

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA OPERANDO COM GASEIFICADORES DE MADEIRA

Eduardo dos Santos Barata¹, e-mail: eduardobarata@uol.com.br
Ednildo Andrade Torres¹, e-mail: ednildo@ufba.br

¹ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Escola Politécnica de Engenharia – Departamento de Engenharia Mecânica – Salvador, Bahia, Rua Aristides Novis, Federação.

Resumo: A energia é fator primordial ao desenvolvimento econômico, A qualidade de vida que dela resulta, possibilita realizar as tarefas de forma mais simples sendo essencial ao cotidiano das pessoas. As crises dos combustíveis em 1973 e 1979, que desencadearam um contínuo aumento dos preços do petróleo, implicaram em um crescente interesse pelas fontes de energias renováveis, amplamente disponíveis nos países em desenvolvimento. Pretendemos aqui analisar o desempenho obtido em motores de combustão interna com as diversas composições de gás (H_2+CO) gerados em gaseificador de leito fixo, multiestagio, obtidos com alguns tipos de madeira disponíveis no recôncavo baiano e no sertão. Pretendemos ainda efetuar análises energéticas incluindo o balanço de matéria, balanço de energia. Os conceitos aqui apresentados são de fundamental importância para nosso estudo. Esperamos, a partir da reflexão e experimentação fundamentada nos dados levantados, otimizar a produção de energia através de gaseificação de madeira, tornando financeiramente viável o atendimento das necessidades energéticas de comunidades isoladas.

Palavras-Chave: Gaseificação, Biomassa, Moto Gerador e Energia.

1. INTRODUÇÃO

Os gases de biomassa foram largamente utilizados como combustível dos motores de combustão interna na época da segunda guerra (REED, 1989) face a escassez de combustíveis fósseis, o que propiciou diversos estudos da tecnologia de gaseificação. Nos dias atuais a busca por combustíveis renováveis, que minimizam os impactos no meio ambiente e que atendam as demandas e a realidade das comunidades isoladas tem levado ao desenvolvimento de novas pesquisas utilizando esta tecnologia (NOGUEIRA et al., 2008).

Complementada por trabalhos atuais de pesquisadores a nível mundial. Busca-se o estado da arte dos Gaseificadores. Paralelamente à revisão literária desenvolveu-se uma metodologia e uma plataforma de teste, para a análise dos gases gerados no nosso gaseificador para alguns tipos de biomassa que nos permita uma avaliação qualitativa e quantitativa do desempenho dos moto-geradores.

2. MÉTODOS E MATERIAIS

2.1. Procedimentos Experimentais

Os experimentos de campo estão sendo orientados buscando a obtenção de gases com poder calorífico acima da média, com o maior retorno energético possível. Para isso consideraremos a energia contida na biomassa e a efetiva energia disponibilizada nos bornes de saída do gerador. Em resumo: geração eficiente de energia com menor impacto.

Os dados obtidos no campo, na oficina e no laboratório estão sendo estudados e confrontados com dados obtidos por outros centros de referência e a literatura existente. Desta análise e comparação de dados e experimentos, prevemos a possibilidade de necessidade de retorno ao campo/laboratório para confirmar e compreender pontos discrepantes. A partir da consolidação destes resultados, serão intensificadas as avaliações energéticas dos gases produzidos no gaseificador e desempenho do moto gerador.

Para implementação dos testes de campo indispensáveis ao desenvolvimento deste estudo foi montada uma planta piloto Figura 1, constituída de:

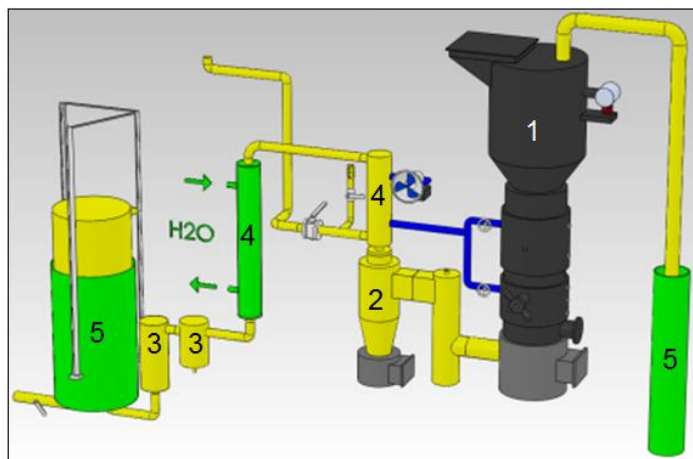


Figura 1. Croquis da Planta Piloto de Gaseificação elaboração própria.

