

## Aproveitamento energético a partir da gaseificação de resíduos do cultivo de milho (*Zea mays*) após três anos em estoque

Energy use from the gasification of corn crop residues (*Zea mays*) after three years in Stock

Uso de energía de la gasificación de residuos de cultivos de maíz (*Zea mays*) después de tres años en stock

Recebido: 02/11/2021 | Revisado: 09/11/2021 | Aceito: 16/11/2021 | Publicado: 27/11/2021

**Clériston Moura Vieira Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5424-6378>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: [cleristonvieirajr@gmail.com](mailto:cleristonvieirajr@gmail.com)

**Humberto da Silva Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0297-1834>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: [humberto.s.santos@gmail.com](mailto:humberto.s.santos@gmail.com)

**Shirlene Thamiros Oliveira dos Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4245-9165>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: [shirlene.tamires@hotmail.com](mailto:shirlene.tamires@hotmail.com)

**Sérgio Peres Ramos da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2235-3507>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: [sergperes@gmail.com](mailto:sergperes@gmail.com)

### Resumo

O consumo de combustíveis tem sido muito elevado durante as últimas décadas, como consequência ocasionou-se um grave problema ambiental: o efeito estufa. Vários estudos estão sendo realizados a fim de se encontrar soluções. Outra grande adversidade está na grande quantidade de resíduos gerados na agricultura, cuja disposição final em boa parte não é sustentável tampouco lucrativa. O milho está entre os cereais mais produzidos no planeta, gerando uma quantidade ainda maior de resíduos. A cada tonelada de grão de milho coletado são produzidos cerca 1,4 toneladas de resíduos. Só no Brasil são mais de 100 milhões de toneladas por ano. Neste trabalho, os resíduos da cadeia produtiva do milho, sendo esses a folha, a palha e o colmo, foram utilizados após três anos em estoque para realizar a caracterização *in natura*. Foi realizada uma pré-secagem para análises posterior. As biomassas ficaram em estoque durante três anos. Após o período foram efetuadas a gaseificação, processo esse de conversão de biomassa em gás com propriedades combustíveis, *syngas*, utilizando diferentes parâmetros de temperatura (700 °C, 800 °C, 900 °C) e tempo de residência (três, quatro e cinco minutos). Nos gases combustíveis produzidos foram analisadas suas características individuais além de sua efetividade energética. O poder calorífico inferior do colmo, folha e palha são respectivamente 16,39 MJ.kg<sup>-1</sup>, 16,01 MJ.kg<sup>-1</sup> e 16,40 MJ.kg<sup>-1</sup>. Os maiores valores do poder calorífico inferior dos gases obtidos na análise do colmo, folha e palha foram respectivamente 4,99 MJ.Nm<sup>-3</sup>, 6,62 MJ.Nm<sup>-3</sup>, 4,97 MJ.Nm<sup>-3</sup>.

**Palavras-chave:** Biomassa; Syngas; Energia renovável; Processo termoquímico.

### Abstract

Fuel consumption has been very high over the last few decades, as a result of a serious environmental problem: the greenhouse effect. Several studies are being conducted in order to find solutions. Another great adversity is the large amount of waste generated in agriculture, whose final disposal is largely neither sustainable nor profitable. Corn is among the most produced cereals on the planet, generating an even greater amount of waste. Every ton of corn grain collected is produced about 1.4 tons of waste. In Brazil alone there are more than 100 million tons per year. In this work, the residues of the corn production chain, these being leaf, straw and stem, were used after three years in stock to perform the characterization *in natura*. After the period gasification was carried out, this process of conversion of biomass into gas with combustible properties, *syngas*, using different parameters of temperature (700 °C, 800 °C, 900 °C) and residence time (three, four and five minutes). In the combustible gases produced, their individual characteristics were analyzed in addition to their energy effectiveness. The lower calorific value of the stem, leaf and straw are 16.39 MJ.kg<sup>-1</sup>, 16.01 MJ.kg<sup>-1</sup> and 16.40 MJ.kg<sup>-1</sup>. The highest values of lower calorific value of gases obtained in the analysis of stem, leaf and straw were respectively 4.99 MJ.Nm<sup>-3</sup>, 6.62 MJ.Nm<sup>-3</sup>, 4.97 MJ.Nm<sup>-3</sup>.

