

# Caracterização Energética dos Resíduos da Agroindústria do Milho em um Protótipo de Gaseificação Multizona

## Energy Characterization of Corn Agroindustry Waste in a Multi-Zone Gasification Prototype

Jorge Mario Mendoza Fandiño,<sup>a,\*</sup> Stiven Javier Sofán German,<sup>a</sup> Daniel Esteban López García,<sup>a</sup> Arnold Martínez Guarín,<sup>a</sup> Jesus David Rhenals Julio<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidade de Córdoba, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Montería, CP 230002, Montería, Córdoba, Colômbia.

**\*E-mail:**

[jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co](mailto:jorge.mendoza@correo.unicordoba.edu.co)

**Recebido em:** 2 de Abril de 2021

**Aceito em:** 7 de Maio de 2021

**Publicado online:** 13 de Agosto de 2021

This research is framed in the areas of alternative energy, thermodynamics and heat transfer. The aim was to develop a multizone gasifier and characterize the synthesis gas produced by it, using waste from the corn agroindustry as feed biomass, separating the combustion and gasification zones, with a view to coupling it to a dual biofuel-solar cooling system for the conservation of agro-industrial products in non-interconnected areas. It's divided into five parts; the first part consists in the determination of thermo-physical properties of the corn cob. In the second part, the preliminary design of the multi-zone gasifier was developed. The third part consisted of performing five simulations in the Fluent software, to evaluate the temperature profiles. The fourth part was the multi-zone gasifier construction process. Finally, the fifth part used four tests obtained from the variation in the amount of mass present in the gasification zone, which are carried out to evaluate the thermal-energy properties of the synthesis gas that occurs in each test. The Lower Heating Values (LHV) obtained for each test were 1,981; 5,184; 4,214 and 2,026 MJ / kg respectively. The result obtained in test # 2 stands out, which compared to a gas obtained in a Downdraft gasifier for the same biomass, has an increase of 69,17%. Likewise, a higher mole fraction of methane in the synthesis gas stands out compared to that produced by other gasifiers.

**Keywords:** Alternative energies; corncobs; multi-zone gasifier; temperature profile; synthesis gas.

## 1. Introdução

O desenvolvimento de projetos de geração de energia a partir de biomassa tem assumido grande importância em todo o mundo, visto que esta é uma das soluções alternativas para os atuais problemas de poluição que têm levado ao uso de combustíveis fósseis. Na Colômbia, foram gerados aproximadamente 65.935 GWh de eletricidade em 2016, dos quais 3,2 GWh correspondem ao uso de biomassa.<sup>1</sup> A região de Córdoba se caracteriza por ser altamente produtiva na agricultura e pecuária, o que oferece a oportunidade de aproveitar os resíduos resultantes dessas atividades para a geração de energia. Segundo dados da Rede de Informação e Comunicação do Setor Agropecuário da Colômbia,<sup>2</sup> em 2016 foram produzidas no departamento de Córdoba 222 mil toneladas de milho.

Biomassa é a energia química armazenada nos corpos, a partir da captação fotônica da energia solar realizada diretamente por organismos autotróficos, transformada pelo processo fotoquímico da fotossíntese em matéria orgânica que constitui principalmente as plantas.<sup>3</sup> A gaseificação da biomassa é um processo termoquímico de conversão da matéria-prima numa mistura de gás combustível e não combustível em um gaseificador.<sup>4</sup> Este processo é caracterizado por ser de baixo valor calorífico. Existem vários tipos de gaseificadores, geralmente classificados do leito fixo, que se subdividem em fluxo ascendente e descendente de gases e leito fluidizado.<sup>5</sup> As reações que ocorrem durante o processo de gaseificação são secagem, pirólise, oxidação e redução. A Tabela 1 mostra as reações que ocorrem durante o processo de gaseificação, levando em consideração a temperatura na qual as diferentes zonas do gaseificador se encontram.