1. Gaseificador de leito fixo (multe estágio) (Figura 1);
2. Ciclones (Figura 1);
3. Filtros (Figura 1);
4. Trocadores de calor (Figura 1);
5. Vasos (Figura 1);
6. Torre de resfriamento;
7. Motorgerador 12kva acionado a motor de combustão ciclo Otto;
8. Laboratório para controle das amostras e dos gases produzidos e gerados;
9. Carga Fantasma para teste de geração de energia elétrica;

CORONADO *et al.* (2006) *apud* Mendis (1989) comenta a metodologia de dimensionamento, análise energética e seleção de equipamentos de um gaseificador de biomassa para o acionamento de um motor de combustão.

Segundo Nogueira *et al.* (2008) o processo de gaseificação adotado é do tipo co-corrente, com dois estágios de injeção de ar, onde o mesmo apresenta procedimento eficiente, eficaz, econômico e ambientalmente correto, conforme Hasler (1999), para gerar gás combustível a partir de resíduos de madeira e outras biomassas.

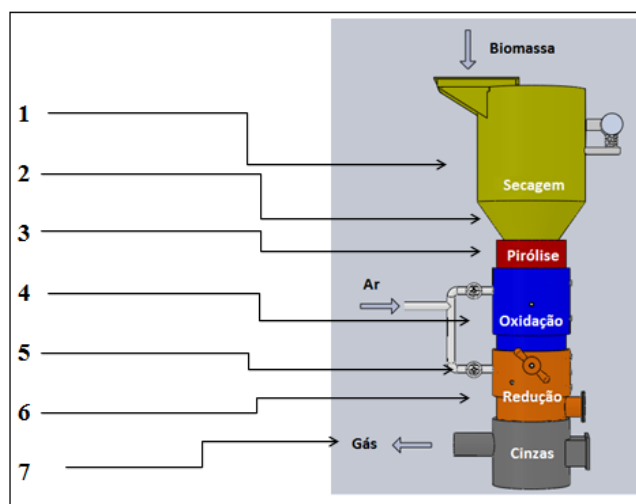


Figura 2. Gaseificador Biomassa dois Estágios, extração por baixo (downdraft), elaboração própria.

O processo de gaseificação da biomassa ocorre em equipamentos denominados gaseificadores, onde 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) numa temperatura de cerca de 280-450°C. Num gaseificador de leito fluidizado não é possível definir estas zonas (SALES, ANDRADE e LORA, 2006).

Segundo Andrade (2007), gaseificação de biomassa é uma solução mais inteligente que a sua queima direta, entre as inúmeras vantagens ressaltasse a maior controlabilidade para o uso quer seja em motores ciclo Otto ou para o uso residencial, menor emissão de poluentes, a grande desvantagem é que requer, a utilização de uma tecnologia mais complexa do que a da queima direta e maiores perdas na conversão. Os gaseificadores podem ser divididos considerando o tipo de leito em fixo e fluidizado, os de leito fixo são subdivididos em concorrente, contracorrente e fluxo cruzado e também quando as condições de trabalho, em atmosféricos e pressurizados e finalmente quanto a extração dos gases podendo ser extração por cima, por baixo e transversal,

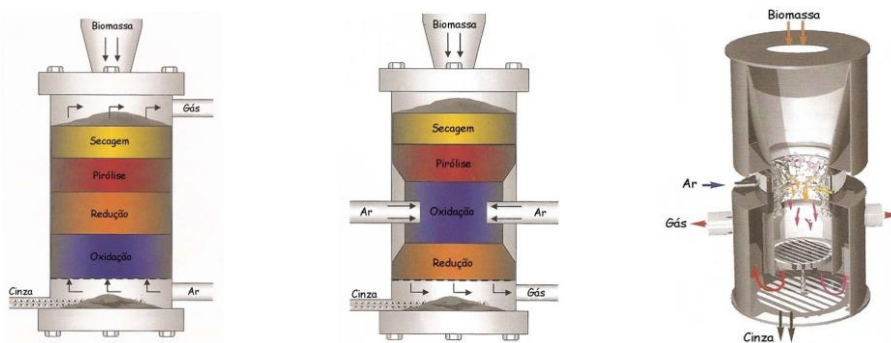


Figura 3. Gaseificadores de Biomassa, extração por cima, por baixo e extração transversal - (Adaptado de Gonçalo Rendeiro, 2010)

2.2. Funcionamento do Gaseificador:

Reed (1989) descreveu os estágios de funcionamento de um gaseificador conforme abaixo:

1 - No gaseificador, de dois estágios o ar é injetado radialmente, em direção ao centro provocando queima parcial e fornecendo energia para secagem e pirólise (acima da zona de combustão) e para reações endotérmicas.

