



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

GASEIFICAÇÃO EM LEITO FLUIDIZADO UMA ALTERNATIVA PARA A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE BAIXA GRANULOMETRIA COMO COMBUSTÍVEL.

Rubenildo V. Andrade ^{*1}, Electo E. Silva Lora ² e Paulo Sérgio Correa ³

^{*1} Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303 – Pinheirinho, Itajubá-MG
correo-e: ruben@unifei.edu.br

² Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303 – Pinheirinho, Itajubá-MG

³ Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá
Av. BPS, 1303 – Pinheirinho, Itajubá-MG

RESUMO

A biomassa de baixa granulometria como a casca de arroz, o bagaço de cana e a serragem são resíduos que podem ser utilizados para conversão em energia útil como a energia elétrica, haja vista, o aproveitamento em fornalhas de geradores de vapor em usinas de açúcar e álcool.

Uma alternativa para utilização desse tipo de biomassa é a sua conversão em gás combustível em equipamentos denominados de gaseificadores, mais especificamente os de leito fluidizado, que podem recebê-los sem haver a necessidade de um processo de densificação.

Esse trabalho apresenta os resultados obtidos para teste de um modelo de gaseificador de leito fluidizado borbulhante localizado no laboratório de máquinas térmicas da Universidade Federal de Itajubá utilizando casca de arroz como combustível e propõe sugestões para modificações necessárias a melhoria de seu desempenho, principalmente no que se refere ao aumento do teor de hidrogênio obtido.

A melhor condição obtida foi para um fator de ar de 0,22, para uma temperatura média do leito de 780 °C, sendo as frações de CO, H₂ e CH₄ obtidos de 17,8; 2,3 e 4,5 % em volume, respectivamente. As principais mudanças realizadas no reator foram a redução da altura de alimentação do combustível e a modificação do sistema de alimentação, onde introduziu-se um outro parafuso de transporte helicoidal. Testes com essas modificações deveram ser realizados em momento oportuno.

Palabras Claves: gaseificação, leito fluidizado, biomassa, resíduo, energia renovável



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

A biomassa é um combustível renovável que pode ser utilizada como combustível em acionadores primários como as turbinas a gás ou motores alternativos de combustão interna, depois de ser convertida em gás através de um processo de gaseificação. Considerado a biomassa de baixa granulometria para que seja aproveitada em um processo de gaseificação sem a necessidade de ser densificada é mais conveniente que seja utilizada em reatores de leito fluidizado.

Os gaseificadores são equipamentos que podem converter a biomassa em gás combustível através da queima controlada a baixo das condições estequiométricas ($\lambda < 1$). Há diferentes tipos de reatores entre eles os mais comuns são os de leito fixo e os de leito fluidizado. Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser classificados em leito fluidizado borbulhante, circulante e de duplo leito. O tipo considerado nesse trabalho é o de leito borbulhante onde a velocidade superficial é de 0,5 a 1 m/s [1].

A biomassa é introduzida em um leito fluidizado de material inerte, por exemplo, areia onde ocorre o processo de gaseificação.

Nesse tipo de reator a alimentação do combustível é um ponto chave para o seu bom funcionamento, pois qualquer tipo de alteração no processo de fornecimento de combustível pode resultar em problemas com o leito. Por exemplo, o aumento drástico da temperatura o que poderá provocar a fusão das cinzas remanescentes no leito ocasionando a sua aglomeração com consequente perda da fluidização.

Alguns parâmetros influenciam o desempenho do processo de gaseificação, entre os quais se pode citar o agente de gaseificação, a velocidade superficial do leito, a altura do leito, a altura de alimentação da biomassa, a temperatura média do leito e o fator de ar. Neste trabalho, utiliza-se ar como agente de gaseificação, casca de arroz como combustível e varia-se o fator de ar entre 0,22 e 0,27.

Os gaseificadores podem utilizar diferentes agentes de gaseificação como o ar ou o vapor, sendo que o valor do poder calorífico do gás obtido com o ar pode chegar a 5 MJ/Nm³. Valores maiores podem ser obtidos usando vapor ou oxigênio.