Devido ao projeto e à estrutura de um reator de gaseificação convencional, seja um fluxo ascendente, descendente ou leito fluidizado, o gás de síntese, produto da pirólise da biomassa, é forçado a passar por uma zona de combustão completa no reator, o que faz com que o gás se degrade e perda potencial calorífico.<sup>6</sup> Como alternativa de solução para este problema, pode-se projetar um novo modelo de reator multi zonas de combustão e pirólise, que evite o contato do gás de síntese com a zona de combustão, o que permitirá avaliar a eficiência do novo processo,

**Tabela 1.** Reações de fase gasosa

| N  | Processo                       | Reação   |
|----|--------------------------------|--|
| R1 | Pirólise                       | Vol → CO + CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub> + Tar |
| R2 | Oxidação de CO                 | CO + 0.5 O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub>  |
| R3 | WGS                            | CO + H <sub>2</sub> O → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>   |
| R4 | RWGS                           | CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> → CO + H <sub>2</sub> O   |
| R5 | Oxidação de H <sub>2</sub>     | H <sub>2</sub> + 0.5 O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O   |
| R6 | Oxidação de H <sub>2</sub> rev | H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> + 0.5 O <sub>2</sub>   |
| R7 | Oxidação de CH <sub>4</sub>    | CH <sub>4</sub> + 1.5 O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O                              |
| R8 | Remodelado de CH <sub>4</sub>  | CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O → CO + 3H <sub>2</sub>  |
| R9 | Oxidação do alcatrão           | Tar + O <sub>2</sub> → CO  |

Fonte: Adaptado de Babicki *et al.*<sup>8</sup>

caracterizando os componentes do o gás obtido. A Tabela 2 mostra as reações que ocorrem no carvão.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Coleta de biomassa e análise termoquímica

A biomassa foi obtida de pequenos agricultores da zona rural da Montería, Córdoba. Foi realizada uma análise termoquímica para determinar as suas propriedades. A determinação da composição da biomassa foi realizada por meio das análises imediata e elementar, onde foram identificadas as proporções dos elementos e os materiais voláteis que a compõem, umidade, carbono fixo e cinzas; tudo isso para estabelecer as reações desenvolvidas no processo de gaseificação. As análises foram realizadas no Laboratório de Carbono da Universidade Nacional da Colômbia. O cálculo da densidade aparente foi determinado experimentalmente, tomando-se um recipiente de massa e volume conhecidos, este foi preenchido com sabugo de milho e colocado em uma escala, no valor de massa por ela lançado, a massa do recipiente foi subtraída, e o resultado foi dividido pelo volume deste.

### 2.2. Validação do gaseificador de zonas múltiplas

A fim de obter zonas separadas de combustão e pirólise dentro do gaseificador, foi proposto implementar dois tubos concêntricos de diâmetros diferentes. No tubo interno ocorrerá a combustão da biomassa, que irá transferir o calor radialmente para a biomassa presente no tubo

externo, sem entrar em contato com ela. Para a execução do projeto preliminar foram consideradas variáveis como transporte, facilidade de limpeza, montagem, desmontagem e operacionalidade. A doação de dois tubos recicláveis ID 40 de 4 e 8 polegadas, com 2 m de comprimento, foi administrada por uma empresa da região.

Para demonstrar que o projeto preliminar fornece as temperaturas adequadas para os processos de pirólise e gaseificação da biomassa, foi realizada uma simulação de CFD (Computational Fluid Dynamics), que é uma ferramenta amplamente utilizada para validar numericamente modelos a um baixo custo, em comparação com aquele de uma validação experimental.