**Keywords:** Biomass; Syngas; Renewable energy; Thermochemical process.

## Resumen

El consumo de combustible ha sido muy alto en las últimas décadas, como resultado de un grave problema ambiental: el efecto invernadero. Se están realizando varios estudios para encontrar soluciones. Otra gran adversidad es la gran cantidad de residuos generados en la agricultura, cuya disposición final no es en gran medida sostenible ni rentable. El maíz es uno de los cereales más producidos en el planeta, generando una cantidad aún mayor de residuos. Cada tonelada de grano de maíz recolectada produce alrededor de 1,4 toneladas de desechos. Solo en Brasil hay más de 100 millones de toneladas por año. En este trabajo, los residuos de la cadena de producción de maíz, siendo estos hoja, paja y tallo, fueron utilizados después de tres años en stock para realizar la caracterización in natura. Después del período de gasificación se llevó a cabo, este proceso de conversión de biomasa en gas con propiedades combustibles, gas de síntesis, utilizando diferentes parámetros de temperatura (700 ° C, 800 ° C, 900 ° C) y tiempo de residencia (tres, cuatro y cinco minutos). En los gases combustibles producidos, se analizaron sus características individuales además de su eficacia energética. El menor poder calorífico del tallo, hoja y paja es de 16,39 MJ.kg<sup>-1</sup>, 16,01 MJ.kg<sup>-1</sup> y 16,40 MJ.kg<sup>-1</sup>. Los valores más altos de menor poder calorífico de gases obtenidos en el análisis de tallo, hoja y paja fueron respectivamente 4,99 MJ. Nm<sup>-3</sup>, 6,62 MJ. Nm<sup>-3</sup>, 4,97 MJ. Nm<sup>-3</sup>.

**Palabras clave:** Biomasa; Gas de síntesis; Energía renovable; Proceso termoquímico.

## 1. Introdução

O Brasil tem aumentado em termos populacionais e econômicos, em relação às décadas anteriores, além de ter uma grande extensão territorial. Como resultado desses fatores, há uma elevação em demandas de alimentos e energia. A busca contínua por melhorias econômicas e soluções sustentáveis, tem recebido atenção de ampla comunidade de pesquisa em todo mundo (Paiva et al., 2012). Diversas alternativas vêm sendo estudadas a fim de solucionar esse problema. Em virtude da grande necessidade, a biomassa residual da colheita de grãos apresenta um enorme potencial como matéria prima para a produção de energia, uma vez que se encontra prontamente disponível e em quantidade expressiva (Pierri, 2014).

A produção energética advinda da biomassa residual das culturas agrícolas mostra-se uma alternativa interessante, uma vez que a geração de energia elétrica pode ser próxima ao local de consumo, diminuindo gastos com transmissão e otimizando o uso da terra, portanto, na mesma unidade de área se pode produzir alimentos e energia (Pierri, 2014). Uma alternativa pode ser sua utilização através do gás de síntese, além de ser uma opção para a substituição de combustíveis de origem fóssil e derivados. Através do processo de gaseificação é possível utilizar um composto orgânico para obter como produto uma mistura de gases rica em hidrogênio e óxido de carbono.

Diferentes resíduos podem ser utilizados como matéria-prima para finalidades energéticas, entretanto o milho tem grande destaque. Um motivo se deve ao fato de ser o cereal mais produzido do mundo, sendo bastante utilizado na indústria alimentícia assim como também na de combustíveis. É de fácil plantio e cultivo. O Brasil está entre os três maiores produtores do planeta (FIESP, 2021; USDA, 2021). Por outro lado, grandes produções dão origem a elevadas quantidades de resíduos.

Neste trabalho foi realizada a obtenção desta fonte de energia através da gaseificação dos resíduos do processamento do plantio de milho, mais especificamente o colmo (caule), folha e palha, após três anos de estocagem em temperatura ambiente, com o objetivo de demonstrar se estes apresentam um potencial energético significativo.

## 2. Cultura do Milho

Os alimentos à base de cereais são uma importante fonte de energia para a população (FAO, 2018). As três culturas com maior produção são milho, arroz e trigo. Entre estes a maior área cultivada de longe é dedicada ao trigo, entretanto devido ao seu menor rendimento médio por unidade de área de terra, a produção total de trigo é inferior a de milho e arroz (García-Lara & Serna-Saldivar, 2019).

O milho (*Zea mays L.*) pertence à família das gramíneas Poaceae (Gramineae) (Sempruch et al., 2015). Também é chamado por maise, abati, auati e avati. É um conhecido cereal, cultivado em grande parte do mundo. Há pelo menos sete milênios o milho participa da história alimentar mundial. Os primeiros registros de seu cultivo foram feitos no litoral do

México, mas rapidamente a cultura se espalhou para outros países. Na América do Sul, mais precisamente no sul do Peru, grânulos de milho foram encontrados de quatro mil anos, revelando que há cerca de 40 séculos, pelo menos, já se cultivava o alimento por essa região do continente (García-Lara & Serna-Saldivar, 2019).

Uma grande parte das áreas plantadas estão em posse de poucos produtores e são cultivadas em sistemas que tem como objetivo lucro. O cultivo de milho para produção de milho verde vem aumentando de maneira significativa, uma vez que tem apresentado maior valor agregado, pois na forma verde os preços pagos geram mais lucro que na forma de grãos secos. Sendo uma espécie de simples plantio e colheita, tendo mais de cento e cinquenta espécies diferentes, sendo uma ótima fonte energética para organismos, rico em vitaminas, proteínas, carboidratos, faz com que seja bastante utilizado na cozinha brasileira. A região Nordeste, do Brasil, se sobressai no uso alimentício, com destaque para cuscuz, fubá, canjica e mingau (Abimilho, 2018a).