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos para a gaseificação de casca de arroz num modelo de reator de leito fluidizado borbulhante, onde utiliza-se ar como agente de



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

gaseificação. É realizada uma análise paramétrica, sendo levantada as frações volumétricas dos componentes combustíveis do gás obtido, bem como, é realizada um levantamento do teor de alcatrão. Os resultados são considerados para modificações que estão sendo realizadas para melhorar o desempenho do gaseificador, principalmente, considerando o sistema de alimentação e a fração de hidrogênio obtido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. O gaseificador de leito fluidizado

Trata-se de um reator de leito fluidizado borbulhante, descrito assim devido a sua velocidade superficial na faixa de 0,7 m/s. A potência térmica fornecida é de 240 kW, tem aproximadamente 6 metros de altura e 0,990 m de diâmetro externo e 0,474 m de diâmetro interno, onde duas regiões geométricas podem ser distinguidas: o leito e o “freeboard”.

Na região do leito é introduzida a biomassa, que em contato com o material inerte a alta temperatura, contido no reator, entra em processo de degradação térmica para produção do gás pobre. O material inerte que constitui o que pode ser chamado de leito físico tem altura estática de 0,5 m e irá expandir conforme o seu regime de operação.

O gaseificador é construído em aço 1020 e internamente é revestido por material refratário (cimento e tijolo).

Ao longo do reator são dispostos termopares tipo K que fornecem um mapa de operação do reator. O sinal é enviado a um sistema de aquisição de dados onde é possível registrar as informações coletadas em tempo real. Possibilitando a tomada de decisões durante a operação do mesmo. A vazão de ar que é alimentada ao reator também é monitorada, além dos valores das concentrações volumétricas de gases combustíveis presente no gás pobre. A figura 1 apresenta um esquema do sistema de gaseificação antes das modificações realizadas, nela é possível ver o reator de leito fluidizado, o sistema de alimentação, a localização dos termopares, o circuito do agente de gaseificação e de gás e o ciclone para separação do particulado elutriado.

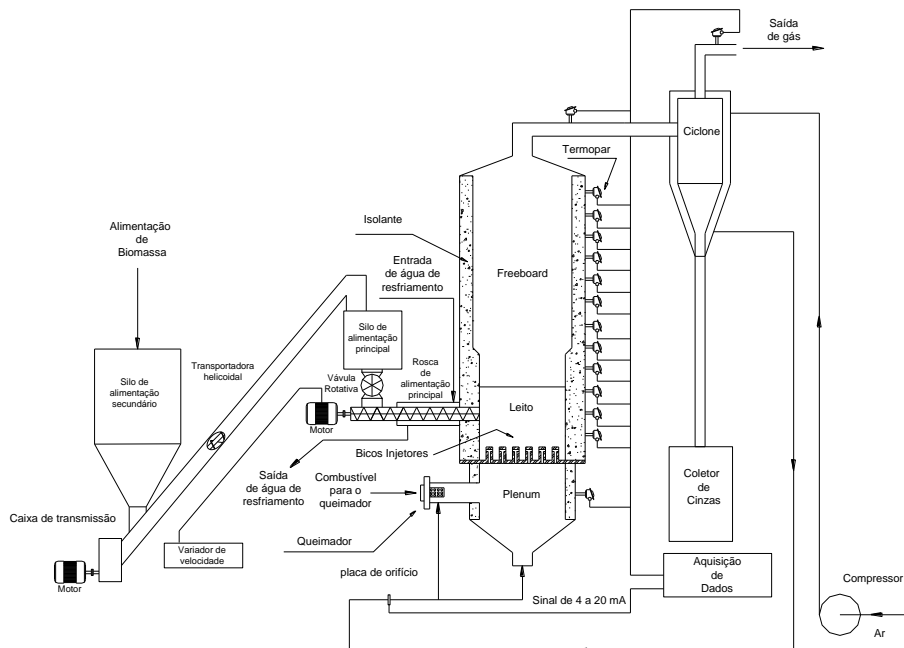


Figura 1 – Diagrama esquemático do sistema de gaseificação estudado.