Para simplificar o modelo e obter um resultado adequado, evitando problemas de interferência entre domínios e sem sacrificar um alto custo computacional, foram feitas as seguintes suposições:

- O comprimento dos dois tubos foi o mesmo (1,2 m).
- Os tubos de entrada e saída de ar e gás de síntese foram omitidos, assumindo que eles entram e saem pelas áreas inferior e superior do domínio.
- As tampas de aço superior e inferior foram omitidas.
- O suporte que mantém o gaseificador vertical foi omitido.
- Camadas de ar ambiente acima e abaixo do gaseificador foram omitidas.
- Foi assumida uma camada de ar ambiente ao redor do tubo externo, com espessura de 0,5 m.
- Os dois tubos são totalmente preenchidos com biomassa.
- A transferência de calor ocorre de forma estacionária.

Foram realizadas 5 simulações, variando o fluxo de massa de ar na zona de gaseificação (30%, 20%,

**Tabela 2.** Conjunto de reações de char

| N   | Processo                      | Reação  |
|-----|-------------------------------|---|
| R10 | Combustão de Char             | C(s) + O <sub>2</sub> → O <sub>2</sub>        |
| R11 | Gaseificação CO               | C(s) + CO <sub>2</sub> → CO                   |
| R12 | Gaseificação H <sub>2</sub> O | C(S) + H <sub>2</sub> O → CO + H <sub>2</sub> |
| R13 | Gaseificação H                | C(s) + 2H <sub>2</sub> → CO + H <sub>2</sub>  |

Fonte: Adaptado de Babicki *et al.*<sup>8</sup>

10%, 6,67% e 5% do ar de combustão teórico), a fim de estabelecer a configuração que fornece as temperaturas adequadas para pirólise. Uma vez que os perfis de temperatura foram estabelecidos e a viabilidade do projeto preliminar determinada, os processos de fabricação apropriados foram realizados para construir o gaseificador de zonas múltiplas.

Para avaliar a produção do gás de síntese e determinar as condições ótimas de operação, foram realizados quatro ensaios experimentais, variando a quantidade de biomassa presente nas zonas de combustão e gaseificação, conforme Tabela 3.

Finalmente, a composição do gás obtido em cada ensaio foi avaliada no cromatógrafo, e com esta composição foram realizados cálculos para determinar o valor calorífico de cada um, levando em consideração o peso molecular de cada componente, e seu respectivo LHV individual.

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1. Análise termoquímica de biomassa

Os resultados das análises proximal e elementar são mostrados na tabela 4, onde HR é o teor de umidade, CF é carbono fixo, MV é material volátil e C é cinza na análise proximal; na análise elementar, C é carbono, H é hidrogênio, O é oxigênio e N é nitrogênio. Esses resultados foram usados para configurar domínios em simulações. Agora, de acordo com pesquisas anteriores, o menor poder calorífico (LHV) do sabugo de milho foi estabelecido em 14,7 MJ / kg.<sup>7</sup> A densidade aparente calculada é de 152 kg / m<sup>3</sup>, conforme Tabela 4.

#### 3.2. Projeto e construção do gaseificador de zonas múltiplas

O objetivo de realizar as cinco simulações foi obter um perfil de temperatura para cada uma e a partir dos dados fornecidos por este perfil, traçar curvas de temperatura

versus altura em distâncias radiais específicas dentro do reator para então determinar os volumes reativos, que são aqueles volumes cujos a temperatura é superior a 800 ° C, ou seja, nas áreas onde ocorre a gaseificação. Para a taxa de fluxo de massa de ar na zona de gaseificação de 5% da teórica para combustão, o perfil é mostrado na Figura 1, e suas correspondentes curvas de temperatura.

O gráfico (Figura 1) permite estimar o volume reativo em 0,00526 m<sup>3</sup>, que corresponde a 20,33% da zona de gaseificação. A análise realizada em cada um dos gráficos obtidos nas simulações, permitiu a comparação entre o fluxo de massa de ar na zona de gaseificação e o percentual de volume reativo.

