

## PROJETO DE UM GASEIFICADOR DE LEITO FIXO SEM GARGANTA DE ESCALA LABORATÓRIAL

Rubenildo Vieira Andrade<sup>1</sup>, Taiane Caetano Silva<sup>2</sup>, Leticia de Oliveira Silva Della Colletta<sup>3</sup>, Gabriela Simões Pereira<sup>4</sup>, Fernando Léo Bueno de Oliveira e Silva<sup>5</sup>, Electo Eduardo Silva Lora<sup>6</sup>.

<sup>1</sup> Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída - NEST, Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Brasil.

Email: <sup>1</sup> ruben@unifei.edu.br; <sup>2</sup> taiane.caetano@gmail.com; <sup>3</sup> leticia.oliveira@unifei.edu.br; <sup>4</sup> gabi.simoes2792@gmail.com;

<sup>5</sup> Fernando.leo17@hotmail.com.; <sup>6</sup> electo@unifei.edu.br.

### Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia usada no projeto de um gaseificador de leito fixo de bancada de pequena capacidade do tipo co-corrente sem garganta. Na maioria dos estudos realizados em escala laboratorial no tema de gaseificação de biomassa os reatores usados estão em uma faixa de 5 a 100 kW térmicos, nos quais é possível analisar os efeitos de diferentes parâmetros operacionais como da temperatura e pressão na eficiência do gaseificador. Gaseificadores de leito fixo são reatores que apresentam configuração simples que podem ser construídos com baixo custo. Sua operação não é complexa e gera um gás combustível denominado de gás de síntese com baixo teor de alcatrão, devido a essas características geralmente são adotados em aplicações que envolvem o uso em conjunto com motores de combustão interna. Levando em consideração esses aspectos o gaseificador co-corrente foi avaliado como a opção mais atrativa para aplicação nesse estudo. A metodologia adotada para o projeto do gaseificador foi desenvolvida, considerando-se uma rigorosa revisão bibliográfica em um grande número de renomadas revistas científicas que tem publicado estudos nessa área de conhecimento, bem como o conhecimento prévio dos autores que tem desenvolvido pesquisas na área de gaseificação da biomassa já há vários anos. O combustível considerado no projeto foi o eucalipto e o agente de gaseificação foi o ar que é fornecido ao reator por um compressor centrífugo, sendo a sua vazão medida através de um rotâmetro. A potência definida de 18,5 kW térmicos para o projeto do gaseificador considerou a eficiência a frio de 70 % e uma razão de equivalência de 0,35.

**Palavras-chave:** gaseificador co-corrente, gás de síntese, biomassa, energia renovável, escala laboratorial.

### Abstract

This work aims to present the methodology used in the project of a small-capacity bench-scale gasifier of the downdraft type without a throat. In most of the laboratory scale studies on biomass gasification, the reactors used are in the range of 5 to 100 kW thermal, which allows us to analyze the effects of different operating parameters, such as temperature and pressure, on the efficiency of the gasifier. Fixed bed gasifiers are reactors with simple configurations that can be built at low cost. Their operation is not complex and they produce a combustible gas called syngas with a low tar content, due to these characteristics they are generally equipped for applications that involve use in internal combustion engines. Taking these aspects into account, the downdraft gasifier has been evaluated as the most attractive option for application in this study. The methodology adopted for the gasifier design was developed taking into account a rigorous bibliographic review of a large number of prestigious scientific journals that have published studies in this area of knowledge, as well as the prior know-how of the authors who have carried out research in the field of gasification of biomass. The fuel considered in the project was eucalyptus and the gasification agent was the air that is fed to the reactor by a centrifugal compressor, and the air stream was measured by a rotameter. The defined power of 18.5 kW thermal took into account a cold efficiency of 70 % and an equivalence ratio of 0.35.

