

AVALIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA BIOMASSA PARA A EFICIÊNCIA DA GASEIFICAÇÃO: MODELAGEM TERMODINÂMICA UTILIZANDO BAGAÇO DE CANA

Saulo Assis Silva ¹; Saulo Gabriel Felix dos Santos ²; Gabriel Francisco da Silva ³;
Denise Santos Ruzene ⁴; Daniel Pereira da Silva ⁵; Isabelly Pereira da Silva ⁶

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Sergipe – sauloassis4123@gmail.com;

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe – sgf3lix@gmail.com;

³ Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe – gabrieldasilva1961@gmail.com;

⁴ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe – ruzeneds@hotmail.com;

⁵ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Sergipe – silvadp@hotmail.com;

⁶ Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Sergipe – isabellypereira@outlook.com.

Resumo: Com a crescente demanda por energia e preocupações ambientais, a gaseificação de biomassa ganhou destaque. A gaseificação de biomassa é uma técnica promissora para a produção de energia limpa, mas seu desempenho é influenciado pelo teor de umidade do material. Este estudo teve como objetivo investigar o efeito do teor de umidade no processo de gaseificação do bagaço de cana usando modelagem termodinâmica. Utilizando um modelo de equilíbrio termodinâmico estequiométrico, foi estudado o processo de gaseificação do bagaço de cana e foi analisado o efeito do teor de umidade na composição do gás de síntese, o poder calorífico do gás e eficiências como a eficiência de gás a frio e eficiência exergética. Observa-se que com o aumento do teor de umidade, a fração molar de hidrogênio, dióxido de carbono, metano e água aumentaram ao passo que a fração molar de monóxido de carbono e nitrogênio diminuíram. Além do mais, foi visto que o poder calorífico, eficiência de gás a frio e a eficiência da segunda lei diminuem quando o teor de umidade aumenta. Conclui-se, portanto, que o teor de umidade da biomassa influencia significativamente o processo de gaseificação e que a modelagem termodinâmica é uma ferramenta útil para entender e otimizar esse processo.

Palavras-chave: Gaseificação, Biomassa, Modelagem matemática, Teor de umidade.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda por energias, a preocupação com o esgotamento dos combustíveis fósseis, bem como uma crescente conscientização sobre a conservação de energia, vem atraindo a atenção mundial. Os recursos energéticos atuais, como petróleo, carvão e gás, estão sendo usados em ritmo acelerado, com risco de esgotamento no próximo século. Além disso, há também uma crescente conscientização sobre a poluição ambiental e as formas de minimizá-la. Visto isso, vêm sendo buscadas novas formas de energias que são analisadas a partir de duas vertentes importantes: o potencial energético e sua relação com o meio ambiente. E entre as formas de energias que atendem as duas vertentes, uma das que vem tendo destaque é a energia gerada a partir da biomassa pela gaseificação (Zainal *et al.*, 2001).

A gaseificação é um processo termoquímico, oxidação parcial, que converte a matéria orgânica, a partir da adição de um agente de gaseificação, ar ou oxigênio, em ambiente de alta temperatura, em um gás de síntese, que é uma mistura de gases combustíveis (CO , H_2 , CH_4) e não combustíveis (CO_2 e N_2), de baixo poder calorífico (Pellegrini; Oliveira Jr., 2007).

A simulação na área de gaseificação surgiu devido à necessidade de identificar possíveis condições de otimização do processo de gaseificação, e juntamente com o método de modelagem que leva em consideração condição de equilíbrio termodinâmico, é uma boa alternativa devido ao baixo custo e baixa dificuldade em relação aos outros modelos existentes. Existem duas abordagens para a

modelagem de equilíbrio termodinâmico: (i) a primeira conhecida como modelagem de equilíbrio estequiométrico, que é baseada na determinação das constantes de equilíbrio de certas reações, sendo esta a base do presente trabalho; e (ii) a segunda conhecida como modelagem de equilíbrio não estequiométrico, que envolve a minimização da energia livre de Gibbs (não discutida neste trabalho) (Silva *et al.*, 2019).

Visto isso, o presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito do teor de umidade no processo de gaseificação a partir da simulação computacional com base no modelo de equilíbrio termodinâmico estequiométrico.