A curva apresentada na Figura 2 permite inferir que quanto maior o fluxo de ar, menor o percentual de volume reativo, o que implica em menor qualidade do gás de síntese obtido. Por outro lado, se o fluxo de ar for diminuído, a porcentagem do volume reativo aumenta, o que permite aumentar a qualidade do gás de síntese, ao custo de diminuir a quantidade dele obtida. Esses resultados permitiram demonstrar que o funcionamento do equipamento é viável, e que desenvolverá temperaturas adequadas para a produção do gás de síntese.

#### 3.3. Montagem final e validação experimental do gaseificador de zonas múltiplas

A Figura 3 mostra o projeto e a montagem final do gaseificador, juntamente com o equipamento de limpeza do gás de síntese.

Este equipamento tem capacidade máxima para processar 3,61 kg de sabugo de milho na zona de gaseificação e 1,57 kg na zona de combustão. Foi realizado um teste piloto por meio do qual foram determinados os parâmetros de funcionamento do equipamento, como o consumo de biomassa na zona de combustão para manter as temperaturas na faixa de 850 a 950 ° C. Após o enchimento inicial da zona de combustão, 0,7 kg de biomassa precisou ser adicionado em um tempo entre 6 e 8 minutos. Para o mesmo propósito, um fluxo de massa de ar de 0,0055 kg / s

**Tabela 3.** Testes experimentais

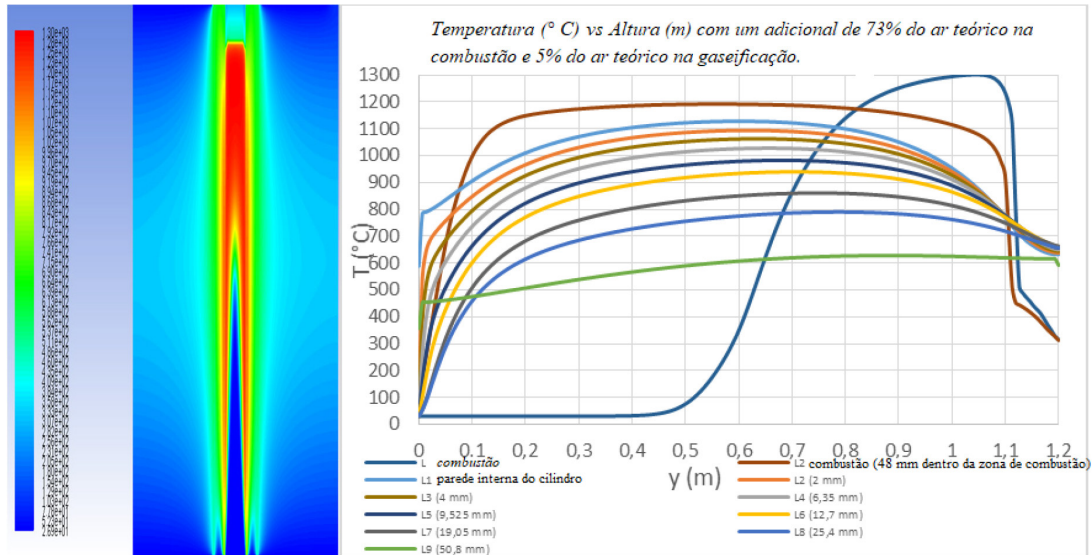
| Experimento | Biomassa de queima | Biomassa de gaseificação |
|-------------|--------------------|--------------------------|
| 1           | 0,75 kg            | 1,00 kg                  |
| 2           | 1,00 kg            | 2,00 kg                  |
| 3           | 1,25 kg            | 2,80 kg                  |
| 4           | 1,50 kg            | 3,50 kg                  |