2 - Na parte inferior, como a temperatura é maior, inicia a etapa de pirólise com grande liberação de voláteis e formação do carvão vegetal.

3 - Na região em que o ar é injetado (zona de oxidação). A biomassa e os voláteis são parcialmente queimados, com forte liberação de energia, atingindo temperatura da ordem de 1300°C.

4 - A região de biomassa incandescente existente é reforçada a partir do início do segundo estágio e se estende por todo espaço abaixo dos bicos até a grelha de sustentação do leito, evitando o acúmulo e facilitando a remoção de cinza juntamente com pequenos pedaços muito leves de biomassa completamente desvolatilizada.

5 - No estágio seguinte, nova injeção de ar provoca a destruição do alcatrão reduzindo-o a compostos leves passíveis de serem injetados em motor de combustão interna.

6 - A biomassa incandescente, acima de 800°C, age como catalisador das reações de reforma embora parte seja consumida como reagente em reações com água e dióxido de carbono, forma hidrogênio e monóxido de carbono.

7 - A tiragem do gás combustível é feita pela parte inferior (o fluxo gasoso se dá de cima para baixo), o gás tem de atravessar o leito de carvão vegetal incandescente ocorrendo redução em uma extensa região endotérmica, formando hidrogênio, monóxido de carbono, metano e eteno.

2.3. Processos Físico-Químicos que ocorrem do Topo a Grelha do Gaseificador

Conforme Rajvanshi (1986) e a descrição técnica de funcionamento do gaseificador elaborada pela empresa TERMOQUIP (2009) as etapas e reações físico-químicas que ocorrem no processo de gaseificação estão descritas nas Figuras 3 e 4 a seguir.

Secagem: Madeira úmida $\rightarrow$ Madeira seca + água
Torrefação: Madeira seca $\rightarrow$ Madeira torrada + vapor + ácido acético + metano + CO ₂ + CO + outros orgânicos
Pirólise: Madeira torrada $\rightarrow$ Carvão Vegetal + Voláteis Leves e Pesados
Combustão: C + O ₂ $\rightarrow$ CO ₂ + Calor
Hidrocarbonetos leves e pesados + O ₂ $\rightarrow$ CO ₂ + H ₂ O + Calor

Figura 3. Tipos de Processos Físico-Químicos para Gaseificação de Madeira, segundo Rajvanshi (1986) e TERMOQUIP (2009).

Redução:
Reação do gás d'água : C + H ₂ O $\rightarrow$ CO + H ₂ (h° ₍₂₉₈₎) = + 131,29 kJ/mol)
Reação de Boudouard: C + CO ₂ $\rightarrow$ 2 CO (h° ₍₂₉₈₎) = + 172,46 kJ/mol)
Reações para formação de CH ₄ e C ₂ H ₄ : C + 2 H ₂ + CH ₄ e 2 C + 2 H ₂ $\rightarrow$ C ₂ H ₄
<i>Reações de Reforma:</i>
Reforma : C _n H _x + n CO ₂ $\rightarrow$ (x/2) H ₂ + n CO
Podem ocorrer também outras reações com formação de pequenas quantidades de compostos de enxofre (H ₂ S, COS, CS ₂) e de nitrogênio (NH ₃ , HCN...). Os óxidos de nitrogênio, embora se formem na etapa de oxidação, são praticamente eliminados pela reação 2 NO _x + x C $\rightarrow$ x CO

Figura 4. Reações químicas do Processo de Gaseificação da Madeira, segundo Rajvanshi (1986) e TERMOQUIP (2009).

2.4. Equação Teórica

Abaixo é apresentada a Equação (1) para os cálculos dos poderes caloríficos do Gás produzido no Gaseificador, considerando as mudanças de frações volumétricas experimentais x simuladas.