2.3. Operação do sistema:

A primeira fase da partida do gaseificador é o aquecimento do leito, que é realizado através do ar que nele é insuflado, o qual é aquecido pela energia térmica proveniente dos gases quentes da combustão de GLP que ocorre em um queimador localizado na região logo abaixo do leito (plenum). Essa mistura é introduzida no reator através de injetores, devidamente distribuídos em uma placa. A Figura 2 mostra a placa distribuidora durante a sua montagem.

O inerte contido no leito é aquecido de forma lenta e gradativa até o momento de sua fluidização, quando a temperatura ao longo de todo o leito tende a se igualar. Este momento também é caracterizado por uma vibração da estrutura do gaseificador.

Quando o leito está à temperatura de 400 °C pode-se desligar o queimador e iniciar a alimentação da biomassa. A válvula que regula a entrada de ar deve estar completamente aberta para permitir que o sistema opere em regime de combustão possibilitando o rápido aumento da temperatura ao longo do reator.

Quando a região do leito atingir uma temperatura da ordem de 750 °C o sistema pode ser posto em regime de gaseificação ajustando-se o fator de ar.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

O gás gerado irá passar por um ciclone que fará a retenção da maior parte do particulado transportado pelo gás. Esse ciclone também funciona como um trocador de calor, já que o ar primário que vai para o gaseificador é, nele, previamente aquecido pelo gás gerado. A Figura 3 mostra o ciclone em corte onde é possível observar os detalhes internos.



Figure 2 – Foto da placa distribuidora

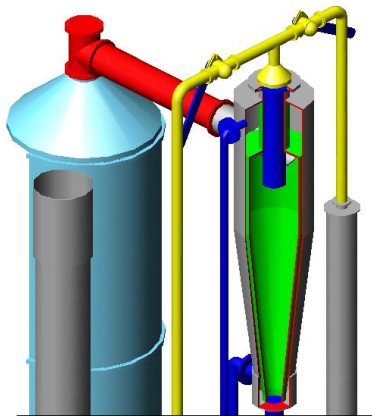


Figure 3- Ciclone.

2. 4. Procedimento de testes:

A gaseificação ocorre em uma faixa estreita de fator de ar (λ), que varia de 0,2 a 0,4 e a velocidade superficial do leito (u_{s1}) deve estar em torno de 0,7 m/s, para melhor condição de gaseificação, sendo assim, a operação foi planejada para essa faixa de variação de parâmetros.

O ajuste do λ é realizado através da quantidade de ar e combustível fornecidos ao gaseificador, dessa forma esses parâmetros foram calculados para as condições citadas.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

A Tabela 1 apresenta os cálculos realizados, para a casca de arroz, da vazão de ar e biomassa que devem ser introduzidos no leito para garantir que um determinado fator de ar e uma dada velocidade superficial do leito sejam obtidos. Os valores apresentados são para temperatura do leito de 750 °C e umidade da biomassa de 10,53 %. A Tabela 3 mostra a composição elementar da casca de arroz adotada para os cálculos.

O fator de ar é definido através da equação (1):

$$\lambda = \frac{ar_{real}}{ar_{est}} \quad (1)$$

Tabela 1 – Características de operação do gaseificador [2].

Velocidade superficial Vsl [m/s]	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
FA	Vazão de biomassa [kg/h]					
0,2	132,03	158,44	184,84	211,25	237,66	264,06
0,22	120,03	144,03	168,04	192,05	216,05	240,06
0,24	110,03	132,03	154,04	176,04	198,05	220,05
0,25	105,63	126,75	147,88	169,00	190,13	211,25
0,26	101,56	121,88	142,19	162,50	182,81	203,13
0,28	94,31	113,17	132,03	150,89	169,75	188,62
0,3	88,02	105,63	123,23	140,83	158,44	176,04
0,32	82,52	99,02	115,53	132,03	148,54	165,04
0,34	77,67	93,20	108,73	124,26	139,80	155,33
0,36	73,35	88,02	102,69	117,36	132,03	146,70
0,38	69,49	83,39	97,29	111,18	125,08	138,98
0,4	66,02	79,22	92,42	105,63	118,83	132,03
Vazão de ar [m³/h]	115,16	138,19	161,23	184,26	207,29	230,32

Tabela 2 - Composição elementar da biomassa (casca de arroz).