Fonte: autor

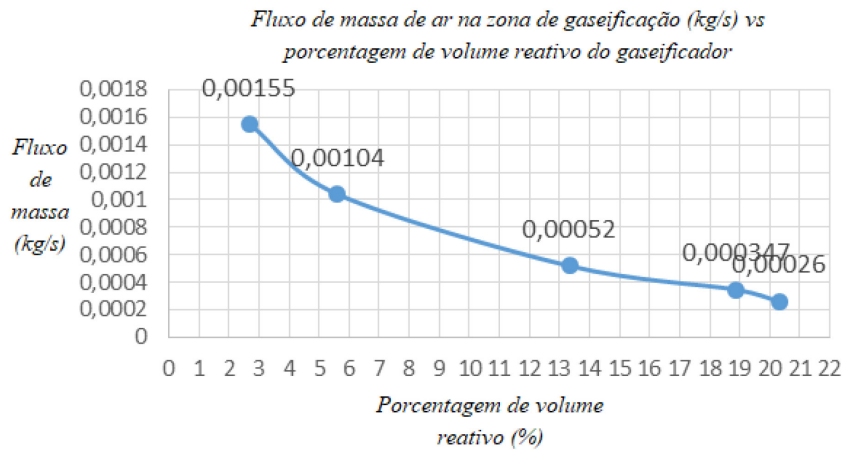
**Tabela 4.** Análise imediata e análise elementar

| Análise imediata (%) |       |       |      | Análise elementar (%) |      |       |      |
|----------------------|-------|-------|------|-----------------------|------|-------|------|
| HR                   | CF    | MV    | C    | C                     | H    | O     | N    |
| 10,52                | 16,54 | 65,23 | 7,71 | 39,95                 | 4,97 | 47,42 | 0,60 |

Composição: %m/m. Fonte: autor



**Figura 1.** Perfil de temperatura para 5% do fluxo de massa de ar teórico na zona de gaseificação e curvas de temperatura vs. altura em distâncias radiais específicas



**Figura 2.** Curva de fluxo de massa de ar na zona de gaseificação x porcentagem do volume reativo do gaseificador



**Figura 3.** Projeto final e montagem do gaseificador de zonas múltiplas

foi injetado na zona de combustão. Termopares tipo K e um registrador de dados Applent AT4208 foram usados para capturar dados de temperatura.

Os resultados da composição do gás, e menor poder calorífico, dados para cada teste realizado são mostrados na Tabela 5, onde  $T_g$  é a temperatura de gaseificação,  $T_c$

é a temperatura de combustão,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  e  $CO_2$  são frações molares.

Tomando em conta esses resultados, foi realizada uma média dos 3 cromatógrafos para cada um dos testes, apresentados na Tabela 6.

**Tabela 5.** Resultados dos testes experimentais

| Teste | Biomassa (Kg) | Tg (°C) | Tc (°C) | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO    | CO <sub>2</sub> | LHV (MJ/kg) |
|-------|---------------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-------|-----------------|-------------|
| 1     | 1             | 754,8   | 930,3   | 0,049          | 0,063          | 0,58           | 0,014           | 0,141 | 0,153           | 2,154       |
| 1     | 1             | 768,3   | 923,2   | 0,027          | 0,024          | 0,567          | 0,031           | 0,098 | 0,252           | 1,898       |
| 1     | 1             | 772,6   | 928,5   | 0,067          | 0,006          | 0,564          | 0,023           | 0,078 | 0,261           | 1,891       |
| 2     | 2             | 791,3   | 923,4   | 0,115          | 0,016          | 0,292          | 0,081           | 0,231 | 0,265           | 5,576       |
| 2     | 2             | 800,6   | 935,6   | 0,122          | 0,01           | 0,307          | 0,069           | 0,2   | 0,292           | 4,932       |
| 2     | 2             | 810,1   | 918,2   | 0,112          | 0,007          | 0,361          | 0,091           | 0,154 | 0,276           | 5,045       |
| 3     | 2,8           | 795,5   | 920,4   | 0,033          | 0,03           | 0,394          | 0,047           | 0,175 | 0,321           | 3,000       |
| 3     | 2,8           | 800,5   | 933,4   | 0,064          | 0,016          | 0,388          | 0,098           | 0,123 | 0,310           | 4,258       |
| 3     | 2,8           | 818,6   | 912,7   | 0,122          | 0,015          | 0,278          | 0,09            | 0,188 | 0,307           | 5,383       |
| 4     | 3,5           | 834,6   | 914,6   | 0,071          | 0,012          | 0,492          | 0,033           | 0,125 | 0,266           | 2,646       |
| 4     | 3,5           | 842,1   | 916,6   | 0,035          | 0,012          | 0,569          | 0,022           | 0,068 | 0,294           | 1,427       |
| 4     | 3,5           | 840,2   | 921,9   | 0,008          | 0,016          | 0,651          | 0,027           | 0,13  | 0,168           | 2,006       |