O poder calorífico inferior (PCI) de um gás é dado pela Equação (1) (Andrade, 2007 *apud* Fossum, 1998):

$$PCI_{gas} = \sum_i y_i PCI_i \quad (1)$$

Onde y_i = fração volumétrica do componente do gás;

PCI_i = Poder calorífico inferior do componente do gás.

Conforme literatura, os poderes caloríficos inferiores para os componentes combustíveis do gás pobre são:

CO: 12,6 MJ/Nm³;

H₂: 10,7 MJ/Nm³;

CH₄: 35,8 MJ/Nm³.

3. CÁLCULOS

3.1. Cálculo do PCI do gás combustível com valores experimentais

As frações volumétricas obtidas experimentalmente foram:

CO: 0,2473;

H₂: 0,1485;

CH₄: 0,0231.

Então:

$$PCI_{GÁS} = (12,6 * 0,2473)_{CO} + (10,7 * 0,1485)_{H_2} + (35,8 * 0,0231)_{CH_4} = 5,53 \text{ MJ/Nm}^3$$

3.2. Cálculo do PCI do gás combustível com valores simulados

As frações volumétricas obtidas pelo simulador foram:

CO: 0,1425;

H₂: 0,1697;

CH₄: 0,0104.

Refazendo o cálculo para os valores das frações volumétricas citadas, obteve-se:

$$PCI_{GÁS} = (12,6 \cdot 0,1425)_{CO} + (10,7 \cdot 0,1697)_{H_2} + (35,8 \cdot 0,0104)_{CH_4} = 3,98 \text{ MJ/Nm}^3$$

4. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Nas tabelas 1,2 e 3 os resultados das análises efetuadas na biomassa usando um CHNOS, Fab. LECO, com detector de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre; BOMBA CALORIMETRICA FAB. IKA WORKS, para determinação do poder calorífico e energético em combustíveis, biomassa, sólidos e líquidos, Para o gás proveniente do gaseificado as concentrações foram analisadas no CROMATOGRÁFO, Fab. SHIMADZU, identificando as concentrações dos seguintes gases: hidrogênio, (H₂), monóxido de Carbono (CO), dióxido de Carbono (CO₂), etano (CH₃), metano (C₂H₄) e nitrogênio (N₂) Para os gases de exaustão do motor o equipamento utilizado foi ANALISADOR DE GASES, Fab. TELEGRAM Monitoring, para medição dos seguintes gases na exaustão: oxigênio (O₂), monóxido de Carbono (CO), óxidos de nitrogênio - NO_x (óxido nítrico - NO e dióxido de nitrogênio - NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), o dióxido de Carbono (CO₂) é fornecido por cálculo.

Tabela 1. Propriedades da Biomassa

Biomassa	Carbono Total	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Voláteis	Cinzas	Umidade	PCS	PCI
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(% g)	(kJ/kg)	(kJ/kg)
Eucalipto	47,10	6,22	46,31	0,27	0,10	15,33	0,59	14,36	17.895	14.488,04

Tabela 2. Propriedades do Gás Combustível

Biomassa	Composição do Gás Combustível (bs) % V/V					
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	CO ₂	N ₂
Eucalipto	14,85	24,73	2,31	<1	21,15	<1

Tabela 3. Propriedades do Gás Combustão

Biomassa	Composição do Gás de Combustão % V/V				
	O ₂	CO	Nox	Sox	CO ₂
Eucalipto	3,67	4524,78	1,89	< 1	9,95

5. SIMULADOR DE PROCESSO DA UNIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA:

De forma a validar os resultados de campo obtidos na planta piloto, foi utilizada uma plataforma EES com um simulador de processo que fornece os resultados das análises tanto da biomassa como do gás produzido pelo gaseificador e dos gases de combustão. Apresentando os valores razoavelmente coerentes.

