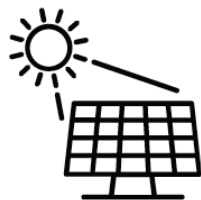




III Congresso  
Ibero-Americano de  
Empreendedorismo, Energia,  
Ambiente e Tecnologia:  
Livro de atas

*12 a 14 de julho de 2017*



Instituto Politécnico de Bragança

# *Gaseificador de blocos de madeira em leito fluidizado: uma revisão*

Camila Fonseca Chaves

Escola Superior de Tecnologia e Gestão - ESTiG  
Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.  
Grupo de Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e  
Tecnologia (GEEMAT), CEFET/RJ Campus A. dos Reis  
Angra dos Reis, Brasil / cams.fonseca@gmail.com

1- Ronney Arismel Mancebo Boloy /Grupo de  
Empreendedorismo, Energia, Meio Ambiente e  
Tecnologia (GEEMAT), CEFET/RJ Campus  
Angra dos Reis

Angra dos Reis, Brasil/ ronney.boloy@cefet-rj.br  
2- Luis Frólén Ribeiro

Escola Superior de Tecnologia e Gestão – ESTiG  
Instituto Politécnico de Bragança, Bragança,  
Portugal.  
frolen@ipb.pt

**Resumo** — O estudo inicia-se a partir do aproveitamento da biomassa em um gaseificador no qual é gerado cinzas e um gás de síntese. Existem três tipos mais comuns de gaseificadores, sendo estes o gaseificador de leito fluidizado, gaseificador de leito fixo e gaseificador de fluxo de arraste. As quatro etapas do processo de gaseificação são descritas como secagem, pirólise, combustão e redução. O gás de síntese gerado a partir do gaseificador passa por um ciclone, ou mais comumente chamado de catalisador, onde são retirados os materiais particulados e suas impurezas, sendo o alcatrão o resíduo que pode ser denominado um grande desafio para a purificação. Posteriormente, o gás de síntese alimentará um sistema chamado de acionadores primários, sendo eles os motores de combustão interna (Otto ou Diesel), motor de combustão externa (Stirling) microturbinas e células combustíveis.

**Palavras chaves** — biomassa; gaseificador; gás de síntese, purificação, motor de combustão interna.

## I. INTRODUÇÃO

A produção de energia através da gaseificação da biomassa já existe há mais de 100 anos, embora aparenta ser uma tecnologia recente. Essa tecnologia foi colocada em segundo plano por um longo período de tempo devido ao baixo preço dos combustíveis fósseis. Contudo após as crises políticas de 1970 a 1980, houve um despertar para o estudo e vem sendo visto como uma das opções vantajosas para substituição dos combustíveis fósseis pela baixa emissão de poluentes. [1]

A biomassa como fonte renovável de energia possui como grande vantagem a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que o CO<sub>2</sub> emitido na utilização energética da biomassa tenha sido aproveitado no processo de crescimento do material vegetal, sendo CO<sub>2</sub> neutro. Existem também desvantagens como a baixa densidade e seu grande conteúdo de umidade que influenciam no seu aproveitamento energético por meio dos custos relacionados a sua transformação para gás de síntese. [2].

Os estudos demonstram que a utilização de biomassa para fins energéticos vem obtendo números significativos de

crescimento no mundo, atualmente as energias renováveis apresentam um pouco mais de 12% da matriz mundial, sendo que a biomassa total contribui com 9,73%. Principalmente nos países em desenvolvimento, a produção de biomassa vem ganhando investimentos para um número considerável de novas tecnologias para o processamento, produção de biocombustíveis, conversão de biomassa em calor e energia como também diminuição dos custos. As principais regiões produtoras de biomassa são: Ásia e Austrália, América Latina e Caribe, pois estas regiões apresentam um maior potencial para aumentar o uso dessa fonte renovável. As regiões como Europa e Oriente Médio tem a menor disponibilidade de biomassa [3].