Composição elementar	Base seca	Base úmida
Carbono [C]	40,96	36,65
Hidrogênio [H]	4,30	3,85
Oxigênio [O]	35,86	32,08
Nitrogênio [N]	0,40	0,36
Enxofre [S]	0,02	0,02
Cinzas [a]	18,34	16,41
Umidade [W]	0,00	10,53



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

O valor do ar estequiométrico pode ser obtido a partir dos valores da composição elementar do combustível, como mostra a Equação (2):

$$\text{ar}_{\text{est}} = \frac{22,4 \cdot \left(\frac{1}{12}C + \frac{1}{4}H + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right)}{0,21} \quad [\text{m}^3_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}] \quad (2)$$

Os valores obtidos para a vazão mássica de combustível que é introduzida no leito são dados pela Equação 3. Onde u_{sl} - velocidade superficial do leito [m/s] e d_{leito} - diâmetro da seção do leito [m]

$$\dot{m}_{\text{comb.}} = \frac{u_{\text{sl}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{leito}}^2}{4}}{\lambda \cdot \text{ar}_{\text{est.}} \cdot \left(\frac{T_{\text{leito}} + 273,15}{273,15} \right)} \quad [\text{kg/s}] \quad (3)$$

Esses dados servem como orientação durante a operação do reator. A vazão de ar é regulada através de uma válvula e o seu valor é determinado através de uma placa de orifício cujas leituras de diferencial de pressão são lidas por um transdutor de pressão microprocessado que já converte esses valores de carga em valores de vazão através de equacionamento adequado.

O valor da vazão de combustível é determinada a partir de uma curva de calibração do sistema de alimentação (válvula rotativa), que é mostrada na figura 4, onde é possível observar que os valores são adequados para operação segundo os dados calculados apresentados na tabela 1.

Os testes realizados foram constituídos de três etapas: partida do sistema, testes em regime de gaseificação e parada. A partida do sistema consiste basicamente do aquecimento do reator e colocação do mesmo em regime de gaseificação, essa etapa pode ter duração de 2 horas, sendo que para atingir a condição de fluidização se gasta aproximadamente 45 minutos. Tendo-se atingido esse estágio é realizada as variações no fator de ar e leituras e coleta de dados dos parâmetros que influenciam na análise do processo. A parada do sistema é a fase onde se deve garantir que toda a biomassa restante possa ser consumida e que não haja mais gás residual.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

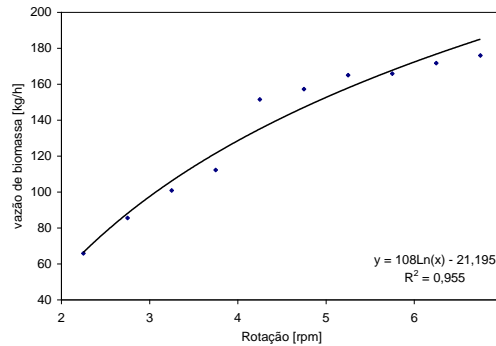


Figura 4 - Relação entre a rotação da válvula rotativa e a vazão de biomassa.

São realizadas leituras das frações volumétricas dos componentes combustíveis do gás (CO, H₂, CH₄), a fim de avaliar o seu poder calorífico que pode ser calculado através da Equação (4) [3], Onde y_i = fração volumétrica do componente do gás; PCI_i = Poder calorífico inferior do componente do gás.

$$PCI_{gas} = \sum_i y_i PCI_i \quad [MJ/Nm^3] \quad (4)$$

O poder calorífico inferior para os componentes combustíveis do gás pobre são: CO: 12,6 MJ/Nm³; H₂: 10,7 MJ/Nm³; CH₄: 35,8 MJ/Nm³.