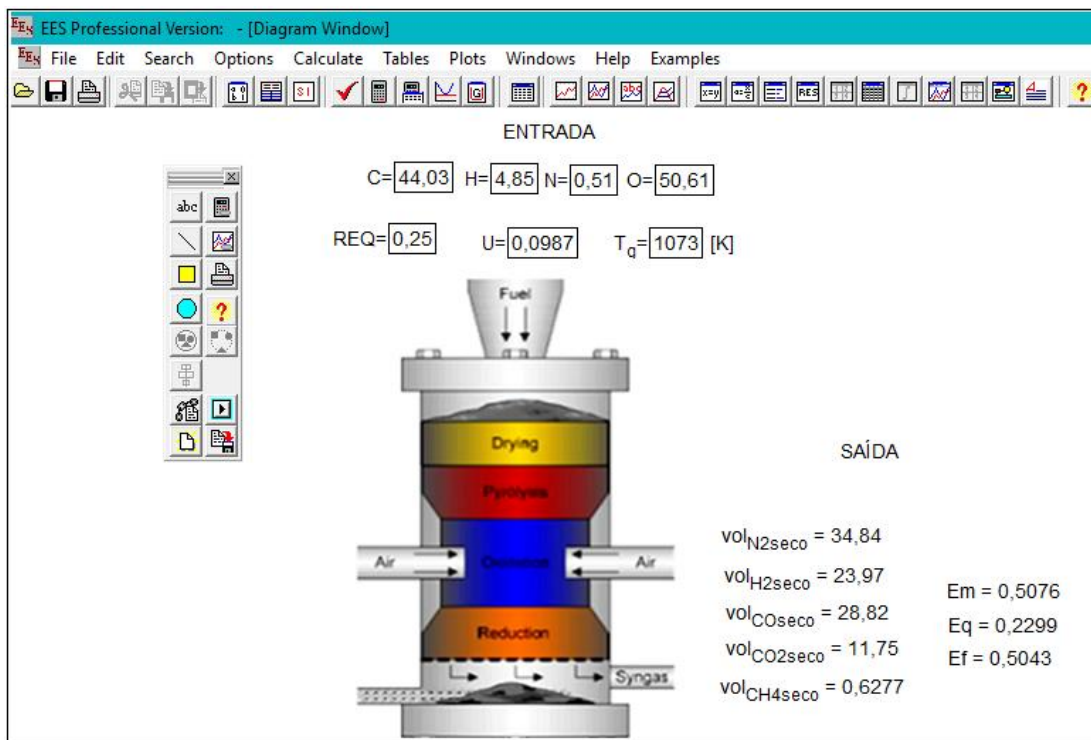


Figura 4 – Tela de Interface no Simulador EES da Unidade Piloto UFBA

6. DADOS OBITIDOS COM AS ANALISES DE CAMPO E O SIMULADOR

Na Tabela 4 onde estão transcritos os resultados dos experimentos e gerados pelo simulador onde se avalia a diferença percentual entre os valores medidos e os simulados.

Tabela 4. Mapa dos dados obtidos das análises de campo e os gerados pelo Simulador

RESULTADOS EXPERIMENTAIS X SIMULADOS											
	07/nov			21/nov		25/nov		28/nov		Medio Global Experimental	Medio Global simulado
	Dado experimental	Dado simulação	Diferença	Dado Campo	Dado simulação	Dado Campo	Dado simulação	Dado Campo	Dado simulação		
O2	2,58			3,04		3,33		5,72		3,67	%
Co	3374,17			9296,00		3285,29		2143,67		4524,78	ppm
Co2	10,58			10,31		10,13		8,78		9,95	%
No	2,10			5,00		2,00		0,00		2,28	ppm
Nox	1,70			5,29		2,29		0,00		2,32	ppm
Pressão Gasom.	62,50			79,50		37,14		38,33		54,37	cm
H2	11,57	16,62	30,4%	15,88	16,66	15,07	17,31	13,0%	16,88	17,29	2,4%
CO	21,93	12,14	-80,6%	22,64	12,26	26,88	16,24	-65,5%	27,47	16,36	-67,9%
CH4	1,32	1,69	21,8%	1,94	1,65	1,79	0,42	-324,3%	4,18	0,40	-935,3%
CO2	21,46	16,97	-26,4%	20,76	16,88	20,81	13,89	-49,8%	21,58	13,80	-56,4%
PCI gás		3,93 MJ/kg			3,94 MJ/kg		4,07 MJ/kg		4,07 MJ/kg		

7. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pelas análises de laboratório, pode-se identificar que os resultados experimentais com o gaseificador operando com biomassa de eucalipto apresentaram dados compatíveis com os encontrados na literatura na maioria dos casos, bem como com os resultados apresentados pelo simulador desenvolvido pela equipe do Laboratório de Energia da UFBA. Os valores divergentes foram as concentrações do CO, obtidos experimentalmente, pois estão acima do esperado. A partir destas constatações, já estão sendo realizados novos testes visando à obtenção de novos resultados.