A tecnologia de gaseificação de biomassa pode ser integrada à sistemas de cogeração de energia, isto permite o aproveitamento do syngas na disponibilização de energia, seja térmica e/ou elétrica [4].

A saber, existem três categorias principais de conversão de biomassa: a conversão termoquímica, biológica e física. Sendo a conversão termoquímica o processo onde a matéria-prima de biomassa é convertida em combustível (syngas) com um poder calorífico baixo, médio ou alto, dependendo do agente gaseificante. O processo de gaseificação pode ser utilizado para produzir gás de síntese para combustão em caldeiras, turbinas e motores de combustão interna. Deve-se mencionar também que na aplicação do syngas é necessária à sua limpeza por meio de catalizadores para a eliminação de compostos não desejados [5].

O presente trabalho tem como objetivo uma análise da literatura científica sobre as tecnologias e desafios da gaseificação de blocos de madeira para geração de energia.

## II. GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

### A. Gaseificação como uma tecnologia

Sobre a conversão de biomassa em formas úteis de energia, é possível citar como método a combustão direta como também a conversão em combustíveis líquidos ou gasosos para aplicações práticas de algumas tecnologias, sendo essas tecnologias a combustão, gaseificação, pirólise, liquefação hidrotérmica e fermentação [6]. Muitas dessas tecnologias

foram desenvolvidas com sucesso, porém poucas são comercializadas ou estão em desenvolvimento. [7].

Deve-se ressaltar que a gaseificação disponibiliza uma ampla seleção de matéria-prima (por exemplo, resíduos agrícolas e florestais, subprodutos da indústria de alimentos e bio-refinarias, resíduos orgânicos municipais) e dessa forma, para a geração de calor e eletricidade, o syngas pode ser usado como combustível. A gaseificação, quando comparada a combustão direta, possui vantagens como a capacidade de usar o gás de síntese para outros produtos além da eletricidade, e possui um aumento da eficiência na geração de energia (pode-se dizer 60% de aumento) [8].

A gaseificação é uma tecnologia responsável pela conversão térmica da biomassa numa mistura gasosa de gás de síntese na presença de um agente oxidante, como exemplo o ar, oxigênio ou vapor, em condições abaixo da estequiometria. Esse processo nos fornece como principais compostos [9]:

- Hidrogênio (H<sub>2</sub>);
- Monóxido de Carbono (CO);
- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) com metano (CH<sub>4</sub>);
- Água (H<sub>2</sub>O);
- Hidrocarbonetos superiores (HC) em pequenas quantidades.

A utilização do syngas garante a geração de eletricidade usando motores de combustão interna (CI) e turbinas a gás, como também a produção de produtos químicos e combustíveis líquidos.

#### B. Gaseificadores de biomassa

Os gaseificadores são os mecanismos para o processo de gaseificação da biomassa, onde a tecnologia do reator é definida pelo mecanismo de purificação do gás produzido. Essa purificação pode ser realizada em gaseificadores que trabalham em baixas temperaturas (800 a 1000 °C) como também os gaseificadores que realizam a purificação a temperaturas elevadas (1200 a 1400 °C), contendo principalmente CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>. Tem-se a baixas temperaturas um gás com uma mistura de compostos, sendo esses compostos o CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>2</sub>, olefinas, benzeno, alcatrão e impurezas inorgânicas. Logo, quando se tem um gaseificador a baixas temperaturas, faz-se necessário a utilização de um processo mais rigoroso quanto a purificação do gás para que este, atendendo as normas ambientais, seja utilizado em indústrias. Essa purificação é desenvolvida de acordo com a aplicação final deste gás combustível. [10]

#### C. Tipos de gaseificadores

Existem variados tipos de gaseificadores, sendo os principais o gaseificador de leito fluidizado, leito fixo e fluxo de arraste [11].

- Leito Fluidizado que dependendo de seu regime, pode apresentar dois tipos: leito fluidizado borbulhante, onde o gás obtido possui menor quantidade de alcatrão devido ao seu maior tempo de residência, mas com

elevado conteúdo de metano, e o leito fluidizado circulante, onde é aceito uma grande variedade de matérias-primas e cargas mais reativas são preferidas devido a esse processo ser realizado a baixas temperaturas.