No Brasil o milho possui duas safras, a principal (verão) e a ‘safrinha’ (inverno), no qual o plantio é zoneado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). O período de desenvolvimento do milho limita-se a água, umidade do solo, temperatura e radiação solar, fotoperíodo (tempo de exposição da planta à luz do Sol) nos quais devem atingir níveis considerados ótimos, afim de que o potencial energético alcance ao máximo (Cruz et al., 2010). Sendo assim, a produção varia de acordo com os efeitos externos, alterando de região para região (Abimilho, 2018b).

Em relação ao espaçamento entre as fileiras de milho nas lavouras, ainda é bastante variada, mesmo sendo evidente a tendência de sua redução, tendo uma vantagem de espaçamentos entre 45 e 50 cm entre as fileiras em relação a 80 e 90 cm. Diversos são os pontos positivos: quanto mais estreitos melhor o rendimento dos grãos, devido a distribuição mais equidistante de plantas na área, elevando a eficiência da radiação solar, água, nutrientes, controle das plantas daninhas e diminuição da erosão. Essa redução de espaço faz com que passe de 40.000 plantas. ha<sup>-1</sup> para 77.500 plantas. ha<sup>-1</sup> (Cruz et al., 2010).

O milho é um dos cereais de maior volume de produção no mundo. De acordo com a FIESP, o USDA, no seu 1<sup>o</sup> levantamento para a safra mundial de milho 2021/2022, tem uma previsão de safra de 1,19 bilhão de toneladas, com maiores aumentos para Estados Unidos, Brasil, China, Ucrânia e Argentina. A produção do Brasil tem uma projeção de 118 milhões de toneladas, um aumento de 15,7% em relação a 2020/2021.

As cotações do milho são mais relacionadas com a demanda interna do que com a externa, uma vez que o direcionamento de cerca de 70% da produção de milho é o mercado interno, podendo também sofrer influência do mercado externo. O preço da soja também interfere no do milho, já que frequentemente a produção de soja gera maior lucro, podendo fazer com que o produtor opte de maneira prioritária pelo cultivo pelo cultivo dela (Coelho, 2018).

Os materiais lignocelulósicos são uma fonte promissora de energia renovável, pois podem ser convertidos em biocombustíveis por meio de caminhos bioquímicos ou termoquímicos. O resíduo deixado no campo após a colheita do milho incluem palha, colmo e folhas, estes se destacando bastante devido a sua alta disponibilidade e taxa de produção (Karimi Alavijeh & Karimi, 2019; Qin et al., 2017). Aproximadamente 51,28% das biorrefinarias celulósicas operacionais, planejadas e em construção, são alimentadas com resíduos oriundos do cultivo de milho. Há de se ressaltar que entre 2000 e 2014, cerca de 16,42% de todas as publicações no campo da produção de biocombustíveis em detrimento de resíduos e resíduos agrícolas são referentes aos resíduos de milho (Karimi Alavijeh & Yaghmaei, 2016).

Hoje o milho é o cereal de maior importância em termos de produção. Há cerca de dez anos, o milho tornou-se líder mundial, devido ao desenvolvimento de genótipos genéricos e modificados geneticamente além de sua ampla adaptação a diferentes ecossistemas. É o grão líder em rendimento de grãos por hectare (FAO, 2018).

A quantidade de resíduos secos advindos do cultivo de milho coletada de forma sustentável no começo dos anos 2000 foi de 80 a 100 milhões de toneladas (Kadam & McMillan, 2003). A maioria dos resíduos agrícolas, incluindo os de milho, é queimada diretamente ou deixada no campo após a colheita, ocasionando impactos ambientais sérios e uma poluição do ar.

Estima-se que as emissões de gases do efeito estufa a partir do uso da terra agrícola é pelo menos 2,5 vezes superior ao total das emissões do transporte global (Asadi et al., 2017).

O volume de produção de milho e a relação resíduo/produto são dois fatores que levam a estimar a quantidade total de resíduos em detrimento do cultivo de milho (Daioglou et al., 2016). Em média, a geração de resíduos na cultura de milho é de cerca de 2,3 t/t de milho colhido (Koopmans & Koppejan, 1997)

### 3. Gaseificação

O processo foi utilizado para estudo em questão foi a gaseificação. Se trata de uma tecnologia promissora para aproveitamento da biomassa e de outros resíduos, uma vez que causa baixo impacto ao meio ambiente e redução de emissão de dióxido de carbono (Campoy et al., 2009; Kirubakaran et al., 2009). Consiste em um processo termoquímico que pode de maneira eficiente converter diferentes biomassas em *syngas*.

