA ROCCA, C., **Energy from gasification of solid wastes. Waste management**, v. 27, p. 1 – 15, 2003.

CARIOCA, J.O.B.; ARORA, H.L., **Biomassa: Fundamentos e aplicações tecnológicas**, Fortaleza, Banco do Nordeste do Brasil, Universidade Federal do Ceará, p. 65 – 441, 1984.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; AYARZA, J. A. C., **Biomassa para Energia**. Série Sistemas Energéticos. 2008. Cap. 1, Editora da Unicamp, pp. 15-27.

D'ALMEIDA, M. L. O., **Composição química dos materiais lignocelulósicos In celulose e papel – tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: Senai/IPT, v. 2, p. 45-106, 1988.

DAS, P.; SREELATHA, T.; GANESH, A., **Bio oil from pyrolisys of cashew nut shell – characterization and related properties**, Biomass and bioenergy, v. 27, p. 265 – 275, 2004.

DEMIRBAS, A. **Products from lignocellulosic materials via degradation processes**. Energy Source A, v. 30, p. 30:27–37, 2008.

FARINAS, C.S., **A parede celular vegetal e as enzimas envolvidas na sua degradação**, 2011.

FIGUEIREDO, F.A.B, **Pirólise e gaseificação de casca de castanha de caju: Avaliação da produção de gás, líquidos e sólidos**, 2009.

FUNAZUKURI, T.; HUDGINS, R.R.; SILVESTON, P.L., **Product distribution for flash pyrolysis of cellulose in a coil pyrolyzer**. J Anal Appl Pyrolysis 10: 225–249, 1986.

GNPW Group: **A importância dos resíduos sólidos urbanos na geração de energia, 2021**. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/energia-pt/a-importancia-dos-residuos-solidos-urbanos-na-geracao-de-energia>. Acesso em 14 de abr. de 2023.

GUEDES, C.L.B.; ADÃO, D.C.; QUESSADA, T.P., **Evaluation of biofuel derived from lignocellulosic biomass fast pyrolysis bio-oil for use as gasoline additive**, Quimica Nova, v. 33, p. 4, 2010.

HAJALIGOL, M.L.; SHARMA, R.K.; WOOTEN, J.B.; BALIGA, V.L., **Characterization of chars from biomass-derived materials: pectin chars**. Fuel, [S.I.], v. 80, p. 1825-1836, 2001.

HERNANDEZ-MENA, L. E.; ARAI, A.B., **Slow pyrolysis of bamboo biomass: analysis of biochar properties**. v. 37, 2014.

IBGE. PECUÁRIA NACIONAL: **Rebanho bovino bate recorde em 2021 e chega a 224,6 milhões de cabeças, 2022.** Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2022/09/rebanho-bovino-bate-recorde-em-2021-e-chega-a-224-6-milhoes-de-cabecas>. Acesso em 10 de mar. de 2023.

IRENA: **Bioenergy & Biofuels, 2022.** Disponível em: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Bioenergy-and-biofuels>. Acesso em 10 de mar. de 2023.

KIMURA, L.M., **Uma contribuição à pirólise de biomassa: Avaliação de alguns resíduos na agroindústria como fonte de energia alternativa**, 2009.

LEE, D.; OWENS, V. N.; BOE, A.; JERANYAMA, P., **Composition of herbaceous biomass feedstocks**. South Dakota State University Publication, 2007.

LIN, S.Y.; SUZUKI, Y.; HATANO, H.; HARADA, M., **Development an innovative method, HyPr-RING, to produce hydrogen from hydrocarbons**, Energy Conversion and Management 43, 2001.

MAITLIS, P.M.; KLERK, A., **Greener Fischer-Tropsch processes for fuels and feedstock**, p. 17-19, 2013.

MENG, N.; LEUNG, D.Y.C.; LEUNG, M.K.H.; SUMATHY, K., **An overview of hydrogen production from biomass**. The University of Hong-Kong, 2005.

MOREIRA, R., **Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju**, 2015.

MOURA, J. P., **Estudo do dimensionamento da produção de biogás a partir de resíduos residenciais, industriais e de matrizes suínas a partir de uma revisão da literatura**. Revista Educação Ambiental em Ação. Itajaí, SC: Dezembro/2011-Fevereiro/2012. Número 38.

OGATA, B.H., **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açucar e potencial de uso em biorrefinarias**, 2013.

PARK, J.; LEE, Y.; RYU, C.; PARK, Y.K., **Slow pyrolysis of rice straw: Analysis of products properties, carbon and energy yields**. Bioresource Technology, v. 155, p. 63-70, 2014.

PHAN, A.N.; RYU, C.; SHARIFI, V.N.; SWITHENBANK, J., **Characterisation of slow pyrolysis products from segregated wastes for energy production**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 81, p. 65-71, 2008.

SAHA, B.C.; ITEN, L.B.; COTTA, M.A.; WU, Y.V., **Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification, and fermentation of wheat straw to ethanol**. Proc. Biochem., v. 40, p.3693- 3700, 2003.

SHARIFF, A.; AZIZ, N.S.M.; ADDULLAH, N., **Slow pyrolysis of oil palm empty fruit bunches for biochar production and characterisation**. Journal of Physical Science, v. 25, n.2, p. 97-112, 2014.

SPRITZER, M.H.; HONG, G.T., **Supercritical water partial oxidation**, Progress Report, National Renewable Energy Laboratory, 2003.

TAVARES, B.G.; LINARDI, M.; SANTOS, I.; EGUTE, N.S.; ORSINI, R.R.; CARVALHO, F.M.S., **Estudo do potencial da casca de castanha de caju para obtenção de hidrogênio**, 2010.

UN. COP27: **What you need to know about this year's big UN Climate Conference, 2023.** Disponível em: <https://www.un.org/en/desa/cop27-what-you-need-know-about-year%20%99s-big-un-climate-conference>. Acesso em 12 de fev. de 2023.

WALKER, G.M.; WALKER, R.S.K., **Enhancing Yeast Alcoholic Fermentations. Advances in Applied Microbiology**, 2018.

WILLIAMS, P.Y.; BESLER, S., **The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass.** Renewable Energy, v.7, n.3, p. 233-250, 1996.

YANG, L.; LIANG, J.; YU, L., **Clean coal technology – study on the pilot project experiment of underground coal gasification**, Energy, v. 28, p. 1445 – 1460, 2003.

YAMAN, S., **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemicals feedstocks**, Energy Conversion and Management, v. 45, p. 651 – 671, 2004.

YEBOAH, Y.; BOTA, K.; DAY, D.; MCGEE, M., **Hydrogen from biomass for urban transportation**, Hydrogen, Fuel Cells and Infrastructure Technologies Program Review Meeting, Berkeley, CA, 2003.

YU, D.H.; AIHARA, M.; ANTAL, J., **Hydrogen production by steam reforming glucose in supercritical water**, Energy and Fuels 7, 1993.