**Keywords:** downdraft gasifier; syngas; biomass; renewable energy; lab-scale.

## 1. Introdução

A gaseificação de biomassa tem sido bastante estudada nos últimos anos e diferentes modelos de reatores têm sido propostos com o intuito de estudar determinadas questões como a quantidade de alcatrão gerado e a melhoria do poder calorífico inferior (PCI) do gás gerado.

Equipamentos de pequeno porte com potência térmica na faixa de 5 a 100 kW têm sido estudados por diferentes autores tendo em vista a sua melhor condição operacional que permite o estudo prático dos efeitos de parâmetros como o tipo de biomassa, conteúdo de alcatrão no gás, e agente de gaseificação na qualidade do gás de síntese obtido.

Na literatura científica, há inúmeros estudos onde os autores realizam extensas revisões sobre os gaseificadores de leito fixo. Esses reatores podem ser classificados em co-corrente, contra corrente e fluxo cruzado, que considera o movimento relativo entre o combustível e o agente de gaseificação [1]. Knoef [2] descreve muito bem como esses equipamentos funcionam.

No caso específico desse artigo os gaseificadores de leito fixo co-corrente sem garganta são estudados. Como o nome sugere, esse tipo de gaseificador não tem a garganta, redução em sua seção transversal, na região de combustão como é comum na maioria dos gaseificadores co-corrente.

A razão de equivalência (ER) corresponde à relação entre o ar real e o ar estequiométrico considerado para o processo. A gaseificação se processa na faixa de 0,2 a 0,4 da razão de equivalência [3]. A experiência mostra que valores de razão de equivalência da ordem de 0,35 apresentam os melhores resultados para gaseificadores de leito fixo, o qual foi escolhido para o projeto do gaseificador em questão.

Comparados a outros gaseificadores os reatores co-corrente são os que apresentam a menor quantidade de alcatrão no gás gerado apresentando valores em torno de 100 mg/m<sup>3</sup>.

Gaseificadores de escala laboratorial fornecem condições favoráveis para testes paramétricos disponibilizando dados para o escalado desses equipamentos. Alguns autores tem desenvolvido estudos reportando resultados sobre testes em gaseificadores de leito fixo co-corrente em escala laboratorial. Sutar (2017) [4] avaliou um gaseificador do tipo Imbert de 4 kW térmicos e apresentou a metodologia de projeto que na literatura geralmente só é relatado para faixa de potência de 40 a 600 kW. Os autores propuseram uma adaptação da metodologia para uso em reatores de pequena escala. Outro autor que desenvolveu estudos em gaseificador de escala laboratorial foi Kumar et al (2018) [5]. Em seu trabalho, ele projeta um gaseificador leito fixo de 5 kW, que usa pellet como combustível, os autores

apresentam condições de projeto que são usados nesse estudo.

Esse artigo apresenta o projeto, construção e teste preliminar de um gaseificador de leito de simples estágio de gaseificação sem garganta. Os testes preliminares mostraram que o gaseificador apresenta boa funcionalidade, tendo gerado um gás de boa qualidade em termos energéticos.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Características da biomassa utilizada

A biomassa utilizada para o dimensionamento do reator foi o eucalipto devido sua grande disponibilidade na região sudeste do Brasil representada pelas florestas energéticas. A análise elementar é apresentada na Tabela 1. O poder calorífico inferior foi calculado considerando-se a umidade de 10%. A Figura 1 ilustra a forma e o tamanho da biomassa considerado no projeto do gaseificador.

Tabela 1 – Análise elementar do eucalipto [6]

Composição elementar da biomassa em base seca	
Elemento	Percentual em massa
C	49,00
H	5,87
O	43,97
S	0,01
N	0,30
A	0,72



Figure 1. Exemplo da dimensão da biomassa considerada no projeto do gaseificador (eucalipto)

## 2.2. Projeto do gaseificador

Considerando-se a experiência dos autores um reator do tipo leito fixo de simples estágio sem garganta foi adotado para o desenvolvimento do projeto. A presença de uma redução na seção transversal na região da Zona de combustão de reatores de pequeno porte pode prejudicar o movimento contínuo do combustível dentro do gaseificador acarretando problemas ao processo de gaseificação como o aparecimento de espaços vazios e caminhos preferenciais no leito o que induz a uma redução da qualidade do gás de síntese gerado.