É possível avaliar a eficiência a frio através da equação 5. Onde \dot{V}_{gas} representa a vazão volumétrica de gás e \dot{m}_{comb} e PCI_{comb} referem-se respectivamente ao consumo de combustível e poder calorífico inferior do combustível.

$$\eta_{frio} = \frac{\dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb}}{\dot{V}_{gas} \cdot PCI_{gas}} \quad (5)$$

O valor da quantidade de particulado e alcatrão presente no gás também foi avaliado através de uma análise gravimétrica.

3. RESULTADOS:

Os valores obtidos para as frações volumétricas de monóxido de carbono, hidrogênio, e metano, bem como, os valores obtidos para o poder calorífico do gás são apresentados na figura 5,



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

em função do fator de ar, para uma temperatura média do leito de 780 °C, tendo-se utilizado casca de arroz como combustível. Pode-se observar através desses dados que os melhores resultados foram obtidos para um valor de fator de ar de 0,22, que as seguintes frações para o CO, H₂, e CH₄, respectivamente: 17,8; 2,3; 4,5.

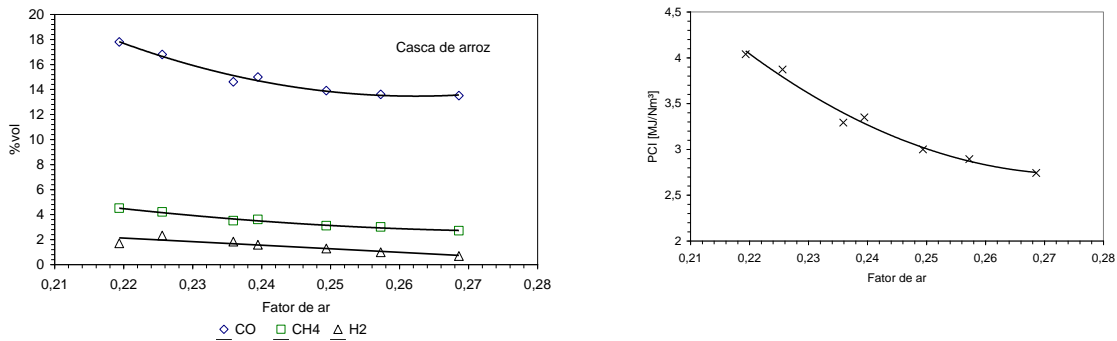


Figura 5 – Fração volumétrica e poder calorífico do gás de biomassa obtido.

Observa-se que os valores de H₂ são relativamente baixos apesar de correspondente com a experiência de outros autores, conforme pode ser confirmado na tabela 3. Todavia, alguns fatores podem ter colaborado para que isso tivesse ocorrido, como a altura de alimentação do combustível no reator muito alta, próxima a superfície, o que poderia ocasionar a redução do tempo de residência na região do leito o que interferiria na conversão do H₂, bem como o arraste pelas bolhas de ar do combustível provocando seu consumo mais na parte superior do leito, outro fator poderia ser a inadequada temperatura de operação do reator e condição de alimentação do combustível.

Tabela 3 – Dados comparativos para gaseificadores de leito fluidizado

Referência	Temperatura do leito	Tipo de biomassa	Tipo de gaseificador	Composição do gás [Vol.%]		
				CO	CH ₄	H ₂
[4]	800	casca de arroz	LFB	20,00	5,00	4,00
[5]	700	capim elefante	LFB	17,06	5,16	5,61
[6]	790	casca de arroz	LFC	15,90	6,80	2,30
Este trabalho	780	casca de arroz	LFB	17,80	4,50	2,30

LFB - Leito fluidizado borbulhante

LFC - Leito fluidizado circulante

A partir dessas observações foram realizadas modificações no reator de forma a se tentar aumentar a fração de H₂ no gás produzido. A altura da alimentação do combustível com relação à placa de injeção de ar foi reduzida, e o processo de alimentação também foi modificado para se tentar garantir uma melhor alimentação do combustível.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI



Sistema de alimentación antigo



Sistema de alimentação com as modificações atuais

Figura 6 – Sistema de alimentação de biomassa

A fração de metano presente no gás de 4,5 % é mais alto que os observados em reatores de leito fixo que geralmente é abaixo de 2%, mas correspondente aos reatores de leito fluidizado.