- Leito Fixo que pode ser classificado de acordo com o fluxo de biomassa e agente oxidante, em que o tipo concorrente a biomassa e o agente oxidante entram pelo topo do reator, e no tipo contracorrente, a biomassa entra pelo topo e o agente oxidante pelo fundo. O gaseificador de leito fixo, tanto do tipo concorrente como contracorrente, necessita de uma matéria-prima com granulometria uniforme, com teor de umidade menor que 20% e 60% m/m e baixo conteúdo de cinzas, menor que 6 a 25% m/m.
- Fluxo de Arraste, sendo o mais comum operando a altas temperaturas (em média de 1450 °C) e a uma pressão de 20 a 50 bar, sendo superior à temperatura de fusão das cinzas da biomassa, causando assim o “slagging”, onde o sedimento formado pela fusão das cinzas da biomassa desce pela parede do reator tendo como utilidade a proteção do refratário. Com essas características, o gaseificador de fluxo de arraste produz um gás praticamente isento de impureza orgânica, produzindo principalmente H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub>.

É importante citar que somente os gaseificadores do tipo fluidizado circulante, com capacidade mínima de 20MW, e fluxo de arraste, com capacidade mínima de 100MW, são adequados para grandes capacidades. Porém, estes gaseificadores possuem dificuldades em sua tecnologia, sendo elas resumidas como [12]:

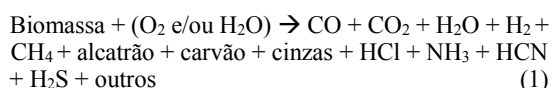
- Leito fluidizado circulante necessita de um desenvolvimento de processo de limpeza e condicionamento do gás com o foco na remoção de contaminantes, como por exemplo H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, metais alcalinos e alcatrão, permitindo, assim, o atendimento aos critérios dos processos mais exigentes, como por exemplo a síntese de Fischer-Tropsch, maximizando a eficiência energética da planta;
- Fluxo de arraste é carente de um desenvolvimento do método de alimentação e otimização do coprocessamento de biomassa com outras matérias-primas, como por exemplo, carvão e/ou coque de petróleo.

#### D. Etapas da gaseificação

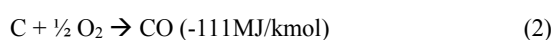
O gás é submetido no interior do reator a 4 etapas, são elas a secagem da biomassa, pirólise, combustão e redução [13]

- Secagem (até 150°C): processo endotérmico, onde ocorre sob forma de vapor a evaporação da umidade da matéria-prima/biomassa.
- Pirólise (T<700°C): processo endotérmico que produz H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>, alcatrão e um resíduo

sólido de carbono (char). A etapa de pirólise fica situada acima das etapas de combustão (leito fixo do tipo concorrente) e redução (contracorrente) e à temperaturas em torno de 200°C as reações se iniciam, quando se começa a decomposição da estrutura da biomassa por ação térmica. O processo de gaseificação é globalmente endotérmico, podendo ser descrito pela equação 1:

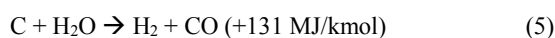


- **Combustão (700<T<2000°C):** processo exotérmico, onde acontece a reação do carbono da matéria-prima com o oxigênio. Para as reações endotérmicas é necessário um calor, sendo este fornecido pela combustão da parte do combustível, carvão ou gases. As reações seguem representadas pelas equações (2) a (4).



- **Redução (800<T<1100°C):** reação endotérmica para obtenção de gases combustíveis. Em um gaseificador de leito fixo, os gases quentes da fase de combustão passam à zona de redução, tendo as reações para a zona de redução representadas nas equações (5) a (9).