O principal parâmetro considerado no projeto do gaseificador foi a demanda térmica de 18,5 kW calculada a partir do PCI que considera a composição

elementar em uma base úmida aplicando-se a Eq. 1, A razão de equivalência (ER) para as melhores condições de operação de um reator de leito fixo é de 0,35, sendo esse valor adotado para o projeto.

A Figura 2 apresenta em forma de fluxograma a metodologia adotada no projeto do gaseificador, onde inicialmente, é considerada a potência térmica requerida, em sequência, tem-se o número de injetores, a eficiência do gaseificador, o poder calorífico, a análise elementar, e a massa específica.

O consumo do combustível é calculado através da Eq. 2. Esse valor é usado para calcular o diâmetro do reator (Eq. 3). O volume de ar teórico é determinado pela Eq. 4 e o volume de ar real pela Eq. 5 que considera a razão de equivalência adotada de 0,35.

$$PCI_{comb} = 339 \cdot C + 1030 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 24 \cdot W \quad (1)$$

$$\dot{m}_{comb} = \frac{E_{tg}}{PCI_{comb} \cdot \eta_g} \quad (2)$$

$$\Psi_{ar}^0 = 106,6 \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \quad (4)$$

$$D_g = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_{comb}}{\pi \cdot SFR}} \quad (3)$$