Ações adicionais:

- Avaliado e quantificado o desempenho de conjuntos moto geradores operando com gás oriundo de resíduos florestais;
- Proposto uma solução viável e de baixo custo para geração de energia elétrica a partir da gaseificação de madeira proveniente de reflorestamento ou de manejo racional;
- Proposição de mais uma opção para uso dos resíduos de madeira disponíveis no Brasil;
- Avaliado os impactos ambientais decorrentes do processo estudado;
- Demonstrar o uso de gaseificadores de resíduos de biomassa para geração de energia elétrica.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos colegas do Laboratório de Energia da Escola Politécnica pela cooperação e ajuda, em particular aos colegas Jose Alexandre, Marcela e a Vera Araújo, da BRASKEM e do CNPq, e FINEP.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, R.V., 2007, “Gaseificação de Biomassa uma Análise Teórica e Experimental”. Tese de Doutorado - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0032784.pdf>>. Acesso em 15 mar. 2018.
- Coronado, C.R., Silveira, J.L., Arauzo, J.P., 2006, “Metodologia de dimensionamento, análise energética e seleção de equipamentos de um gaseificador de biomassa para o acionamento de um motor de combustão”. Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, Brasil. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022006000200010&script=sci_arttext>. Acesso em 15 mar. 2018.
- Hasler, P., Nussbaumer, T., “Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification”. Biomass and Bioenergy, vol 16, p 385 – 395. 1999.
- Mendis, M.. 1989, "Biomass gasification: Past Experiences and future prospects in developing countries". Pyrolysis and Gasification, ed, G. L. Ferrero, K. Maniatis, A. Buekens & A.V. Bridgwater. Elsevier Appl. Science, London, UK, pp, 11-28.
- Nogueira, M.F.M., Rendeiro, G., Brasil, A.C.M., Cruz, D.O. de A., Guerra, D. R. da S., Duarte, A.A.A.M., Macedo, E.N., 2008, “Manual de Elaboração de Projetos para Comunidades Isoladas da Amazônia: centrais termoeletricas a biomassa combustão e gasificação”. Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil, v. 1. 76 p..
- Reed, T., Dass, A. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Solar Energy Research Institute (SERI), U.S. Department of Energy Solar Technical Information Program. Third Printing., pp 140. 1989.
- Rajvanshi, A.K., 1986, “Biomass Gasification”. In: Goswami, D.Y., Ed., Alternative Energy in Agriculture, Vol. II, CRC Press, Boca Raton, 83-102. Disponível em: <[http://www.scrip.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1235199](http://www.scrip.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1235199)>. Acesso em 20 mar. 2018.
- Yogi Goswami , Energy in Agriculture, Vol. II, pgs. 83–102.
- Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/b885/e79f0e0bf6055751c75709a38021488f1bfa.pdf>>. 15 mar. 2018.
- Sales, C.A.V.B. de, Andrade, R.V., Lora, E.E.S., “Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa”. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 6., 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022006000100067&script=sci_arttext>. Acesso 15 mar. 2018.
- TERMOQUIP ENERGIA ALTERNATIVA LTDA., 2009, “Descrição do Processo de Gaseificação”, Campinas, Brasil.

10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho

EVALUATION OF PERFORMANCE OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES OPERATING WITH WOOD GAS

Eduardo dos Santos Barata¹, e-mail: eduardobarata@uol.com.br
Ednildo Andrade Torres¹, e-mail: ednildo@ufba.br

¹ Universidade Federal da Bahia (UFBA), Escola Politécnica de Engenharia – Departamento de Engenharia Mecânica – Salvador, Bahia, Rua Aristides Novis, Federação.

Abstract. *Energy is a prime factor for economic development. The quality of life resulting from it makes it possible to perform tasks in a simpler way, being essential to people's daily lives. Fuel crises in 1973 and 1979, which triggered a steady rise in oil prices, have led to a growing interest in renewable energy sources widely available in developing countries. We intend here to analyze the performance obtained in internal combustion engines with the various gas compositions (H₂ + CO) generated in a fixed bed gasifier, multi stage, obtained with some types of wood. We also intend to carry out energy analyzes including the matter balance, energy balance. The concepts presented here are of fundamental importance. We hope, based on the reflection and experimentation based on the data collected, to optimize the production of energy through wood gasification, making it financially viable to meet the energy needs of isolated communities.*

Keywords: *Gasification, Biomass, Motor Generator and Energy.*