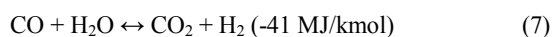
Oxidação parcial do carbono pelo vapor d'água:



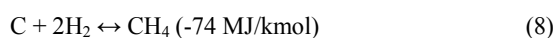
Reação de Boudouard:



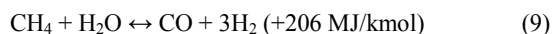
Reação de shift:



Reação de formação de metano:



Reação de reforma a vapor de metano:



### III. BIOMASSA

Neste estudo, será analisado a madeira de eucalipto como biomassa, onde esta foi utilizada no processo de gaseificação de um teste cortada em pedaços cilíndricos, com diâmetro de 80 mm e altura de 90 mm aproximadamente, umidade média

de 16,42% de um total de cinco pedaços retirados aleatoriamente da pilha e medida com um Higrômetro Digisystem DL 2000. As características da madeira pela verificação imediata, antes de passar pela etapa da combustão e a verificação elementar, após a etapa da combustão estão descritas na Tabela 1:

TABELA I CARACTERÍSTICAS DA LENHA DO EUCALÍPTO UTILIZADO

Syngas		
Poder calorífico	PCI	16,14 MJ/Kg
	PCS	18,96 MJ/Kg
Análise Imediata	Voláteis	77,5 %
	Carbônico Fixo	16,7 %
	Cinzas	0,41 %
Análise Elementar	Hidrogênio	6,4 %
	Oxigênio	41,8 %
	Nitrogênio	0,4 %
	Enxofre	** N.I.

Através da medição da quantidade de massa gerada de resíduo é feita a análise, após o término do processo do gaseificador, onde foram coletadas as cinzas e o material particulado do ciclone [14].

### IV. ALCATRÃO

#### A. Caracterização do alcatrão

São identificadas diversas formas para a remoção do alcatrão do gás de síntese, porém tem-se que duas são as mais utilizadas. Uma delas é através do método primário que se baseia na escolha do método de gaseificação, ou seja, tipo de reator e condições operacionais. O método secundário pode ser exemplificado por ciclones, adsorventes, filtros, leitos de adsorção, torres de lavagem, precipitador eletrostático e remoção catalítica. [15] Uma vez que o método primário é baseado na otimização das condições experimentais da gaseificação, será abordado apenas o método secundário.

De acordo com a literatura científica, é possível descrever os dados de eficiência de remoção de alcatrão usando diversos sistemas [16]:

- Precipitadores eletrostáticos (RSP) 30-70% e filtros de manga 0-50%;
- Filtro cerâmico 77-97%;
- Filtro catalítico: de acordo com os dados coletados, à temperaturas superiores a 800°C foi detectado uma alta eficiência, porém é necessário afirmar que, por essa tecnologia ainda estar em desenvolvimento, encontra-se com um elevado custo operacional. [17]

Embora a literatura científica muitas vezes traz referências dos processos de craqueamento catalítico para a remoção do alcatrão, as condições de processo de gaseificação privilegiam

o uso de catalisadores ativos na reação de reforma a vapor, uma vez que a corrente tem elevada quantidade de vapor d'água.

Alguns autores empregaram um processo de gaseificação gerado num sistema de processamento químico de pequena escala (planta piloto) empregando catalisadores comerciais, com a remoção do alcatrão superior a 97%. Porém a vida útil dos catalisadores encontrou-se afetada pelo fato do alto teor de alcatrão na entrada do reformador, pela natureza química do alcatrão, como também o envenenamento por enxofre e metais alcalinos, além do fato de formação de coque. [18], [19], [20], [21], [22].