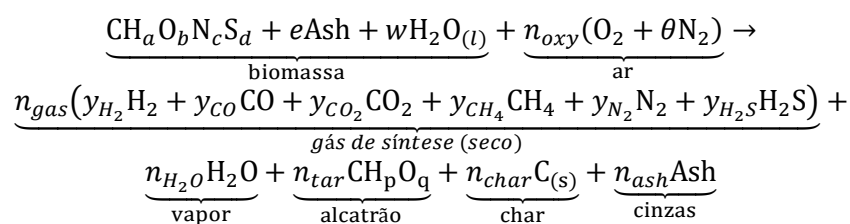
2. METODOLOGIA

Para analisar a influência do teor de umidade no processo de gaseificação via modelagem matemática e computacional foi utilizado o software Gasific, que é baseado no modelo de equilíbrio termodinâmico estequiométrico. O Gasific usa como parâmetros de entrada a composição da biomassa, razão de equivalência e teor de umidade, além de outros que não foram utilizados neste trabalho, e calcula os parâmetros de saída fornecendo informações como a composição do gás de síntese, o poder calorífico inferior (LHV), a eficiência de gás a frio (CGE) e a eficiência exergética, parâmetros usados para avaliar a eficiência do processo de gaseificação.

2.1 Modelo de equilíbrio termodinâmico

Para melhor compreensão dos resultados obtidos com o programa Gasific, nesta seção será dado um foco em resumir o desenvolvimento da modelagem do equilíbrio termodinâmico estequiométrico e sua construção com a finalidade de entender melhor a modelagem, tendo em vista que o software se baseia neste modelo.

O modelo de equilíbrio termodinâmico estequiométrico tem como base a reação global do processo de gaseificação, que inclui a composição da biomassa juntamente com a composições de ar, água líquida e gasosa onde é composta por carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) em maior quantidade, e por nitrogênio (N) e enxofre (S), em menor quantidade (La Villeta *et al.*, 2019):



Para a solução do processo é necessário que equações sejam solucionadas, e para o sistema ser definido é necessário que o mesmo número de incógnitas seja o mesmo número de equações. Quando as produções de tar e char são desconsideradas há 6 incógnitas, exigindo 6 equações. Dessa forma, o conjunto de equações requeridos para solução são: três equações de balanços de massa (carbono, hidrogênio e oxigênio), uma equação de balanço de energia e duas equações de constantes de equilíbrio de reações. Quando um dos elementos não é desconsiderado, além das equações de balanço de massa e energia, são requeridas três equações de constantes de equilíbrio de reações.

A hipótese básica do modelo considera que as reações da zona de redução estão em equilíbrio termodinâmico, portanto, um conjunto de variáveis são introduzidos correspondentes às constantes de equilíbrio (Silva *et al.*, 2019). Para solucionar o modelo de equilíbrio termodinâmico são necessárias as constantes de reações de equilíbrio, que por sua vez são requeridas equações que descrevem as constantes de reações de equilíbrio em função da temperatura. A partir destas equações a variável de temperatura é inserida no sistema de equações.

Dado todo equacionamento, juntamente com os dados de entrada das propriedades da biomassa e agentes gaseificadores, torna possível o cálculo da composição final dos produtos e das eficiências do processo utilizando o método numérico de Newton-Raphson, devido à natureza não linear (Melgar *et al.*, 2006), para resolução de um conjunto de equações de forma simultânea. Destaca-se que este trabalho apresentou uma abordagem deste modelo, não abrangendo todas equações e hipóteses básicas necessárias devido à complexidade de cálculos desenvolvidos pelo software.

2.2 Biomassa selecionada

Para o presente trabalho foi selecionado o bagaço de cana devido a sua composição bem conhecida e por ser uma biomassa de elevada geração e de destaque na sociedade brasileira. A composição do bagaço de cana pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1: Dados da biomassa bagaço de cana

Composição da biomassa						Teor de umidade (MC) [%]	Razão de equivalência (ER)	Poder calorífico superior (HHV) [MJ/kg]
C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cinzas [%]			
46,6	6,9	44,0	0,51	0	2,1	10,1%	0,279	19,26

Fonte: Erlich e Fransson (2011)

2.3 Método para obtenção dos resultados

Com o auxílio do software que simula o processo de gaseificação *Gasific*, foram feitas as simulações para o estudo do comportamento do processo de gaseificação usando a composição da biomassa selecionada e variando parâmetros de entrada para obter os resultados com base na análise dos dados de saída.

Segundo Silva *et al.* (2019), as variáveis importantes utilizadas em estudos de comportamento do processo de gaseificação são a temperatura e a razão de equivalência, que é uma medida da quantidade de oxidante fornecida ao processo. Estas duas variáveis são interrelacionadas, e os métodos de cálculo envolvem a fixação de uma delas, enquanto a outra será calculada pelo conjunto de equações. Destaca-se que neste estudo, o método utilizado foi com razão de equivalência fixada e a temperatura variando com o processo.