O *syngas* é uma mistura de gases, principalmente o monóxido de carbono, o dióxido de carbono e hidrogênio, porém outros produtos também podem ser formados durante o processo, tais como o alcatrão, carvão e cinzas (Asimakopoulos et al., 2018). A proporção varia de acordo com a matéria-prima, gaseificador e dos parâmetros operacionais durante o processo. Os principais parâmetros que afetam o processo são o conteúdo energético da matéria-prima, o teor de umidade, o tamanho das partículas e a temperatura do reator (Okuga, 2007). O tipo de agente gaseificante e a temperatura da reação influenciam na qualidade do gás de síntese obtido, sendo necessário que estes parâmetros serem acompanhados com cuidado pelo projetista (Basu, 2010, 2013; Puig-Arnavat et al., 2010).

Ao passo que a biomassa é queimada, propicia energia térmica limpa, podendo ser utilizados de forma direta em secadores, com eficiência energética semelhante à da combustão direta. A gaseificação auxiliará no uso de energia renováveis, em substituição ao petróleo e na geração de eletricidade. Pode ser utilizado diretamente em processos industriais através de tratamentos térmicos, cerâmicos, secadores e fornos de fundição metálicos, queimado em sistemas de turbinas a vapor e diretamente em turbinas a gás, além do processo oferece uma alternativa tecnológica a utilização de gás natural ou GLP (Yassin et al., 2009). Para o processo de gaseificação o ideal é que o teor de umidade seja de 10%, porém pode-se operar com combustíveis com teor de até 50% em gaseificadores *updraft* (Okuga, 2007).

Ar e/ou vapor, além do oxigênio podem ser usados como agente oxidante (Basu, 2006; Belgiorno et al., 2003; Gouveia De Souza et al., 2004; Higman & Van der Burgt, 2003). Na gaseificação com ar, o gás tem poder calorífico de 4 a 7 MJ/Nm<sup>3</sup> enquanto que com oxigênio e vapor pode chegar até 18 MJ/Nm<sup>3</sup> (Ardila, 2015). Quando o hidrogênio é utilizado o poder calorífico pode chegar a cima do 40 MJ/Nm<sup>3</sup> (Belgiorno et al., 2003). O agente de gaseificação afeta diretamente na composição do gás, assim como a execução do processo em si e a composição da biomassa (Balat et al., 2009). O fator econômico é algo indispensável na seleção do agente gaseificante. O ar geralmente é utilizado para processos de até 50 MW uma vez que o oxigênio torna o processo bastante caro. Aliado a isso o elevado teor de N<sub>2</sub> duplica o volume do gás produto e eleva a dimensão dos equipamentos de limpeza (Geraldo, 2013). A gaseificação consegue converter de 60 a 90% da energia da biomassa em energia interna do gás (Golden et al., 1988).

A composição está intimamente ligada às condições em que o processo é executado. A mistura de gases gerada no final do processo diversifica consideravelmente em função de parâmetros como: temperatura utilizada, pressão, tempo de residência, concentração de oxigênio no sistema reacional e propriedades da biomassa (Faaj et al., 2005). Os principais compostos originados nesse processo são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), com traços de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>.

A aplicação da biomassa pode variar de acordo com seu poder calorífico. Os gases de baixo poder calorífico são usados basicamente para queima direta, como combustível de motores com ignição por centelhamento ou utilizados em um

ciclo termodinâmico mais elaborado. Entretanto os gases de médio e alto poder calorífico podem ser empregados como matéria-prima para a produção de combustíveis líquidos ou em conversão em químicos como por exemplo álcoois, aldeídos, gasolina, parafina H<sub>2</sub> puro para célula combustível (McKendry, 2002; Virmond, 2007).

O procedimento de gaseificação da biomassa advém de equipamentos designados gaseificadores, no qual o gás passa por quatro zonas no interior do reator: secagem da biomassa, pirólise, combustão e redução. A umidade admitida da biomassa para o processo de gaseificação é de 5 a 25% que é removida à temperatura de 100°C na zona de secagem. A pirólise é uma zona do reator onde há a degradação térmica da biomassa na ausência de oxigênio. Esta é convertida em alcatrão, voláteis e sólidos (carvão). Num gaseificador de leito fluidizado não é possível definir estas zonas (Lora et al., 2009).

#### 4. Materiais e Métodos

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco (UPE). O material foi coletado em cidade (Bom Jardim) cerca de 200 km do Recife, no Agreste Pernambucano. A espiga foi separada do restante. Foram divididos em colmo, palha e folha. Foram retiradas as impurezas, areia, visíveis a olho nu, e posteriormente, as amostras foram inseridas num moinho de facas afim de ter uma granulometria menor. As biomassas ficaram em estoque por três anos em temperatura ambiente, separadas em um recipiente plástico fechado.

Foi realizado o ensaio do poder calorífico da biomassa *in natura* para análise do *syngas*. A norma que norteou o experimento foi a ABNT NBR 8.633/1984: Carvão vegetal – Determinação do poder Calorífico – método de ensaio pela bomba calorimétrica, sendo utilizado um Calorímetro Digital Automático IKA- WERKE, modelo C2000, que basicamente trata-se de uma bomba adiabática de oxigênio, um vaso de decomposição e uma unidade de armazenamento de água destilada.