#### B. Catalisadores empregados na remoção do alcatrão

- Zeólitas: infelizmente apresentam muitas desvantagens, como a rápida desativação e baixa eficácia catalítica quando comparadas a dolomita, além do fato de possuírem um custo elevado quando sintéticos [23].
- Os catalisadores mineirais como olivina, dolomita, calcita e magnesita, pois estes apresentam como vantagem o baixo custo. Sua eficiência na remoção do alcatrão mostra-se acima de 95% quando calcinado em temperaturas a 800 e 900°C. Infelizmente apresentam pouca resistência mecânica [24].
- Metálicos (ex.: Ni, Rh, CO, Fe) suportados (ex.: ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, MgO, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e mistura destes) e catalisadores bimetálicos (ex.: Ru-Ni, Pd-Ni, Ni-Pt). Dentre os catalisadores citados, destaca-se a eficiência obtida com os catalisadores metálicos de Ni suportados em hexa-aluminatos e catalisadores de Rh. Foram empregados estudos no catalizador que contém Rh usando uma composição sintética de gaseificação contendo 3,1 %CH<sub>4</sub>, 5,0 %CO, 5,1 %CO<sub>2</sub>, 1,3 %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 7,9 %H<sub>2</sub>, 22,1 %He, 55,5 %H<sub>2</sub>O e 77,3 ppm de H<sub>2</sub>S. Os autores inicialmente empregaram elevada velocidade espacial (159000 h<sup>-1</sup>), na temperatura de 900 °C, usando a reforma a vapor do etileno, evidenciando através de testes conduzidos por 200h que a desativação pela contaminação foi menor para os catalisadores contendo Rh. Com o mesmo teste, os catalisadores contendo Ni tiveram que ser reativados com vapor após 100h de reação, tornando-se menos eficiente [25].

Visto que os catalisadores metálicos que contém Rh e Ni são os mais eficientes, pois comprovaram sua eficácia em longas durações, como já citado, em relação a desativação por H<sub>2</sub>S e por depósito de coque, uma vez a aprovação destes dois critérios são considerados fundamentais para a purificação do gás de síntese proveniente da gaseificação de biomassa.

#### V. ACIONADORES PRIMÁRIOS

O gás de síntese pode atender a diversas finalidades por meio dos Acionadores Primários. As diferentes tecnologias que estão englobadas no mecanismo de geração de eletricidade em pequena escala são um motor de combustão interna (Otto ou Diesel), combustão externa (motor Stirling), microtubinas e células combustíveis [26].

#### A. Motor de combustão interna (Otto ou Diesel)

Motor de combustão interna: A tecnologia dos motores alternativos de combustão interna tem-se expandido em escala comercial em função de seu baixo custo de instalação, fácil manutenção e por possibilitarem seu uso através do gás proveniente de gaseificação de biomassa. Infelizmente, essa tecnologia ainda apresenta dificuldades na remoção de particulados e alcatrão do gás de síntese para ser utilizado nos motores [27].

Por possuir a maior taxa interna de retorno, menor custo de geração de energia e menor custo de investimento específico, analisa-se uma vantagem econômica na tecnologia de motor alternativo de combustão interna quando comparado com os demais acionadores primários [28].

#### VI. CONCLUSÃO

Através da literatura científica foi possível analisar que o gás produzido na gaseificação de biomassa de madeira, mais especificamente, de pinheiro, tem uma ampla utilização. Contudo a sua utilização encontra barreiras na fase de purificação, principalmente na remoção do alcatrão. Visto que isso pode ser solucionado por meio dos catalisadores que tenham uma alta eficiência para a remoção dos hidrocarbonetos, resistência a coqueamento e envenenamento por enxofre. Pode-se observar que dentre os diversos catalisadores, os de Ni suportados em hexa-aluminatos e catalisadores Rh obtiveram uma melhor e mais alta resposta positiva nos testes feitos por pesquisadores, sendo resistentes a 200h na presença de H<sub>2</sub>S.