$$\Psi_{ar} = \lambda \cdot \Psi_{ar}^0 \cdot \dot{m}_{comb} \quad (5)$$

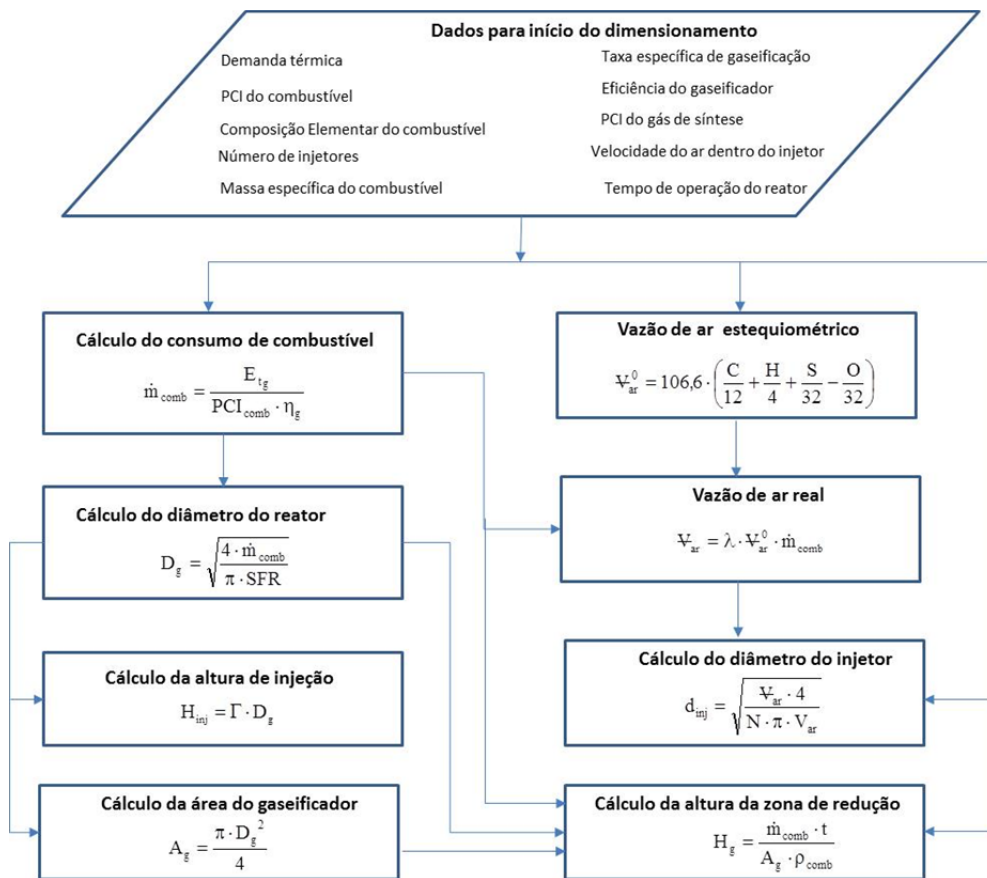


Figure 2. Fluxograma representativo da metodologia de cálculo para o dimensionamento do gaseificador

O valor adotado para a razão específica de combustível (SFR) foi de 200 kg/m<sup>2</sup>\_h, esse valor foi adotado considerando-se o trabalho desenvolvido por Jain (2006) [7].

Um importante parâmetro no projeto de um gaseificador de leito fixo é a altura da injeção do agente de gaseificação, que nesse caso é adotado como sendo o ar. O cálculo pode ser realizado aplicando-se a Eq. 6 que relaciona uma constante ( $\Gamma = 1,28$ ) e o diâmetro.

$$H_{inj} = \Gamma \cdot D_g \quad (6)$$

A seção transversal o reator é determinado aplicando-se a Eq. 7 e a altura da zona de reação foi calculada adotando-se duas horas de operação contínua e usando-se a Eq. 8.

$$A_g = \frac{\pi \cdot D_g^2}{4} \quad (7)$$

$$H_g = \frac{\dot{m}_{comb} \cdot t}{A_g \cdot \rho_{comb}} \quad (8)$$

O resultado obtido a partir da aplicação dessa metodologia foi usado para a construção de um modelo 3D apresentado na Figura 3. Esse modelo não considera o silo de alimentação.



Figure 3. Modelo em 3D para a primeira concepção do gaseificador.

### 2.3. Valores obtidos a partir da metodologia

Após o estudo da metodologia foi possível calcular as principais dimensões do gaseificador. Como já mencionado optou-se para esse estudo pelo

gaseificador de leito fixo sem garganta, sendo que os dados preliminares de projeto são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados preliminares de projeto

Variáveis de projeto	Valores adotados
PCI da biomassa	15,84 MJ/kg
Eficiência do Gaseificador	70 %
SFR	200 kg/m <sup>2</sup> _h
Energia térmica demandada	18,5 kWt
Razão de Equivalência	0,35
Número de injetores	4,0
Velocidade no injetor	4,0 m/s
Massa específica aparente da biomassa	500,00 kg/m <sup>3</sup>
Tempo de operação	2 h

A partir da aplicação da metodologia e dos dados apresentados na tabela 2, calculou-se as principais dimensões do gaseificador as quais são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões do gaseificador projetado

Dimensões de projeto	Valores obtidos
Diâmetro do gaseificador	0,2 m
Área da seção transversal	0,03 m <sup>2</sup>
Altura da seção de reação	0,8 m
Altura do ponto de injeção a partir da grelha	0,25 m
Diâmetro do injetor	0,012 m
Consumo de biomassa	6 kg/h
Vazão de ar	6,31 m <sup>3</sup> /h

### 2.4. Construção do gaseificador

O gaseificador foi construído nos laboratórios de engenharia mecânica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). A Figura 4 mostra o gaseificador em processo de construção sem a isolamento externa. Na figura é possível ver os pontos de medidas de temperatura onde estão posicionados os termopares tipo K. O ponto de injeção de ar também pode ser visto, bem como, a tubulação de saída do gás de síntese. A Figura 5 apresenta a foto de grelha usada no projeto. O material usado na construção do gaseificador foi aço SAE 1020.