2.3.1 Parâmetros de entrada

Para a simulação usando o software *Gasific*, que se baseia no modelo de equilíbrio termodinâmico e estequiométrico, são necessários dados de entrada como a composição da biomassa utilizada (Tabela 1), a variação do teor de umidade e a razão de equivalência (valor fixo) que podem ser vistos na Tabela 2. O teor de umidade da biomassa envolve a razão molar de água na biomassa e a razão de equivalência é uma medida da quantidade de oxidante fornecida ao processo (Silva *et al.*, 2019).

Tabela 2: Dados de entrada para simulação no Gasific

Parâmetro	
Biomassa	Bagaço de cana
Teor de umidade da biomassa – MC (% em peso)	0-35%
Razão de equivalência – ER	0,4 (adimensional)
Alcatrão (Tar)	Desconsiderados
Carvão (Char)	Desconsiderados

Fonte: Elaboração própria.

2.3.2 Parâmetros de saída

O objetivo geral do trabalho foi estudar o processo de gaseificação via modelagem matemática e computacional e para isso foram utilizados os parâmetros de saída como a composição do gás de síntese e as eficiências do processo. Os parâmetros de eficiência são: o poder calorífico inferior (LHV – *lower heat value*), que é o calor produzido pela combustão completa da biomassa; a eficiência de gás a frio (CGE – *cold gas efficiency*), definida como a razão entre a energia química do gás produzido e a energia química da biomassa consumida; e a eficiência exergética, que por se basear na segunda lei da termodinâmica, também é chamada de segunda lei da eficiência e é calculada pela razão entre a produção desejada e entrada (Silva *et al.*, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise da composição do gás de síntese

A partir da Figura 1 é possível avaliar o comportamento da composição do gás de síntese com a variação do teor de umidade na biomassa de bagaço de cana entre 0 - 35%. Com o aumento do teor de umidade, a fração do hidrogênio H_2 e gás carbônico CO_2 aumentam, ao passo que, a fração do nitrogênio N_2 e monóxido de carbono CO diminuem.

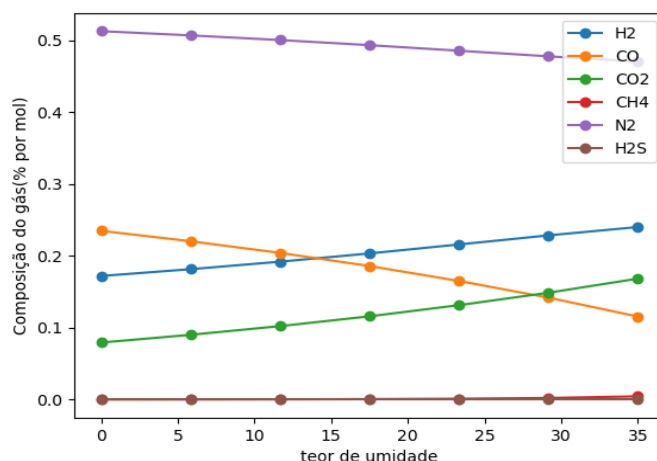


Figura 1: Composição do gás de síntese

Fonte: Elaboração própria.

Com a escala do gráfico, não fica claro como o sulfeto de hidrogênio H_2S e o metano CH_4 se comportam, para isso, foram analisados separadamente o H_2S e CH_4 (Figura 2). Como é possível observar, H_2S diminui com o aumento do teor de umidade, porém é um decréscimo muito pequeno, enquanto o CH_4 sofre um aumento. Estudos de modelagem feitos por Jarunghammachote e Dutta (2007) observaram o mesmo comportamento que o presente trabalho, ou seja, a composição de H_2 e CO_2 aumentaram, e uma tendência oposta foi observada para CO e N_2 quando o teor de umidade varia de 0-30%. Além disso, a variação de CH_4 é quase a mesma para todas as amostras de biomassa com teor de umidade variando de 0-30%, sendo estes resultados coerentes aos resultados da modelagem feita utilizando software Gasific.