Sobre os aplicadores primários, analisa-se uma caracterização do motor de combustão interna (Otto e Diesel) como um sistema que possui geração de energia e custo de investimento específico menor quando comparado a outros, por exemplo motor Stirling, viabilizando, assim, a sua utilização.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Lacerda, A.G.A.; Maruyama, F.M. Geração de Energia Elétrica à partir de células de combustível. Relatório Final do Projeto de Formatura 2000, PEA. EPUSP, São Paulo 2000
- [2] Zurich, E. Electricity from wood through the combination of gasification and solid oxide fuel cells Systems analysis and Proof-of-concept. Stuttgart: Universität Stuttgart/Federal Republic of Germany, 2008.
- [3] Cortez, Lora; Gomez (2008).
- [4] Botão, S. G., Lacava, P. M. Uso do bagaço da cana-de-açúcar para cogeração de energia elétrica no Estado de São Paulo e a comercialização do excedente da energia gerada. Revista de Biociências, Taubaté, v. 9, p. 17-37, jul-set. 2003.
- [5] IEA Bioenergy Task 40, 2017
- [6] Srirangan, K.; Akawi, L.; Moo-Young, M.; Chou, C.P. Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources. Appl. Energy 2012, 100, 172–186.
- [7] Devi, L.; Ptasiński, K.J.; Janssen, F.J. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. Biomass Bioenergy 2003, 24, 125–140.
- [8] Anis, S.; Zainal, Z.A. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 2355–2377
- [9] Ahmad, A.A.; Zawawi, N.A.; Kasim, F.H.; Inayat, A.; Khasri, A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on

### III Congresso Ibero-Americano de Empreendedorismo, Energia, Ambiente e Tecnologia

- biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 53, 1333–1347.
- [10] Knoef, H. A. M.; *Handbook of biomass gasification*, Biomass Technology Group: Enschede, 2005.
- [11] Higman, C.; Burgt, M. V. D.; *Gasification*, Elsevier: Burlington, 2003
- [12] Knoef, H. A. M.; *Handbook of biomass gasification*, Biomass Technology Group: Enschede, 2005.
- [13] Boerrigter, H.; Calis, H. P.; Slort, D. J.; Bodenstaff, H.; Kaandorp, A. J.; Den Uil, H.; Rabou, L. P. L. M., *Relatório do Energy Center of Netherlands*, ECN-C-04-056, 2004.
- [14] Figueiredo, F.L.; Fernandes, F.; *Produção de energia elétrica através da biomassa em sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA*, Ciências Exatas e Tecnológicas, 2012, 166-174.
- [15] Han, J., Kim, H.; *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2008, 12, 397.
- [16] Anis, S.; Zainal, Z. A.; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011, 5, 2355.
- [17] Dirk, J. D.; Zhao, H.; Baron, G.V.; *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001, 40, 3309.
- [18] Aznar, M. P.; Caballero, M. A.; Gil, J.; Martín, J. A.; Corella, J.; *Ind. Eng. Chem. Res.* 1998, 37, 2668.
- [19] Caballero, M. A.; Aznar, M. P.; G. Javier; Martín, J. A.; Francés E.; Corella, J.; *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 5227.
- [20] Narváez, I.; Corella, J.; Orío, A.; *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 317.
- [21] Orío, A.; Corella, J.; Narváez, I.; *Ind. Eng. Chem. Res.* 1997, 36, 3800.
- [22] Delgado, J.; Aznar, M. P.; Corella, J.; *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996, 35, 3637.
- [23] Fredriksson, H. O. A.; Lancee, R. J.; Thune, P. C.; Veringa, H. J.; Niemantsverdriet, J. W.; *Appl. Catal.*, B2013, 130, 168.
- [24] Constantinou, D. A.; Efstathiou, A. M.; *Catal. Today* 2009, 143, 17.
- [25] Steele, A.M.; Poluston, S.; Magrini-Bair, K.; Jablonski, W.; *Catal. Today* 2013, 214, 74.
- [26] Vianna Junior, A.L., Vieira, L. S. R., Soares, G. F. W., Nascimento, M. V. G.; (2001), *Estudo Comparativo de Microsistemas de Geração Baseados em Combustíveis*. CEPEL.
- [27] Nogueira, L. A. H.; Lora, *Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações*. 2ª edição, 2003
- [28] Hasler, P.; Nussbaumer, Th. *Gas cleaning for IC engine application from fixed bed biomass gasification*, *Biomass and Bioenergy*, vol 16, pp. 385-395, 1999.