O agente de gaseificação (ar) é fornecido usando-se um compressor radial e um rotâmetro é utilizado para medir a vazão de ar. Esses equipamentos são apresentados na Figura 6.

São utilizados 6 termopares tipo K para mediar a temperatura ao longo do reator e os valores de temperatura são registrados por um sistema de aquisição de dados de 6 canais onde cada canal pode ser configurado através de um software dedicado que



é conectado a um computador usando um cabo USB. Na Figura 7 são apresentados o modelo de termopar e o sistema de aquisição utilizado no projeto.



Figure 4. Gaseificador em processo de construção



Figure 5. Grelha do gaseificador



(a) Compressor radial



(b) Rotâmetro

Figure 6. Fotos do compressor de ar e do rotâmetro.



(a) Termopar tipo K



(b) Sistema de aquisição de dados

Figure 7. Termopar tipo k e sistema de aquisição de dados

### 3. Primeiro teste do gaseificador

A fim de testar a funcionalidade do reator construído, foi realizado um teste preliminar onde foi utilizado 4 kg de eucalipto, sendo que também foram utilizados 2 kg de carvão vegetal que tem a finalidade de auxiliar na partida do reator, ou seja, no início do processo. Na Figura 8 pode ser vista a pesagem do material combustível utilizado no teste.

O gaseificador apresentou um rápido processo de partida produzindo um gás com boa qualidade, pois apresentou chama consistente e bem ancorada ao queimador “Flare”. A coloração da chama foi de cor predominante amarelada. Infelizmente nesse teste preliminar de funcionalidade não foi possível realizar a medida da composição volumétrica dos gases combustíveis presente do gás de síntese que permitiriam a determinação do poder calorífico. Essa etapa será realizada posteriormente quando será possível relatar a determinação da eficiência do sistema. Uma foto onde é possível ver a queima do gás de síntese gerado é apresentada na Figura 9.



Figure 8. Pesagem da biomassa.



Figure 9. Foto do gaseificador em operação

O comportamento da temperatura ao longo do gaseificador é apresentada na Figura 10, onde nessa figura, observa-se a medida de temperatura nos 6 diferentes pontos no reator. Os termopares são numerados desde a grelha até o topo do gaseificador, considerando-se essa disposição o termopar 1 registra a temperatura na zona de redução, o termopar 2 registra a temperatura na zona de combustão, o termopar 3 na Zona de pirólise, e o termopar 4, 5 e 6 permitem o acompanhamento da temperatura na zona de secagem.

Três seções podem ser observadas na Figura 10. Seção 1, que representa o período de aquecimento do gaseificador, a Seção 2, que representa o período de operação em regime de gaseificação, e a seção 3 que representa o período final de operação caracterizado pelo fim do combustível no interior do reator.

É interessante observar as diferenças no período em que ocorre o aumento de temperatura para os diferentes pontos de amostragem. Essa diferença, assinalada pela linha pontilhada no gráfico, pode representar o avanço da frente de chama no interior do reator. No final o processo na Seção 2 é possível observar, também, o aumento da temperatura registrados pelos termopares 4, 5 e 6 que coincide com o final do combustível dentro do reator, esse sinal poderia ser usado para automatização do processo de fornecimento de combustível ao reator.