Fonte: autor

**Tabela 6.** Médias dos resultados obtidos para cada teste

| Teste | H <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | CO     | CO <sub>2</sub> | LHV (MJ/kg) |
|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------|-----------------|-------------|
| 1     | 0,0477         | 0,031          | 0,57           | 0,0227          | 0,1057 | 0,222           | 1,981       |
| 2     | 0,1163         | 0,011          | 0,32           | 0,0803          | 0,195  | 0,277           | 5,184       |
| 3     | 0,073          | 0,02           | 0,353          | 0,0783          | 0,162  | 0,313           | 4,214       |
| 4     | 0,038          | 0,013          | 0,571          | 0,0273          | 0,1077 | 0,2427          | 2,026       |

Fonte: autor

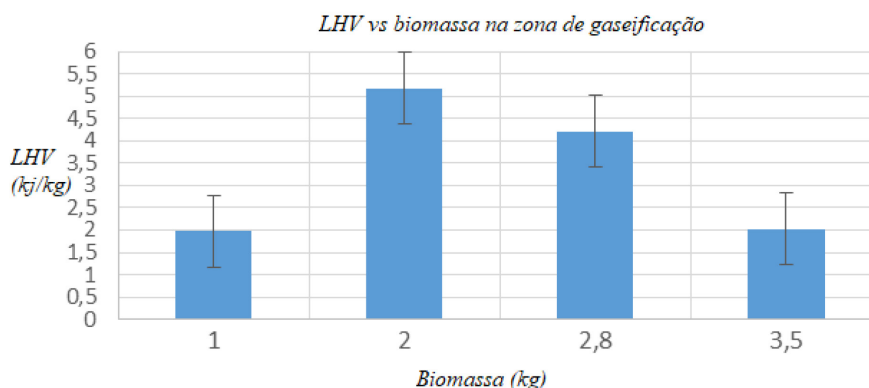
A Figura 4 mostra o comportamento do menor poder calorífico do gás obtido para cada teste em média.

A Figura 5 mostra em média o comportamento das frações molares em porcentagem de cada componente do gás produzido para cada um dos testes realizados.

A partir da figura 5 pode-se inferir que a maior produção de metano ocorreu com 2 kg de biomassa, enquanto a menor ocorreu com 1 kg. Este resultado é o mais notável, levando em consideração o trabalho realizado por (Arango & González, 2016), em um gaseificador do tipo Downdraft utilizando a mesma biomassa, eles obtiveram uma faixa de percentuais de metano de 0,8 - 2,18%, o que representa uma diferença óbvia em comparação com os dados da Figura 5. Conforme expresso por Sellars, os altos teores

de metano presentes no gás de síntese são devidos à reação de hidro gaseificação (R13 da Tabela 2), esta reação é favorecida na faixa de temperatura entre 500 e 650 ° C e uma atmosfera rica em hidrogênio, este último tem origem na formação do hidrogênio resultante do craqueamento do bioóleo a vapor, que, segundo Sellars, reage com o carbono presente para gerar metano, desde que a pressão seja menos de 10 atm, as temperaturas de gaseificação são próximas a 650 ° C e o tempo de residência do gás é inferior a 10 s,<sup>8</sup> condições que ocorrem no gaseificador de zonas múltiplas.