Para efetivação dos ensaios de gaseificação, fez-se uso de um minigaseificador laboratorial, desenvolvido pelo POLICOM, para determinar o comportamento das diversas matérias-primas disponíveis, nas suas diversas formas. O equipamento viabiliza a modificação de variáveis do processo: temperatura de operação, tempo de residência, quantidade e granulometria da matéria-prima gaseificada. Acarreta rápida gaseificação das amostras, permitindo a coleta de gases combustíveis gerados e dos resíduos produzidos de forma eficiente, além de permitir o cálculo do volume gerado de modo simplificado.

O minigaseificador laboratorial é um reator de aquecimento elétrico indireto que atua em regime de batelada, uma vez que é mais adequado para ensaios laboratoriais, controlando assim as variáveis do processo. O procedimento é mais apropriado para operação em pequena escala.

O equipamento é composto por uma tubulação principal. São três ramificações presentes, tendo um termopar do tipo k, conectado. A amostra é inserida através de um recipiente de aço inoxidável AISI 304, para que a biomassa permaneça no local mais quente do gaseificador. A matéria-prima entra a partir da válvula esférica, feita de aço inoxidável AISI 304. Após a válvula há um sistema de haletas, usado na dissipação de calor, assim também como a manta isolante é utilizada pelo mesmo objetivo, além de prevenir descargas elétricas. No final do eixo, com uma conexão com um sifão de latão, há um manômetro analógico. Para aquecimento dimensionou-se uma resistência, feita a partir de fio e coberta por missangas para que não entre em curto ao entrar em contato com o reator. Com a finalidade do gás ficar enclausurado, há uma válvula de agulha, para que o gás seja recolhido. O gás passa por um filtro até ser recolhido pelas *sample bags*.

O experimento de gaseificação, realizado após três anos em estoque, foi realizado para o colmo, as folhas e palha. As amostras foram preparadas e suas respectivas massas foram registradas. O tempo de residência que será utilizado para cada experimento foi de três, quatro e cinco minutos e a temperatura do reator adotada para operar em 700°C, 800°C e 900°C. O

*syngas* produzido é expandido para a temperatura ambiente em sample bags para posterior análise cromatográfica. O procedimento foi baseado em Peres (1997), Lacerda (2015), Peres et al (2020), França (2021).

O volume do *syngas* gerado pode ser calculado com o desenvolvimento a seguir a partir da Equação de Estado dos Gases. Vale ressaltar que no momento de injeção da amostra a pressão é atmosférica, uma vez que a válvula está aberta. No momento que a válvula é fechada a pressão é elevada. Sabe-se a pressão interna do gaseificador devido ao manômetro. Admite-se que o ar e o gás, momentos antes e depois da gaseificação, respectivamente, são gases ideais.

$$PV = nRT$$

P: pressão do gás;

V: volume do gás;

n: número de mols do gás gerado;

R: constante universal dos gases ideais;

Esta equação pode ser utilizada para identificação do estado dentro do gaseificador e para as condições ambiente, uma vez que a válvula de coleta do gás é aberta. Sendo assim tem-se:

$$P_1V_1 = nRT_1 \text{ (estado inicial ou dentro do gaseificador)}$$

$$P_2V_2 = nRT_2 \text{ (estado final ou fora do gaseificador)}$$

Uma vez que n é constante, a quantidade de gás é a mesma tanto internamente quanto externamente ao gaseificador, e R também permanece o mesmo, por conseguinte, forma-se a seguinte equação:

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

Logo, pode-se concluir que o volume de gás gerado pode ser calculado pela equação abaixo:

$$V_2 = P_1V_1T_2(T_1P_2)^{-1}$$

Assim a capacidade de geração do gás por quilograma de biomassa é:

$$G = \frac{V_2[Nm^3]}{m_2[kg]}$$

G: capacidade de geração do gás;

V<sub>2</sub>: volume do gás gerado;

m<sub>2</sub>: massa da amostra utilizada para produzir o volume gás 2.

Os gases resultantes da gaseificação são coletados em *sample bags* e logo após direcionados ao cromatógrafo. Os cromatógrafos utilizados foram o Thermo Scientific, e SRI Instruments, modelo 8610C. A norma que norteia o procedimento é a ABNT 14903.

Devidos aos dados fornecidos pelo cromatógrafo, pode-se calcular o poder calorífico inferior e superior dos gases gerados, no qual multiplica-se as porcentagens dos gases presentes pelos seus respectivos poderes caloríficos.

Sabendo o PCI dos gases, pode-se analisar a energia total disponível da biomassa:

$$E[MJ] = PCI_{gás}[MJ.Nm^{-3}]m_{biomassa}[kg]G[Nm^3kg^{-1}]$$

E: Energia Total

PCI<sub>gás</sub>: poder calorífico inferior do gás;

m<sub>biomassa</sub>: massa da biomassa;

G: Capacidade de geração do gás.