### 4. Conclusões

A metodologia de projeto de um gaseificador de leito fixo co-corrente sem garganta foi apresentada e foi aplicada na construção de um reator de bancada em escala laboratorial de 18,5 kW térmicos. A metodologia apresentou bons resultados nos testes preliminares no reator desenvolvido. Os principais pontos a serem destacados são:

- 1 – A metodologia foi aplicada com sucesso no projeto do gaseificador de leito fixo co-corrente sem garganta;
- 2 – Nos testes preliminares o gaseificador apresentou bons resultados desde que o gás de síntese gerado apresentou queima consistente e perfeita ancoragem no queimador;
- 3 – O gaseificador apresentou boa distribuição de temperatura ao longo do leito;

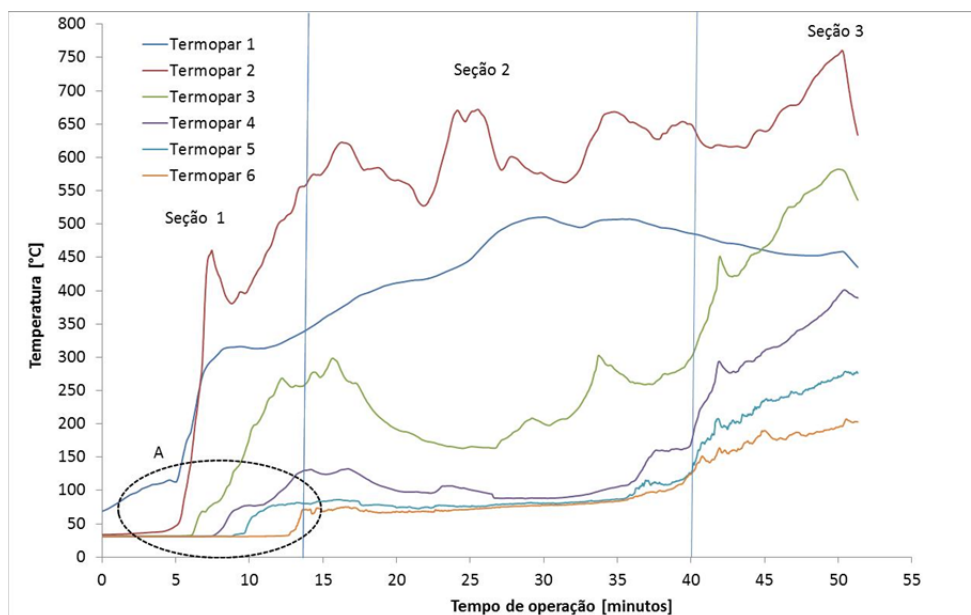


Figure 10. Registro das temperaturas durante o funcionamento do gaseificador

4 – O gaseificador construído poderá ser utilizado em testes complementares, inclusive com diferentes tipos de combustíveis

5 – O modelo do gaseificador construído poderá ser escalado.

6 – O gás gerado poderá ser utilizado em aplicações como, por exemplo, para o acionamento de motores de combustão interna.

## 5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela disponibilidade dos laboratórios para construção e testes do gaseificador.

## 6. Referências

[1] Basu, P., 2013. "Biomass Gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory", second edition. Elsevier Inc, USA.

[2] Knoef, H., 2005. "Handbook Biomass Gasification". BTG biomass technology group BV, Netherlands.

[3] Narvaez, I., Orlo, A., Aznar, M. P., Corella, J., 1996. "Biomass gasification air in an atmospheric Bubbling fluidized bed, effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas". Ind. Eng. Chem, Res., Vol. 35, pg. 2110-2120.

[4] Sutar, K. B.; Kohli, S.; Ravi, M.R., 2017. "Design, development and testing of small downdraft gasifiers

for domestic cookstoves". Energy, Vol. 124, pp. 447-460.

[5] Kumar, G. S., Gupta, A., Viswanadham, M., 2018. "Design of lab-scale downdraft gasifier for biomass gasification". IOP Conf. Ser. : Materials Science and Engineering, 455 012051.

[6] Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., Gomez, E. O., 2009. "Biomassa para energia". Editora Unicamp, Campinas – SP.

[7] JAIN, A. K. "Design Parameters for a Rice Husk Throatless Gasifier Reactor". Agricultural Engineering International: CIGR Journal, v. VIII, p. 1-13, 2006.