A partir da Figura 4 pode-se inferir que o maior valor calorífico ocorreu quando foram utilizados 2 kg de biomassa, enquanto o menor valor calorífico ocorreu

**Figura 4.** Comportamento do menor valor calorífico para cada teste

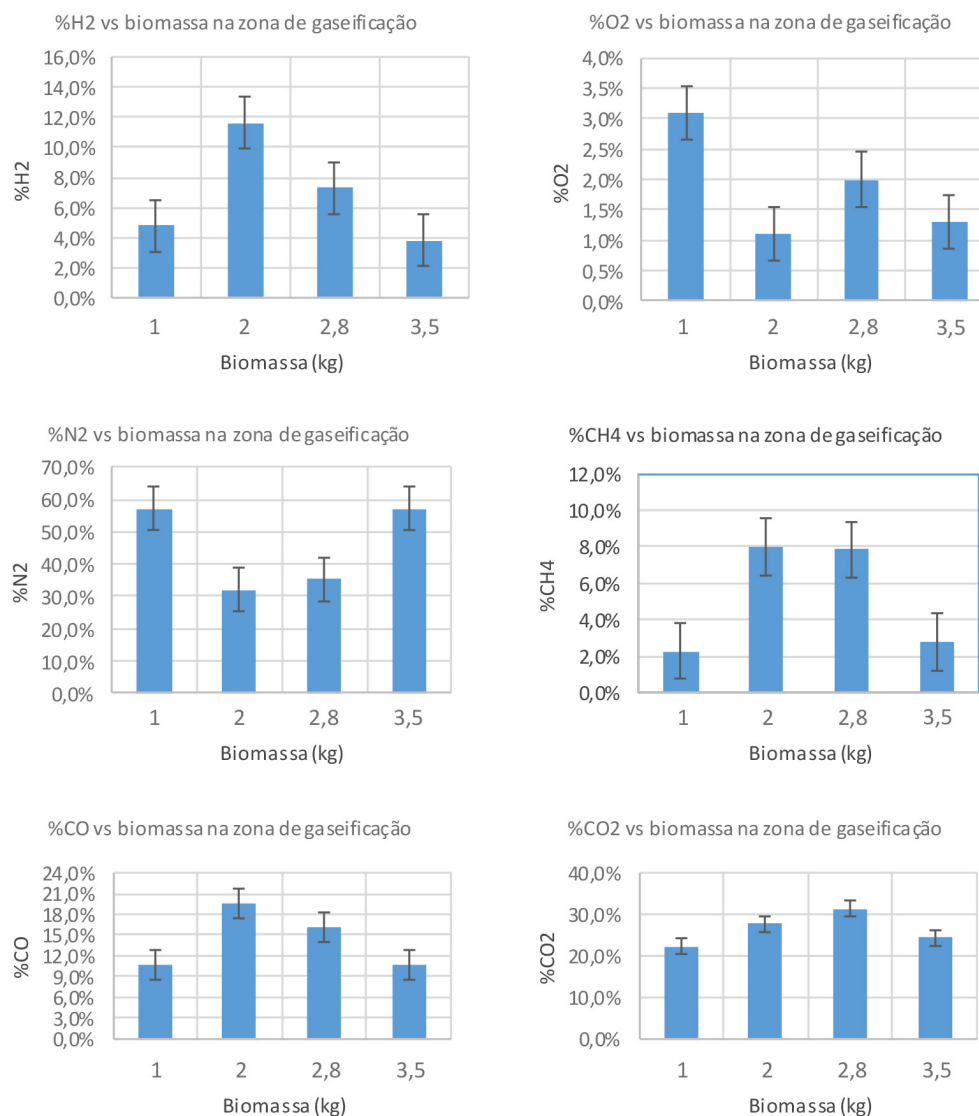


Figura 5. Comportamento da fração molar de cada componente para cada teste

Tabela 7. Tempos de produção de gás de síntese para cada teste

| Teste | Tempo (minutos) |
|-------|-----------------|
| 1     | 20              |
| 2     | 37              |
| 3     | 42              |
| 4     | 45              |