Para determinação das melhores condições de gaseificação da biomassa, por conseguinte, da melhor utilização, é necessária a análise do rendimento térmico. Com os resultados do poder calorífico inferior da biomassa e do gás pode-se calcular o rendimento da biomassa gaseificada.

$$\eta = \frac{PCI_{gás}[MJ.Nm^{-3}]G[Nm^3kg]}{PCI_{biomassa\ in\ natura}[MJ.kg^{-1}]}$$

## 5. Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresentam o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI) das biomassas.

**Tabela 1:** Poder Calorífico Superior e Inferior das biomassa.

Amostra	PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	PCI (MJ.kg <sup>-1</sup> )
Colmo	16,57	16,39
Folha	16,26	16,01
Palha	16,43	16,40

Fonte: Autores.

O PCS (poder calorífico superior) é a quantidade de energia liberada a transferência de calor, ou seja, quanto mais energia liberada, maior será o PCS, sendo melhor a eficiência do processo. Os resultados da calimetria explanam que para o colmo, folha e palha o poder calorífico superior variou muito pouco, assim como o poder calorífico inferior. Tais valores são bem próximo ao utilizado em processo de gaseificação por outras biomassas. Verifica-se que o PCS de tais biomassa são superiores ao PCS da casca de arroz 13,15 MJ/kg, muito utilizada no Rio Grande do Sul como fonte de energia, e similar ao bagaço da cana-de-açúcar de 17,33 MJ/kg (CENBIO, 2002; Nhuchhen & Abdul Salam, 2012).

O Quadro 1 apresentam os gases resultantes da gaseificação do colmo, palha e folha nas temperaturas de 700, 800 e 900 °C com tempo de residência de 3, 4 e 5 minutos, expondo, portanto, os teores de hidrogênio, metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono.

O ensaio que teve maior produção para hidrogênio foi do colmo com 900°C e com tempo de residência de cinco minutos enquanto que a biomassa com menor produção é a folha com os parâmetros mínimos, sendo estes 700 °C e 3 minutos.

O tempo de residência, para o experimento, também não tem um papel fundamental, uma vez que são encontrados valores de hidrogênio semelhantes mesmo para tempos diferentes entre 3 e 5 minutos.

Percebe-se que a concentração de metano reduz ao longo do tempo no colmo, enquanto a palha varia pouco, com pouca dependência da temperatura ou tempo de residência. A folha teve a maior média de concentração a 800 °C. O colmo a 700 °C e 5 minutos teve o menor teor de metano (2,59% v/v).

O melhor resultado se deu no colmo, tendo como parâmetros 800°C de temperatura e 5 minutos de tempo de residência. O pior ocorreu na folha a 700 °C e 3 minutos. A palha a partir dos três minutos na temperatura de 900 °C não produz mais CO, ocorrendo situação semelhante ao colmo a partir de 4 minutos a 800 °C, tendo acontecido também a 5 min em 900 °C na folha.

**Quadro 1:** Componentes do *syngas* do colmo, folha e palha.

$\Theta$ (°C)	T (min)	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO
Colmo					
700	3	20,72	7,42	20,30	1,10
	4	20,06	5,54	18,54	0,95
	5	21,25	2,59	12,09	0,34
800	3	18,40	3,21	11,55	0,44
	4	19,64	2,99	10,08	-
	5	20,43	2,82	10,02	-
900	3	19,59	6,07	13,53	1,17
	4	22,67	7,63	12,39	-
	5	23,56	6,23	11,63	-
Folha					
700	3	14,44	4,40	11,60	1,03
	4	19,46	6,48	17,80	0,95
	5	20,03	9,64	20,56	0,89
800	3	14,45	11,52	27,99	1,04
	4	19,32	9,95	26,01	0,93
	5	20,09	10,21	23,62	0,57
900	3	16,89	10,66	20,92	0,91
	4	22,20	9,09	18,50	0,66
	5	21,61	7,17	16,28	-
Palha					
700	3	20,00	6,78	16,73	0,72
	4	20,66	6,53	15,33	1,03
	5	22,28	5,82	15,62	0,72
800	3	19,91	6,07	20,63	0,92
	4	18,68	6,48	18,59	0,98
	5	20,43	6,95	24,73	1,41
900	3	19,59	6,07	13,53	1,17
	4	22,67	7,63	12,39	-
	5	23,56	6,23	11,633	-

Fonte: Autores.

Em relação ao poder calorífico inferior, observado na Tabela 2, a folha com 800 °C e 3 minutos apresentou o maior pico entre todas as biomassas, além de ter a maior média (5,09 MJ.Nm<sup>-3</sup>). A palha sofre pouca variação, independente da variação de temperatura e tempo de residência, tendo uma média de 4,50 MJ.Nm<sup>-3</sup>. No colmo houve um pouco mais de variação.