A eficiência a frio, considerando um consumo de biomassa de 147 kg/h e uma vazão de gases de 173 Nm³/h, poder calorífico de 12,64 MJ/Nm³ para a casa de arroz, foi de 35%.

O teor de alcatrão obtido de 18,76 g/Nm³ é bem característico desse tipo de reator que geralmente se encontra acima de 1 g/Nm³. A figura 7 apresenta uma foto da vidraria durante o processo de coleta de gás para análise do teor de alcatrão.

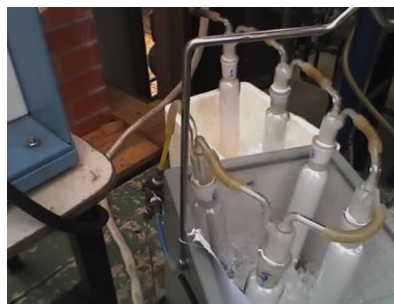


Figura 7 – vidraria durante a coleta de alcatrão

4. CONCLUSÕES:

O modelo de gaseificador de leito fluidizado possibilita o estudo da gaseificação de biomassa de materiais de baixa granulometria ou polidispersos como a biomassa estudada (casca de arroz). Não é de fácil operação, desde que demanda conhecimentos específicos e planejamento para evitar certos imprevistos e fenômenos como a aglomeração do leito.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

O comportamento operacional do reator com casca de arroz é bom, pois a baixa umidade permite uma rápida partida do reator e sendo um material limpo de corpos estranhos necessitando de pouco ou nenhum tratamento prévio.

Durantes os testes realizados observou-se a repetibilidade dos resultados, tendo-se obtido para os valores das frações de gases combustíveis os seguintes resultados: CO (17,8%); H₂ (2,3); CH₄ (4,5) e PCI (4 MJ/Nm³). Neles observa-se que a fração de hidrogênio é relativamente baixa, o que justificou a necessidade de mudanças no sistema de gaseificação, tendo-se optado por reduzir a altura de alimentação do combustível e alterações no sistema de alimentação, que serão provados brevemente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Basu, P. Biomass gasification and pyrolysis: Practical design. Elsevier, 2010.
- [2] ANDRADE, R. V., *Gaseificação de biomassa uma análise teórica e experimental*. Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI, tese de doutorado, 2007.
- [3] FOSSUM, M.; BEYER, R.V. Co-Combustion: biomass fuel gas and natural gas. Disponível em: <http://www.ieatask33.org/content/publications/Publications_Co-firing>; acesso em: 26/05/2014
- [4] MANSARAY, K. G.; GHALY, A. E.; TAWHEEL, A. M. A.; HAMDULLAHPUR, F. Air gasification of rice husk in a dual distribution type fluidized bed gasifier. Biomass and Bioenergy, v.17, p. 315-332, outubro 1999.
- [5] SMEENK, J.; BROWN, R.C. Experience with Atmospheric Fluidized Bed Gasification of Switchgrass. Disponível em: <http://www.iowaswitchgrass.com/_docs/pdf/experience%20with%20Atmos.%20Fluidized%20Bed.pdf>. Acesso em: 20 set. 2006.
- [6] YIN, L. X.; Wu, C. Z.; Zheng, S. P.; Chen, Y. Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. Biomass & Bioenergy, v. 23, p. 181- 187, 2002.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os que apoiaram a pesquisa na área de gaseificação de biomassa na UNIFEI/NEST ao longo desses anos de intensa atividade, onde se pode citar; CEMIG, CPFL, PETROBRAS, CNPQ, CAPES, FAPEMIG, ANEEL, AGTHERM e TERMOQUIP.