Fonte: autor

quando 1 e 3,5 kg foram utilizados. Estes valores foram tomados como referência para fazer uma comparação com o trabalho realizado por Arango & González, cujo resultados produziu um valor calorífico de 3.064,61 kJ / kg.8 Levando este resultado em consideração, o gás de síntese produzido pelo gaseificador de zonas múltiplas no teste # 2 mostra um aumento em seu valor calorífico de 69,17% sobre o gás produzido pelo gaseificador a jusante. A Tabela 7 mostra os tempos em que o gás de síntese foi produzido para cada teste.

## 4 Conclusões

Os resultados das simulações realizadas no software Fluent foram um fator chave para determinar a viabilidade do desenvolvimento deste projeto. Os perfis de temperatura produzidos pelo referido software foram consideravelmente próximos aos valores de temperatura obtidos durante a experimentação, que na maioria das vezes se mantiveram entre 600 e 800 °C na zona de gaseificação. Em relação

ao potencial energético do gás produzido, o maior poder calorífico obtido foi de 5184,33 kJ/kg, no teste # 2, para o qual foram utilizados 2 kg de biomassa na zona de gaseificação, um tempo de produção de 37 minutos e um aumento de 69,17% em LHV em comparação com o gás produzido por um gaseificador do tipo Downdraft.

Destaca-se também o alto teor de metano no gás de síntese obtido, em comparação com o trabalho de Arango & González, que se deve à reação de hidro gaseificação que é favorecida pela faixa de temperatura, a rápida pirólise da biomassa e a baixa residência hora do gás. Foi estabelecido que, para manter as condições ótimas de operação do gaseificador de zonas múltiplas, a zona de gaseificação deveria ser alimentada a uma taxa de 1.233 kg/h de sabugo de milho, e a área de combustão a uma taxa de 2.343 kg/h.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade de Córdoba como fonte de financiamento, no âmbito da Chamada Interna de Projetos de Investigação enquadrada no âmbito da Sustentabilidade dos Grupos de Investigação ano de 2017, “Lei nº FI-05-17 de 2019”.

### Referências Bibliográficas

1. Sítio da UPME, Unidad de Planeación Minero-Energética. Boletín Estadístico. 2018. Disponível em: <<http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/Boletin-estadistico-de-ME.aspx>>. Acesso em: 15 julho 2019.
2. Sítio da AGRONET, Red de comunicación e información del sector Agropecuario colombiano. Anuario estadístico del sector agropecuario. 2016. Disponível em: <<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>>. Acesso em: 28 julho 2019.
3. Rhenals, J.; Torres, M.; *Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidad de Córdoba, 2016. [[Link](#)]
4. Susastriawan, A. A. P.; Saptoadi, H.; Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, 76, 989. [[CrossRef](#)]
5. Carta, J.; Calero, R.; Colmenar, A.; *Centrales de energías renovables*, Pearson Ed.: Madrid, 2009.
6. Verdeza, A.; *Tese de Doutorado*, Fundación Universidad del Norte, 2013. [[Link](#)]
7. Jeguirim, M.; Bikai, J.; Elmay, Y.; Thermal characterization and pyrolysis kinetics of tropical biomass feedstocks for energy recovery. *Energy for Sustainable Development* **2014**, 23, 188. [[CrossRef](#)].
8. Sellars, B.; Babicki, M. L.; Vancouver, W.; Keefer, B. G.; Island, G.; US 8,674,153 B2 **2014**.
9. Arango, J.; González, L.; *Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidad Pontificia Bolivariana, 2016. [[Link](#)]