**Tabela 2:** Poder Calorífico Inferior médios e máximos.

Biomassa	PCI médio (MJ.Nm <sup>-3</sup> )	PCI máximo (MJ.Nm <sup>-3</sup> )
Colmo	3,76	4,99
Folha	5,09	6,62
Palha	4,50	4,97

Fonte: Autores.

Sobre o volume de gás produzido, visto na Tabela 3, tanto para o colmo quanto para a folha e palha, a maior capacidade de produção de volume foi encontrada justamente fazendo-se uso dos parâmetros máximos (900 °C e cinco minutos). O maior volume é resultante da folha com 0,44 Nm<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>, enquanto o menor se deu na folha com 0,27 Nm<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.

**Tabela 3:** Capacidade de produzir volume e rendimentos médios e máximos.

Biomassa	Volume médio (Nm <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )	Volume máximo (Nm <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )	Rendimento médio (%)	Rendimento máximo (%)
Colmo	0,30	0,44	7,03	10,92
Folha	0,27	0,34	8,69	11,21
Palha	0,32	0,34	8,79	9,85

Fonte: Autores.

Em relação ao rendimento de conversão médio, no colmo o valor médio foi de 7,03 %. O valor médio da folha e da palha são 8,69 e 8,79% respectivamente, ambas tendo o pico máximo em 800°C, com diferentes tempos de residência (três minutos para folha e cinco para palha).

## 6. Considerações Finais

Foram realizados ensaios de gaseificação, ensaios esses que tiveram como tempo de residência três, quatro e cinco minutos, além das temperaturas de 700°C, 800°C e 900°C. O gás gerado de maior PCI foi a folha, que teve como resultado 6,65 MJ.Nm<sup>-3</sup>, seguido pelo colmo (4,99 MJ.Nm<sup>-3</sup>) e a palha (4,97 MJ.Nm<sup>-3</sup>).

Pode-se a partir cada resíduo de milho no Brasil encontrar o potencial energético do país a partir do gás de síntese. Os maiores valores de energia cálculos os maiores rendimentos de conversão de cada resíduo, são para o colmo 10,92%, folha 11,21%, palha 9,85% e do sabugo 14,33%.

Os resultados da pesquisa levam chegar a conclusão de que os resíduos advindos do cultivo de milho tem um bom potencial como combustível, principalmente levando em conta a enorme quantidade de resíduos produzidos no cultivo de milho. Este gás gerado pode ser utilizado como queima direta para geração de calor, ou aplicado em motores de combustão interna acoplados a um grupo gerador.

O aproveitamento dos resíduos, no panorama que em o planeta se encontra, é imprescindível. Realizar estudos de diversas alternativas é extremamente necessário, como a pirólise e biodigestão de resíduos de milho.

## Referências

ABIMILHO. (2018a). *O cereal que enriquece a alimentação humana*.

ABIMILHO. (2018b). *O cereal que enriquece a alimentação humana*. <http://www.abimilho.com.br/estatisticas>.

Ardila, Y. C. (2015). Gaseificação da Biomassa para a Produção de Gás de Síntese e Posterior Fermentação para Bioetanol: Modelagem e Simulação do Processo. In *Faculdade de Engenharia Química*. Unicamp.

Asadi, N., Karimi Alavijeh, M., & Zilouei, H. (2017). Development of a mathematical methodology to investigate biohydrogen production from regional and national agricultural crop residues: A case study of Iran. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 1989–2007.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.021>.

Asimakopoulos, K., Gavala, H. N., & Skiadas, I. V. (2018). Reactor systems for syngas fermentation processes: A review. *Chemical Engineering Journal*, 348(May), 732–744. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.003>.

Balat, M., Balat, M., Kirtay, E., & Balat, H. (2009). Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 2: Gasification systems. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 3158–3168. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.08.013>.

Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds* (CRC Press (ed.); 1st Editio). <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781420005158>.

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory* (U. K. Elsevier (ed.)).

Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* (A. Press (ed.); Third Edit).

Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., & Napoli, R. M. A. (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, 23(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00149-6](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00149-6).

Campoy, M., Gómez-Barea, A., Vidal, F. B., & Ollero, P. (2009). Air-steam gasification of biomass in a fluidised bed: Process optimisation by enriched air. *Fuel Processing Technology*, 90(5), 677–685. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.12.007>

CENBIO. (2002). *Estado da arte da gaseificação*.

Cruz, J. C., Filho, I. A. P., Alvarenga, R. C., Neto, M. M. G., Viana, J. H. M., Oliveira, M. F. de, Matrangolo, W. J. R., & Filho, M. R. de A. (2010). Cultivo do Milho. *Embrapa*, 6<sup>a</sup> edição.

Daioğlu, V., Stehfest, E., Wicke, B., Faaij, A., & van Vuuren, D. P. (2016). Projections of the availability and cost of residues from agriculture and forestry. *GCB Bioenergy*, 8(2), 456–470. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12285>.