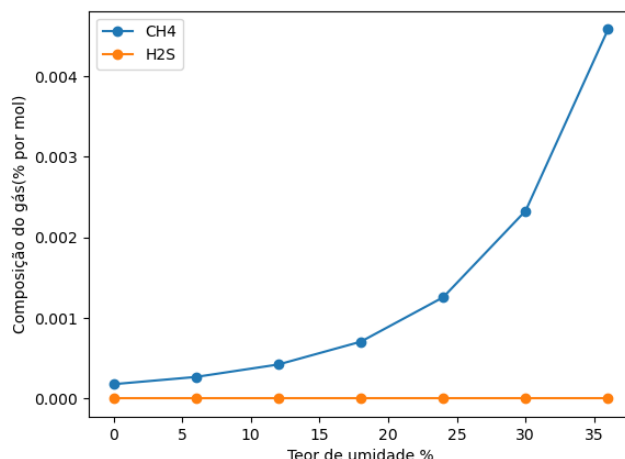


Figura 2: Comportamento do H₂S e CH₄

Fonte: Elaboração própria.

3.2 Análise dos parâmetros de desempenho

Neste tópico será discutido as eficiências do processo por meio do estudo do comportamento das eficiências, ao variar a umidade.

3.2.1 Poder calorífico inferior

Ao analisar a Figura 3, pode-se observar que o poder calorífico diminui de 4,83 para 4,42 MJ/Nm³ variando MC de 0 - 35%. Esse mesmo comportamento foi observado por Jarunthammachote e Dutta (2007) em seus trabalhos. Uma explicação para esse comportamento foi explanado no trabalho de Mendiburu *et al.* (2013), em que se afirmava que esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o poder calorífico superior do gás de produto aumenta com a maior concentração de gases de alto valor energético tais como monóxido de carbono e gás metano, sendo explicado pela reação de deslocamento água-gás (WGSR – *water-gas shift reaction*), que o vapor d'água reage com CO e produz H₂ e CO₂:

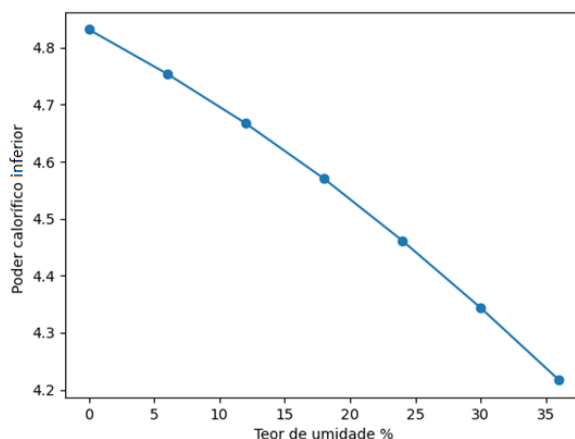
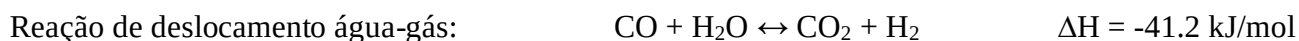


Figura 3: Comportamento do poder calorífico inferior

Fonte: Elaboração própria.

Ou seja, o LHV diminui para biomassas com alto teor de umidade já que, como vimos em tópicos anteriores e na reação de deslocamento água-gás, a concentração de CO diminui e este é o gás com mais potencial energético entre os citados (Jarunthammachote; Dutta, 2007).

3.2.2 Eficiência de gás a frio

Ao analisar a Figura 4, pode-se observar que a eficiência de gás a frio diminui com o aumento do teor de umidade. Uma explicação se deve ao fato da maior redução na concentração de CO em comparação com o leve aumento na concentração de H₂ à medida que o teor de umidade MC aumenta, conforme mostrado na Figura 4, para a biomassa selecionada.

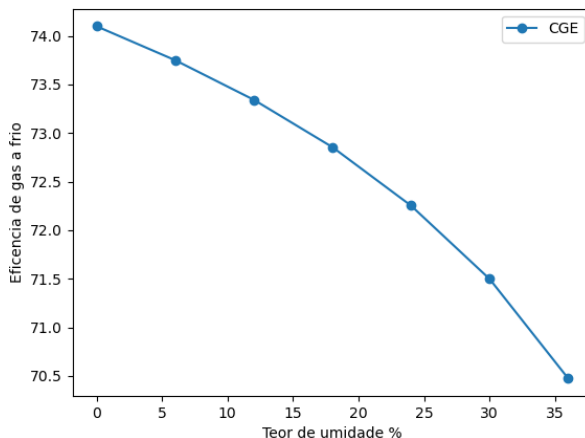


Figura 4: Comportamento da eficiência de gás a frio
Fonte: Elaboração própria.

3.2.3 Eficiência de segunda lei

A partir da Figura 5, pode-se observar que a eficiência de segunda lei diminui ligeiramente de 76,54% para 69,62% quando teor de umidade aumenta de 0% para 35%. Jarungthammachote e Dutta (2007) mostraram que o produto químico padrão exergias de CH₄, CO e H₂ são primeiro, segundo e terceiro maiores valores entre os gases. Quando o MC aumenta, maior teor de ar é necessário para manter a temperatura de reação. Isso resulta em uma diminuição na fração molar de gases úteis como CO, CH₄ e H₂ quando as simulações foram realizadas, o que por sua vez resulta em uma redução significativa do poder calorífico do gás de produção. Tudo isso leva à conclusão de que o MC é um fator muito importante. Portanto, os resíduos devem ser adequadamente secos quando forem utilizados para fins de gaseificação.

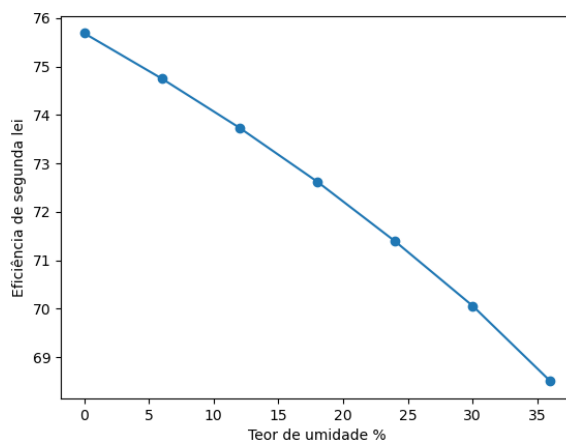


Figura 5: Comportamento da eficiência de segunda lei
Fonte: Elaboração própria.

Um fato importante é que mostra a importância de se estudar a influência do teor de umidade, se faz presente nestes gráficos, pois, nota-se que quase todos os parâmetros de eficiência diminuem com o aumento de teor de umidade.

4. CONCLUSÃO

O primeiro método de estudo paramétrico sobre a influência do teor de umidade (fixação da razão de equivalência) levou às conclusões de que, devido ao aumento do teor de umidade da biomassa, a fração molar de hidrogênio, dióxido de carbono, metano e água aumentaram enquanto a fração molar de monóxido de carbono e nitrogênio diminuíram. Além disso, foi visto que o poder calorífico inferior, a eficiência de gás a frio e a eficiência da segunda lei diminuem quando o teor de umidade aumenta. Por fim, nota-se que, com o modelo de equilíbrio termodinâmico é possível analisar diversos parâmetros e comportamentos importantes para uma primeira análise de gaseificação, sendo, portanto, muito útil sua utilização em análises iniciais de otimizações.

AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem a assistência financeira das agências brasileiras de fomento à pesquisa como Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) sob o Código Financeiro 001, fundação brasileira vinculada ao Ministério da Educação (MEC), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), fundação brasileira vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe (FAPITEC/SE) e a Universidade Federal de Sergipe pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/UFS).

REFERÊNCIAS

- BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 2. ed. Academic Press; 2013.
- ERLICH, C.; FRANSSON, T. H. Downdraft gasification of pellets made of wood, palm-oil residues respective bagasse: experimental study. **Applied Energy**, v. 88, n. 3, p. 899–908, 2011.
- JARUNGTHAMMACHOTE, S.; DUTTA, A. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. **Energy**, v. 32, p. 1660–9, 2007.
- LA VILLET, M.; COSTA, M.; MASSAROTTI, N. Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 71–88, 2017.
- MENDIBURU, A. Z.; CARVALHO, J. A.; CORONADO C. J. R. Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: stoichiometric models. **Energy**, v. 66, p.189–201, 2014.
- MELGAR, A.; PEREZ, J. F.; LAGET, H.; HORILLO, A. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p.59–67, 2007.
- PELLEGRINI, L. F.; OLIVEIRA JUNIOR, S. Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 314–327, 2007.
- SILVA, I. P.; LIMA, R. M. A.; SILVA, G. F.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Thermodynamic equilibrium model based on stoichiometric method for biomass gasification: A review of model modifications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, e109305, 2019.
- ZAINAL, Z. A.; ALI, R.; LEAN, C. H.; SEETHARAMU, K. N. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. **Energy Conversion and Management**, v. 42 p.1499–515, 2001.