Faaj, A., Walter, A., BAUEN, A., Bezzon, G., Rocha, J. D., Moreira, J. R., Craig, K. R., Overend, R. P., & Bain, R. L. (2005). Novas Tecnologias para os vetores Modernos de energia de Biomassa. In Unicamp (Ed.), *Uso da Biomassa para produção de energia na indústria Brasileira*.

FIESP. (2021). *Safra Mundial de Milho 2021/22 - 1º Levantamento do USDA Informativo*.

Food and Agricultural Organization. (2018). *FAOSTAT, FAO Statistical Databases*.

García-Lara, S., & Serna-Saldivar, S. O. (2019). Corn History and Culture. *Corn*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2>.

Geraldo, B. C. de A. (2013). *Gaseificação da Casca e da Torta da Mamona para Produção de Gás Combustível*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

Golden, T., Reed, B., & Das, A. (1988). Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. *SERI . U.S. Department of Energy, March*, 148.

Gouveia De Souza, A., Oliveira Santos, J. C., Conceição, M. M., Dantas Silva, M. C., & Prasad, S. (2004). A thermoanalytic and kinetic study of sunflower oil. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21(2), 265–273. <https://doi.org/10.1590/s0104-66322004000200017>.

Higman, C., & Van der Burgt, M. (2003). No Title. In E. Gulf Professional Publishing (Ed.), *Gasification*.

Jackson Dantas Coelho. (2018). *Produção de grãos: feijão, milho e soja*. 1–13.

Kadam, K. L., & McMillan, J. D. (2003). Availability of corn stover as a sustainable feedstock for bioethanol production. *Bioresource Technology*, 88(1), 17–25. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00269-9).

Karimi Alavijeh, M., & Karimi, K. (2019). Biobutanol production from corn stover in the US. *Industrial Crops and Products*, 129(June 2018), 641–653. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.054>.

Karimi Alavijeh, M., & Yaghmaei, S. (2016). Biochemical production of bioenergy from agricultural crops and residue in Iran. *Waste Management*, 52, 375–394. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.025>.

Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001>.

Koopmans, A., & Koppejan, J. (1997). Agricutal and forest residue - generation utilization and availability. In *Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy* (pp. 1–23). <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226023328.003.0003>.

Lacerda C. G. (2015). *Produção de gases combustíveis utilizando o bambu em processo de gaseificação*. Dissertação de mestrado. Universidade de Pernambuco.

Lora, E. E. ., Gómez, E. O., & Cortez, L. A. (2009). *Biomassa para energia* (Unicamp (ed.); 1st ed.).

McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 55–63. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00120-1).

Nhuchhen, D. R., & Abdul Salam, P. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*, 99, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>.

Okuga, A. (2007). *Analysis and operability optimization of an updraft gasifier unit*. Eindhoven University Of Technology.

- Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruz, D., Varum, H., & Pinto, J. (2012). A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*, 45, 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>.
- Peres, S. (1997). *Catalytic Indirectly Head Gasification of Bagasse*. Tese de Doudorato, University of Florida.
- Peres, S., Loureiro, E., Santos, H., Vanderley e Silva, F., & Gusmao, A. (2020). The Production of Gaseous Biofuels Using Biomass Waste from Construction Sites in Recife, Brazil. *Processes*, 8(4), 457. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/pr8040457>.
- Pierr, L. (2014). *Energia da Biomassa Residual de Aveia Branca e Soja em Resposta ao Sistema de Preparo do Solo e Níveis de Adubação*. Universidade Federal do Paraná.
- Puig-Arnavat, M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2841–2851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.030>.
- Qin, L., Li, X., Zhu, J. Q., Li, W. C., Xu, H., Guan, Q. M., Zhang, M. T., Li, B. Z., & Yuan, Y. J. (2017). Optimization of ethylenediamine pretreatment and enzymatic hydrolysis to produce fermentable sugars from corn stover. *Industrial Crops and Products*, 102, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.026>.
- Santos, P. de F., Góis, T. A., & Silva, S. P. R. da. (2021). Caracterização e geração de combustíveis gasosos utilizando folha de coqueiro da produção do coco (Cocos nucifera). *Research, Society and Development*, 10(7), e34610716783. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16783>.
- Sempruch, C., Leszczyński, B., Wilczewska, M., Chrzanowski, G., Sytykiewicz, H., Goławska, S., Kozak, A., Chwedczuk, M., & Klewek, A. (2015). Changes in amino acid decarboxylation in maize (*Zea mays*; Poaceae) tissues in response to bird cherry-oat aphid (*Rhopalosiphum padi*; Aphididae) infestation. *Biochemical Systematics and Ecology*, 60, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.04.017>.
- Virmond, E. (2007). *Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia*. Dissertação de mestrado, Universidade de Santa Catarina - UFSC.
- Yassin, L., Lettieri, P., Simons, S. J. R., & Germanà, A. (2009). Techno-economic performance of energy-from-waste fluidized bed combustion and gasification processes in the UK context. *Chemical Engineering Journal*, 146(3), 315–327. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.06.014>.